**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ОТДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН**

**ДАГЕСТАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН**

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН**

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО НЕТРАДИЦИОННЫМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМ ИСТОЧНИКАМ ЭНЕРГИИ ОЭММПУ РАН**

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГЕОТЕРМИИ**

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

***материалы***
***V Школы молодых ученых им. Э.Э.Шпильрайна***

**Махачкала 2012**

*При поддержке Российского Фонда*
*Фундаментальных Исследований*
*Грант № 12-08-06823-моб_г*

ББК 31.4 + 31.6
УДК 620.91 + 620.92

*Печатается по решению Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН*

**Редакционно-издательский совет**:
дтн Алхасов А.Б., дтн Попель О.С., дтн Баранов Д.А., кхн Каймаразов А.Г., ктн Кобзаренко Д.Н., дфмн Мейланов Р.П., дфмн Рамазанов М.М.

**Рецензенты**:
Беренгартен М.Г. - проректор Московского государственного университета инженерной экологии, профессор.
Ашурбеков Н.А. - проректор Дагестанского государственного университета, профессор

**Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов** // Материалы V Школы молодых ученых имени Э.Э.Шпильрайна. 11-12 октября 2012г. / Под ред. д.т.н. А.Б.Алхасова - Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2012. – 394с.

В материалах V Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» опубликованы обзорные доклады и лекции ведущих специалистов, а также доклады и выступления молодых ученых, аспирантов, по различным проблемам освоения возобновляемых источников энергии.

Для научных работников, педагогов, молодых специалистов, аспирантов и студентов энергетических специальностей.

ISBN 978-5-4242-0025-0

© Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 2012
© Коллектив авторов

*от редактора*

# *ПРЕДИСЛОВИЕ*

Стали доброй традицией организация и проведение крупных научных академических форумов, посвященных фундаментальным задачам возобновляемой энергетики, на земле Дагестана, на базе Института проблем геотермии – недавно отметившего свое 30-тилетие – единственного научного учреждения в структуре Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, непосредственно занимающегося теоретическими и экспериментальными исследованиями в области геотермальной энергетики.

За прошедшие годы институт сформировался в научную организацию, в которой трудится около 100 работников. Наличие высококвалифицированного научного (21 доктор наук и 26 кандидатов наук из 50 научных сотрудников) и инженерно-технического персонала позволяет институту успешно решать на современном уровне фундаментальные и практические задачи геотермальной энергетики, механики, теплофизики, прикладной математики, геофизики, химической технологии минерализованных и пресных подземных вод.

С 2010г. Школа молодых ученых носит имя Эвальда Эмильевича Шпильрайна (1926-2009гг.) – члена-корреспондента РАН, в разные годы руководителя Отделения энергетики и энерготехнологии Института высоких температур РАН, профессора, руководителя кафедры Московского энергетического института, председателя Научного совета РАН по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, председателя Национального комитета РАН по теплофизическим свойствам веществ, доктора технических наук, профессора Московского физико-технического института, заслуженного деятеля науки РФ.

Основными направлениями работы V Школы 11-12 октября 2012г. станут освещение, анализ современного состояния и прогноз перспективных направлений в разработке научных технологий освоения ВИЭ в нашей стране и за рубежом, прозвучавшие в обзорных докладах и лекциях ведущих ученых и специалистов и выступления молодых ученых, аспирантов, студентов по наиболее актуальным проблемам теории и прикладным аспектам, прежде всего геотермальной энергии в сочетании с солнечной энергией, энергией ветра, места ВИЭ в топливно-энергетическом балансе страны и ее регионов.

Сборник материалов включает более 60 обзорных лекций и докладов ведущих специалистов, выступлений молодых ученых, работающих в области ВИЭ. Заявки на участие в работе V Школы поступили от ученых и специалистов ведущих научных и образовательных центров России, в том числе из Москвы, Петропавловска-Камчатского, Астрахани и др. Также поступили доклады из иностранных государств - Германии и США.

В Сборник также включены воспоминания о видных организаторах науки и образования в республике в сфере возобновляемой энергетики – члене-корреспонденте РАН Эвальде Эмильевиче Шпильрайне и профессоре Абдулле Магомедовиче Амадзиеве, с именами которых связана история организации и становления научной школы «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» в г.Махачкале.

# ЭВАЛЬД ЭМИЛЬЕВИЧ ШПИЛЬРАЙН

## воспоминания учеников*

### ОДИН ИЗ ОСНОВАТЕЛЕЙ ИВТ-АН СССР – Э.Э. ШПИЛЬРАЙН

Каган Д.Н.

Эвальд Эмильевич родился 9 июля 1926г. в г.Ростов-на-Дону. В 1941–1943гг. работал электромонтером на химическом заводе в г.Барнаул Алтайского края. В 1943–1944гг. – студент Алтайского машиностроительного института. С 1944 г. по 1947г. – студент МЭИ. В 1951г. закончил аспирантуру МЭИ, защитил кандидатскую диссертацию. 1951–1953гг. – старший инженер, затем руководитель группы Проектного отдела треста «Энергоцветмет». 1953–1956гг. – научный редактор журнала «Теплоэнергетика». 1956–1961гг. – ассистент, доцент МЭИ. В 1964г. защитил докторскую диссертацию, в 1964–1986гг. – профессор кафедры инженерной теплофизики МЭИ. 1991–2002гг. – профессор МФТИ; в 1997г. Эвальд Эмильевич был избран членом-корреспондентом РАН.

С момента создания ИВТ-АН Эвальд Эмильевич руководил отделом, а затем отделением Института высоких температур РАН.

Эвальдом Эмильевичем Шпильрайном и руководимым им коллективом выполнена разработка научных основ целого ряда энергохимических технологий и технологических процессов, созданы аппараты и устройства для топливно-энергетического комплекса.

Результатом его работ явились теоретические и экспериментальные исследования экологически чистых энергосберегающих технологий на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии – солнечных теплоиспользующих систем и установок, тепловых насосов, систем, использующих низкопотенциальные источники тепла. В ряде районов страны впервые созданы экспериментальные дома с солнечным отоплением и горячим водоснабжением, на которых получены полные тепловые балансы и разработаны рекомендации для их типового проектирования. Им разработаны проекты повышения эффективности систем энергоснабжения ряда крупных промышленных предприятий.

Э.Э. Шпильрайном осуществлены фундаментальные исследования в области водородной энергетики, разработана термодинамическая теория термохимических циклов получения водорода. Э.Э. Шпильрайн является автором первой и единственной в стране монографией по водородной энергетике. Им были проведены исследования в обоснование разработки и создана серия глубинных и наземных теплогенераторов для закачки горячих теплоносителей в нефтяные пласты с целью повышения нефтеотдачи, создана термодинамическая теория

* *перепечатываются из источника*: МЭИ: история, люди, годы: сборник воспоминаний. В 3 томах / под общ. ред. С.В. Серебрянникова. М.: Издательский дом МЭИ. 2010. (Серия "Выдающиеся деятели МЭИ")

конденсирующего инжектора.

Под руководством Э.Э. Шпильрайна создан и исследован новый класс теплоносителей и рабочих тел – с регулируемыми свойствами на базе многокомпонентных жидкометаллических систем для работы в области мощных тепловых и нейтронных потоков в энергетических установках нового поколения с реакторами на быстрых нейтронах. Э.Э. Шпильрайном разработана теория, на основе которой впервые с единых позиций было получено внутренне согласованное замкнутое термодинамическое описание жидкой и паровой фаз данных систем, а также бинарных диссоциирующих теплоносителей на основе органических компонентов. Результаты этих работ Э.Э. Шпильрайна опубликованы в ряде его монографий и вошли в отечественные и зарубежные фундаментальные справочники и учебники.

Эвальд Эмильевич Шпильрайн совместно с академиком Александром Ефимовичем Шейндлиным в 1996г. создали научную школу, которая уже не в первый раз в 2010г. признана победителем конкурса для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

Э.Э. Шпильрайн – автор более 300 печатных работ, в том числе 12 книг. Под его руководством защищено 34 кандидатские диссертации. 8 его учеников защитили докторские диссертации.

Награждение Э.Э. Шпильрайна орденом «За заслуги перед отечеством» IV степени. 2005 г. Кремль

Э.Э. Шпильрайн возглавлял Научный совет РАН «Возобновляемые источники энергии» и Национальный комитет РАН по теплофизическим свойствам веществ, являлся членом Научных советов РАИ «Теплофизика и теплоэнергетика» и по проблеме эффективного использования топлив, руководителем направления Программы фундаментальных исследований Президиума РАН. Э.Э. Шпильрайн был заместителем главного редактора журнала «Теплофизика высоких температур»», членом редколлегии журналов «Теплоэнергетика» и «Энергия: экономика, техника, экология».

Э.Э. Шпильрайн был награжден орденом Трудового Красного Знамени, двумя орденами «Знак Почета», медалями. В 1997 Г. ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», и 2002 г. он был награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени. Э.Э. Шпильрайн являлся лауреатом премии РАН им. И.И. Ползунова, в феврале 2006 г. ему был вручен Почетный диплом Министерства образования и науки РФ за выдающийся вклад в развитие водородной энергетики.

# УРОКИ Э.Э. ШПИЛЬРАИНА

Малышенко С.П.

Это не биографические заметки. Это моя попытка отдать дань уважения и благодарности Учителю — профессору МЭИ, члену- корреспонденту РАН Эвальду Эмильевичу Шпильрайну.

Первые мои, ещё студенческие, впечатления о доценте кафедры инженерной теплофизики МЭИ Эвальде Эмильевиче Шпильрайне, читавшем нам курс термодинамики растворов — блестящий лектор и строгий экзаменатор. Получить у него оценку «отлично» на экзамене непросто — нужно не только знать материал, но и уметь применить это знание к анализу более или менее сложных, но всегда нетривиальных задач. У меня тогда не получилось.

*Нас учил учитель строго:*
*Термостатика — от Бога.*
*Хоть законов в ней немного,*
*Лишь на первый взгляд проста.*
*Всяк процесс, любая штука*
*Объясняются наукой.*
*А в основах той науки*
*Три Начала — три кита.*
*Изучить науку — мало,*
*Надо чувствовать Начала*
*И учесть в потенциалах*
*Все воздействия извне.*
*Вот тогда не ошибешься.*
*В вычисленьях не проврешься,*
*Даст Бог — на эффект нарвёшься.*
*Будешь грамотен вполне.*

Это из моего шутливого поздравления Эвальду Эмильевичу к его 80-летию в 2006г. К этому времени нашему знакомству было около 40 лет, а научному сотрудничеству – более 30.

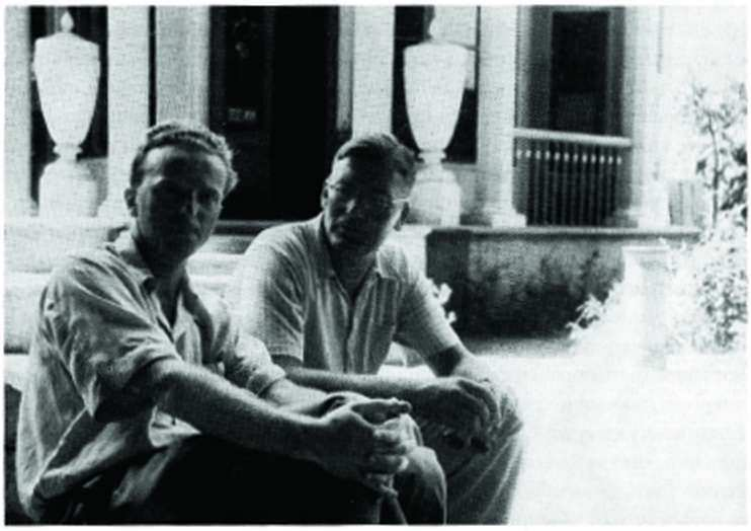
Эвальд Эмильевич Шпильрайн родился 9 июля 1926 г. в Ростове-на-Дону в семье Эмиля Николаевича Шпильрейна — декана факультета биологии и зоологии Ростовского университета. В начале прошлого века ростовский клан Шпильрейном принадлежал к наиболее образованным и уважаемым гражданам города. В семье деда — Николая Аркадьевича Шпильрейна — говорили на нескольких языках, его дети — Сабина, Исаак, Ян (Яков) и Эмиль — в 20—30-е годы — известные ученые. Исаак — профессор первого Московского университета, Яков — профессор Московского энергетического института, член-корреспондент АН СССР, Эмиль — профессор экспериментальной биологии Ростовского университета, Сабина — всемирно известный ученый в области психоанализа. Судьба их сложилась трагически. В 1935— 1937 гг. Исаак, Яков и Эмиль были арестованы НКВД и расстреляны в 1937—1938 гг. (впоследствии реабилитированы). В 1938 г. от горя умер Николай Аркадьевич. Сабина Шпильрейн с двумя дочерьми была расстреляна в 1942 г. в Ростов-на-Дону немецкими оккупантами вместе с тысячами евреев и пленных во время массовых расстрелов в Змиевской балке. Эвальд Эмильевич никогда не рассказывал мне об этом, но в некоторых вышедших в последние годы книгах об этом можно прочитать.

В 1944 г. переводом из Алтайского машиностроительного института

Эвальд Эмильевич был зачислен на третий курс энергомашиностроительного факультета МЭИ. Здесь ему повезло — талантливого студента заметил и привлек к научной работе Владимир Алексеевич Кириллин, в то время доцент кафедры теоретических основ теплотехники (ТОТ) МЭИ. Это определило весь дальнейший путь Э.Э. Шпильрайна в науке.

*... Победы прогремел салют.*
*Ты взялся вновь за мирный труд,*
*Студентов пестуешь без скуки.*
*Я был тогда один из них,*
*И всем, чего потом достиг, —*
*Твоей обязан я науке!*

Это из стихотворения Э.Э. Шпильрайна «К 73-летию В.А. Кириллина». И это не поэтический вымысел, а правда. Термодинамика навсегда стала его любимой наукой, и знал он ее, и умел применять к анализу многих явлений, как никто другой.



Отличительная черта работ Э.Э. Шпильрайна в области термодинамики – их строгость и краткость, сопряженные с ясным изложением. Хороший пример – его блестящая статья «О предельных КПД тепловых установок», опубликованная в Известиях АН СССР «Энергетика и транспорт» № 4 да 1982 г. на 7 страницах. Работа с теми же выводами, в тот же период была независимо опубликована другим высококлассным ученым, но для этого ему понадобилось около 100 страниц текста с множеством формул. Еще пример из моего собственного опыта. В одной из работ по термодинамическому анализу эффективности водородного перегрева пара мной путем длинных вычислений была получена формула для КПД использования водорода, из которой следовало, что при количестве сжигаемого водорода, стремящемся к нулю, КПД его использования стремится к КПД цикла Карно. Вначале Эвальд Эмильевич усомнился в правильности моих вычислении, но через пару дней показал мне в две строчки, как этот вывод получается из общих термодинамических соотношений. Умение тривиализовать (по выражению Л.Д. Ландау) результат исследований, сделать его очевидным и понятым — характерная черта Э.Э. Шпильрайна как ученого и преподавателя. Это редкое качество. Его лекции в МЭИ, а затем в МФТИ пользовались особой популярностью у студентов, в том числе и в связи с этим. Лекции Эвальда Эмильевича, его научные доклады на семинарах и конференциях и выступления на других публичных мероприятиях всегда отличались глубиной понимания проблемы, ясностью и краткостью. И ещё – хорошим литературным языком. Это относится также и к международным

совещаниям – Э.Э. Шпильрайн свободно владел немецким и английским языками.

*Отзывы, статьи, записки*
*Сам он пишет и сейчас*
*По-немецки, по-английски*
*Отзыв — день, записка — час.*
*Речь его сродни симфоний*
*Краток слог и ясен стиль.*
*И на нашем ровном фоне*
*Он, конечно, Чистый Шпиль.*

Это из того же моего шутливого поздравления. Статей в списке его публикаций – более 300, книг – 12. Но это только вершина айсберга. Специалисты знали – если ты сделал новую работу, показал её Шпильрайну, и он не увидел в ней ошибок или неясностей, значит все верно и работу можно публиковать. Многие, в том числе и я, этим пользовались, и Эвальд Эмильевич редко кому отказывал в консультации. Большое количество материалов, отчетов, предложений, поступивших в Академию наук, направлялось на экспертизу в ИВТ-АН Э.Э. Шпильрайну, и он всегда давал на них аргументированные заключения, т.е. разбирался в материалах по-существу. Эвальд Эмильевич был ученым широкого профиля. Им и руководимым им коллективом выполнены циклы первоклассных исследований теплофизических свойств веществ, энергохимических технологий переработки природных топлив, новых процессов производства и преобразования энергии, в том числе на основе возобновляемых энергоисточников, общих проблем энергетики и энерготехнологии. И по всем этим направлениям огромное количество консультаций, экспертиз, отзывов, проектов и т.д., которые, конечно, не публиковались, но вносили существенный вклад в развитие исследований и разработок новых энергетических технологий в нашей стране.

Я поступил на работу в ИВТ-АН в 1968г. в отдел Эвальда Эмильевича после окончания аспирантуры МЭИ, но первая наша совместная работа с ним была опубликована только через 10 лет, когда я работал уже в отделе М.А. Стыриковича и начал заниматься проблемами водородной энергетики. До этого мои работы по критическим явлениям, уравнению состояния водорода и другие соответствовали тематике отдела Э.Э. Шпильрайна, но не входили в круг его прямых интересов. И, естественно, он не принимал в них участия в качестве автора, хотя и был в курсе их результатов. Это в стиле работы Э.Э. Шпильрайна как руководителя научного коллектива. Эвальд Эмильевич был тем, кого сегодня называют трудоголиками. Режим его работы – непрерывный, почти круглосуточный. При колоссальном объеме научной и научно-организационной работы, которую он выполнял сам, он допускал, чтобы часть сотрудников его отдела работала в смежных направлениях «на длинном поводке», но, конечно, в нужный момент, заметив наличие у них проблем, с которыми им трудно справиться, включался и их работу. На мой взгляд, именно в связи с таким стилем руководства отдел Э.Э. Шпильрайна был одним из лучших в ИВТ-АН и оказался способен к быстрой смене тематики при возникновении новых актуальных научных задач.

Во второй половине 70-х годов в Академии наук была создана Комиссия по водородной энергетике, которую возглавили М.А. Стырикович (председатель), В.А. Легасов и Э.Э. Шпильрайн (заместители председателя). Мне поручили быть ученым секретарем этой комиссии. Так началась работа по новой проблеме «Водородная энергетика и технология» в нашей стране. Эвальд Эмильевич внес большой вклад в развитие исследований и разработок в этой области. На начальном этапе этих работ он выполнил изящный анализ термодинамики

термохимических циклов разложения воды за счет тепловой энергии, сформулировал условия их осуществимости и дал оценку их возможной предельной эффективности. Дальнейшие исследования Эвальда Эмильевича с соавторами связаны с созданием энергоэффективных технологий получения водорода и синтетических топлив на его основе из угля и нетрадиционного сырья и использования водородных технологий в энергетике. В этой области мне довелось работать с Эвальдом Эмильевичем как с соавтором нескольких наших совместных статей и книги «Введение в водородную энергетику». Это дало мне очень много и прежде всего — хорошую школу термодинамического и технико-экономического подхода к анализу и разработкам новых энергетических технологий. И еще — в процессе работы над совместными публикациями и книгой я в какой-то степени освоил шпильрайновский стиль научных и научно-популярных публикаций. Конечно, не полностью, а как получилось. Это мне особенно помогло в работе в качестве заместителя главного редактора научно-популярного журнала Президиума РАН«Энергия: экономика, техника, экология». Основатель и первый главный редактор журнала академик В.А. Кириллин считал популяризацию науки и техники и распространение знаний одной из важнейших задач Академии наук и предъявлял весьма высокие требования к качеству публикаций. На первых порах мне было непросто соответствовать стилю работы главного редактора, и здесь была неоценимой помощь Эвальда Эмильевича как действующею члена редколлегии. Он просматривал рукопись журнала целиком, прекрасно чувствовал специфику научно-популярных изданий, и его замечания, всегда корректные и по делу, были для меня замечательной шкалой. Но не только для меня, а и для многих молодых журналистов, пришедших тогда в журнал. Сегодня некоторые из них — ведущие научные обозреватели в массовых изданиях. Школа Шпильрайна — это не только его ученики, защитившие под его руководством более 40 кандидатских и докторских диссертаций, но и множество специалистов из разных регионов страны, которые в результате совместных работ восприняли его манеру и подходы к решению научно-технических задач, а также научные журналисты и редакторы научных и научно-популярных изданий, которым посчастливилось с ним работать.

Эвальд Эмильевич обладал великолепным и нетривиальным чувством юмора, прекрасно знал литературу и историю, знал множество «дворовых» песен, мог написать хорошие стихи «на случай», и иногда, но не часто, эти его таланты проявлялись в неформальной обстановке среди близких учеников. Он был весьма скромным человеком. Уже когда он был серьезно болен, но все равно ходил па работу, его сотрудникам не сразу и с большим трудом удалось уговорить его использовать хотя бы иногда служебный автомобиль. А ведь расстояние от Измайлова до Ховрино немалое и общественный транспорт не столь уж комфортабелен.

Еще одно качество Эвальда Эмильевича не часто встречающееся сегодня – постоянное, не зависящее от конъюнктуры, уважительное и, я бы сказал, трепетное отношение к своим учителям – В.А. Кириллину и А.Е. Шейндлину. Он был их надежным сотрудником и товарищем при всех обстоятельствах, как говорится, «и в радости, и в горе». Это было еще одним хорошим примером для его учеников и сотрудников, который, как мне кажется, многие восприняли.

Эвальд Эмильевич ушел от нас 31 марта 2009 г. Заслуга Э.Э. Шпильрайна в развитии отечественной науки были отмечены его избранием членом-корреспондентом РАН, многими государственными наградами. Это важно, но еще важнее то, что останется надолго – его книги и ученики, воспринявшие его науку.

# УРОКИ Э.Э. ШПИЛЬРАЙНА

Попель О.С.

С гордостью могу сказать, что считаю Эвальда Эмильевича Шпильрайна своим учителем и наставником, поскольку с большим удовольствием постигал теплофизическую науку и слушал его блестящие лекции в институте, с радостью сдавал ему экзамены и получал зачеты, а затем почти 30 лет также не без удовольствия работал под его непосредственным руководством в Институте высоких температур РАН.

Считается, что ученый находит признание, если ему за свою жизнь удается выполнить хотя бы одну функцию: совершить открытие в науке (исследовать новые процессы и явления и предложить как их использовать в жизни на благо развития цивилизации), обеспечить передачу накопленных научных знаний новому поколению (подготовить учеников-преемников) или хотя бы проявить себя высококвалифицированным экспертом, обеспечивающим грамотную экспертизу результатов исследований и разработок других авторов с отбором и поддержкой перспективных направлений развития науки и технологии и отклонением ложных научно не обоснованных идей, ведущих лишь к неразумным затратам и потере времени.

Эвальд Эмильевич, по моему глубокому убеждению, гармонично сочетал в себе все эти три функции. Его исследования в области теплофизики, термодинамики, энергетики хорошо известны в России и за рубежом и нашли широкое признание. Я не встречал ни одного человека, ни в России, ни за границей, который, хотя бы один раз встретившись с Э.Э. Шпильрайном. не остался в восхищении от глубины и энциклопедической широты его знаний. Как эксперт Эвальд Эмильевич всеми считался абсолютным авторитетом, и получение от него положительного отзыва на тот или иной проект или научную публикацию воспринималось как благословление свыше. В то же время отрицательный отзыв, всегда ясно и четко обоснованный, исключительно логично и доброжелательно изложенный, редко вызывал желание опротестовать его или обратиться к другому эксперту даже у самых ярых «изобретателей». Преданность науке, абсолютная беспристрастность в оценке результатов своей деятельности и работы сотрудников, исключительная доброжелательность, сочетающаяся с нетерпимостью к глупости и невежеству («чушь собачья» — его любимое

выражение) — вот основные качества Эвальда Эмильевича, ставшего для многих его учеников примером в жизни и в работе.

Известно, что характер и личные качества человека проявляются не только на работе, но в большей мере вне нее, в частности, в командировках. Мне посчастливилось неоднократно выезжать с Эвальдом Эмильевичем во многие районы страны и многие зарубежные страны.

В России наиболее часто мы ездили в Дагестан, где создавался филиал нашего Института по возобновляемым источникам энергии. Одновременно Эвальд Эмильевич по поручению Президиума РАН и Отделения энергетики курировал работу ряда местных научных центров, прежде всего, Института проблем геотермии. Нетрудно представить себе обстановку, в которой мы оказывались в этом гостеприимном крае. Попасть на встречу и пообщаться с Эвальдом Эмильевичем стремились многие с разными вопросами и проблемами, в том числе и с «жалобами», с попытками заручиться рекомендациями, хотя большинство «ходоков» желали рассказать о результатах своей работы, посоветоваться по конкретным научным проблемам. Во время богатых застолий с обилием местного прекрасного коньяка и черной икры (к сожалению, последнее относится только к советскому времени) Эвальд Эмильевич всегда вел себя просто, непринужденно рассказывал анекдоты, запас которых казался неисчерпаемым, пел песни, читал стихи, но никогда не отклонялся от своих принципов объективности и беспристрастности, чем заслужил абсолютное уважение дагестанцев. Не случайно недавно принято решение о том, что регулярные конференции по энергетике, проводимые в Дагестане, с этого года будут носить имя Э.Э. Шпильрайна.

Из командировок за границу вспоминаются поездки в США и в Европу в рамках нашего тесного сотрудничества с рядом зарубежных научных центров, существенно поддержавших работы в институте в области возобновляемых источников энергии в «безденежный» для науки период начавшейся в стране «перестройки».

Особо вспоминается пребывание в Денвере, куда мы приехали на Всемирный конгресс по солнечной энергетике на следующий день после «путча» августа 1991 г. Мы оказались единственными представителями России на этом Конгрессе, и неудивительно, что в связи с происходившими в стране событиями оказались в центре внимания прессы и участников. Не могу не сказать, что известие о «путче» и для нас оказалось «сюрпризом» (события в стране развивались в период нашего длительного перелета). Однако начальное смятение быстро прошло и, прежде всего, у Эвальда Эмильевича. Мы на какое-то время укрылись от назойливых репортеров в номере гостиницы» перелистывая информационные программы телевидения. Безрезультатно пытались (по моему предложению) дозвониться в советское посольство и домой. Через пару часов Эвальд Эмильевич сказал: «Пойдем, не будем же мы сидеть все время в номере», — и принял на себя атаки журналистов, с достоинством излагая свою достаточно объективную позицию о положении в стране и сложившейся ситуации. Я с гордостью следил за своим шефом, который не юлил и не оправдывался, а четко оценивал положение дел и уверенно заявил, что «путч не пройдет!». Следует отметить, что, как нам потом рассказывали американцы, нескольким сотням россиян, находившимся в США в период путча, были предоставлены политическое убежище и виды на жительство.

Особым уважением и почетом Эвальд Эмильевич пользовался у немцев. Его эрудиция, глубокое понимание научных проблем в относительно новой для нас области создания солнечных электростанций, и особенно прекрасное знание

немецкого языка, причем в классическом варианте, вызывало восторг у наших партеров. В неформальной обстановке Эвальд Эмильевич читал стихи на немецком языке, был всегда в центре немецких и многонациональных компаний, собиравшихся в период проведения семинаров и рабочих групп. Эвальд Эмильевич неоднократно правил и многие документы по результатам встреч, написанные организаторами на английском языке, вызывая восхищение иностранцев его глубоким знанием и английского языка.

Работать с Эвальдом Эмильевичем было не просто. Его требовательность во всем, нетерпение к халтуре, жесткая критика нечеткого наложения мыслей, недостаточно хорошо написанных научных отчетов и статей, заставляли постоянно работать над собой, чтобы соответствовать «Шпилю». Надо сказать, что критика Эвальда Эмильевича всегда была конструктивной и обоснованной. И на выходе из его кабинета оставалось чувство «глубокого удовлетворения»: было ясно в каком направлении надо действовать дальше. Я благодарен Эвальду Эмильевичу за пройденную школу. Будучи непосредственным начальником, он никогда не ограничивал свободы действий подчиненных, всегда поддерживал разумные инициативы, поощрял самостоятельный выход во внешние сферы, чем способствовал накоплению опыта, проявлению самостоятельности, другими словами, подготовке своей смены.

Вызывает глубокое уважение его скромность, неприхотливость в быту, исключительная работоспособность и способность постоянного совершенствования в овладении новыми знаниями. Будучи членом-корреспондентом РАН, директором Отделения крупного института он практически не пользовался услугами секретаря. С появлением компьютерной офисной техники он сам стал пользоваться ею, ведя электронную переписку, готовя доклады и презентации, практически не требующие дополнительного «причесывания» и оформления. Персональным автомобилем он стал пользоваться лишь в последние годы, и уже, будучи в недостаточно хорошем физическом состоянии, при отсутствии машины, приезжал общественным транспортом на работу не позже 9 часов утра, как правило, оказываясь первым в отделении. При этом значительных усилий требовало уговорить Эвальда Эмильевича купить новый костюм, сменить многолетнюю синюю курточку на новую. Он мог много лет носить уже заштопанный свитер, считая, что внешний вид не самое главное в жизни. Увлеченность и преданность работе оставались присущими Эвальду Эмильевичу до последних часов его жизни. За день до кончины, когда и он, и все его окружающие уже понимали, что вот-вот произойдет неизбежное, основное содержание наших разговоров в больнице состояло и обсуждении дел на работе. Он уже не мог самостоятельно вставать с кровати. Но рядом с ним лежали очки, папки с бумагами, он уже сильно дрожащей рукой пытался рисовать схемы энергоустановок, слабым голосом высказывал соображения о том, как в Якутии использовать местный уголь для генерации электроэнергии и автономного энергоснабжения потребителей...

Таким я его и запомнил. И часто вспоминаю этот последний день, когда мы и Наука потеряли неординарного человека, настоящего Ученого, Учителя и Эксперта.

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

## ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Алхасов А.Б.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru*

Для эффективного освоения геотермальных ресурсов предлагается строить геотермальные электростанции (ГеоЭС) с использованием простаивающих нефтяных и газовых скважин. Подсчитаны мощности и основные характеристики ГеоЭС на перспективных площадях.

Истощение запасов традиционных видов топлива и экологические последствия их использования обусловили значительный спрос на технологии эффективного освоения ВИЭ, где во многих странах достигнуты значительные успехи. Энергосберегающие технологии на основе геотермальной энергии являются важной составляющей в освоении возобновляющих энергетических ресурсов.

Прямое использование геотермальных ресурсов на теплоснабжение в большинстве случаев связано с сезонной эксплуатацией скважин, добывающих термальную воду, что приводит к снижению теплоотбора на месторождениях и ухудшению экономических показателей геотермального производства. При освоении геотермальной энергии необходимо стремится к максимально эффективной разработке термоводозаборов, чего можно достичь при постоянной эксплуатации скважин на дебитах соответствующих эксплуатационным запасам и срабатывании температуры отработанной воды до возможно низкого значения.

Наиболее перспективным использованием геотермальной энергии является преобразование ее в электрическую энергию, где достигается круглогодичная эксплуатация геотермальных скважин. Относительная независимость от потребителей, экономичность умеренных мощностей и особая ценность электрической энергии обусловили приоритетное развитие ГеоЭС как генерального направления в освоении геотермальных ресурсов. Во многих странах достигнуты значительные успехи в этой области.

Развитие геотермальной электроэнергетики мира характеризуется следующими данными. За 70 лет с 1940 по 2010 г. установленная мощность геотермальных электростанций увеличилась в 82 раза. К началу 2011 г. ГеоЭС работают в 24 странах мира, суммарная их мощность выросла до 10900 МВт. Геотермальная электроэнергетика по установленной мощности является значительной частью возобновляемой энергетики, развивается умеренными темпами 3 – 5 % в год и является одной из самых экономически эффективных технологий [1].

Существующие ГеоЭС в основном используют высокотемпературный природный пар, добываемый на месторождениях в районах современного

вулканизма. Ресурсы парогидротерм ограничены и в ближайшем будущем будут полностью освоены.

В России на Мутновском геотермальном месторождении успешно эксплуатируются 5 энергоблоков на природном паре общей мощностью 83 МВт и имеются перспективы для дальнейшего наращивания мощности.

Экономический потенциал ВИЭ России составляет 270 млн. т у.т./год, из которых на геотермальную энергию приходится 115 млн. т у.т. /год. Значительная часть этого потенциала сосредоточена в пластовых водонапорных системах осадочных бассейнов. Температура термальных вод в таких резервуарах варьирует от 30 до 200 $^{o}$C в зависимости от глубины погружения водоносных горизонтов. Гидрогеотермальные ресурсы температурой 100 $^{o}$C и выше пригодны для производства электроэнергии. Характерными особенностями таких ресурсов является высокая минерализация, повышенное газосодержание, склонность к солеотложению при изменении термобарических условий и высокая коррозионная активность к конструкционным материалам. Электроэнергия, с использованием таких ресурсов, вырабатывается в бинарных ГеоЭС.

Северокавказский регион является одним из перспективных для освоения геотермальной энергии. Гидрогеотермальные ресурсы только одного Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ) оцениваются до 10000 МВт тепловой и 1000 МВт электрической мощности. Для их масштабного освоения необходимо строить высокодебитные скважины большого диаметра с привлечением огромных капвложений, что не реально на современном этапе экономического развития региона. В ближайшей перспективе наиболее оптимальным является освоение части этих ресурсов с использованием существующих простаивающих скважин на выработанных газонефтяных месторождениях. Только в Северном Дагестане имеется более 1000 простаивающих скважин, пробуренных на глубины от 2000 до 5000 м. Большинство из этих скважин могут быть успешно использованы для добычи термальной воды в системах по выработке электроэнергии в бинарных ГеоЭС.

Затраты на строительство геотермальных скважин составляют значительную часть на геотермальную энергетическую систему, капвложения в ГЦС из двух скважин могут достигать до 90 % в общих затратах. Реконструкция простаивающих скважин для добычи термальной воды позволит значительно сократить капвложения на строительство геотермальных энергоустановок.

На рис.1 представлена схема бинарной ГеоЭС с использованием простаивающих газонефтяных скважин, где первичный теплоноситель в контуре геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) используется для нагрева и испарения низкокипящего рабочего агента, циркулирующего во вторичном контуре паросиловой установки (ПСУ).

Выбор рабочего агента является определяющим в эффективном преобразовании геотермального тепла в электроэнергию в бинарных ГеоЭС. Выполнен термодинамический анализ различных рабочих агентов, в табл.1 приведены значения удельной мощности энергоустановки, массового расхода и давления испарения наиболее перспективных агентов – изобутана и дифторхлорэтана (R142в) [1,2]. Каждый из этих агентов имеют свои преимущества и недостатки. Как видно из табличных данных при низких температурах термальной воды удельная мощность, вырабатываемая с R 142в выше, а при более высоких температурах более предпочтителен изобутан. Дальнейшее сравнение этих агентов с учетом дополнительных факторов горит в пользу изобутана. Рабочий агент R142в является галогенизированным

производным этана и при взаимодействии с водой образует галогенные кислоты, которые в конечном итоге приводят к коррозии конструкционных материалов. Кроме того, теплофизические свойства изобутана лучше чем у R142в (вязкость изобутана в 1,5 раза ниже, а теплопроводность в 1,2 раза выше). Необходимо отметить, что изобутан совместим с маслами и не вызывает коррозии оборудования энергоустановки. Из анализа существующего опыта также следует, что в бинарных ГеоЭС наибольшее распространение получил изобутан. Выбор изобутана, кроме перечисленных выше преимуществ, обусловлен его относительно невысокой стоимостью и экологической безвредностью (потенциал разрушения озонового слоя ODP = 0, а потенциал глобального потепления GWP = 3).

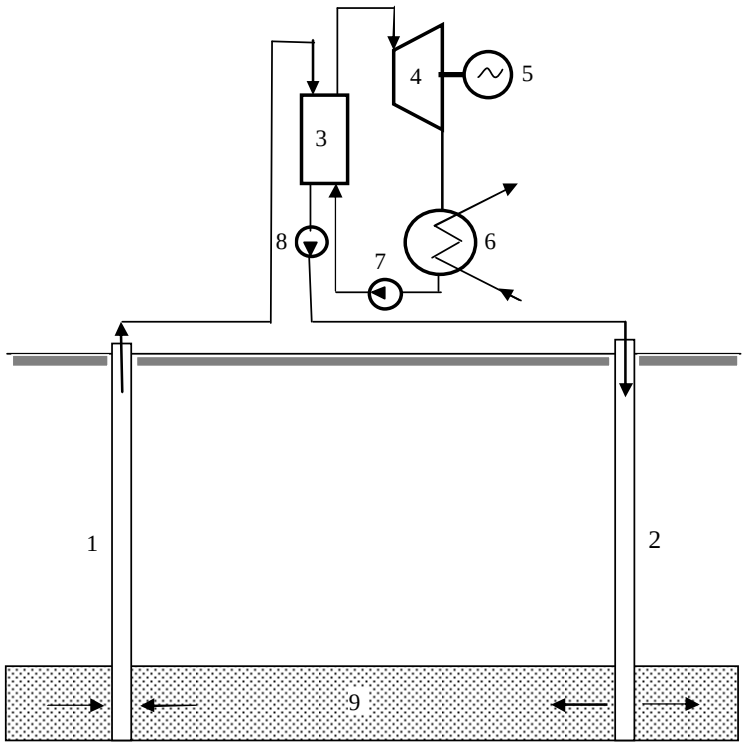



Рис.1. Схема бинарной ГеоЭС (1, 2 – добычная и нагнетательная скважины; 3 – блок теплообменников для нагрева, испарения и перегрева низкокипящего рабочего агента; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – конденсатор; 7 – циркуляционный насос второго контура; 8 – нагнетательный насос контура ГЦС; 9 – эксплуатируемый термоводоносный горизонт)

Главной целью при создании бинарной ГеоЭС является получение максимальной полезной мощности при оптимальных экономических показателях, которая достигается оптимизацией конструктивных и режимных параметров первичного (ГЦС) и вторичного (ПСУ) контуров [1].

Как правило, нефтяные и газовые скважины имеют малые диаметры эксплуатационных колонн (0,104 – 0, 124 м), использование таких скважин для добычи термальной воды резко снижает оптимальный дебит, циркулирующий в контуре ГЦС и соответственно полезную мощность бинарной ГеоЭС.

В ВПАБ имеется ряд перспективных площадей с простаивающими скважинами, которых можно перевести на добычу термальной воды [4]. Для этих площадей проведены оценочные расчеты по строительству бинарных ГеоЭС. Методика и расчетные зависимости по определению оптимальных характеристик бинарной ГеоЭС в данной работе не приводятся, они подробно рассмотрены в предыдущих работах [1-3].

Таблица 1. Оптимальные значения удельной мощности $N_э$ (кВт·с/кг) энергоустановки, массового расхода m (кг/с) и давления испарения $P_и$ (МПа) низкокипящего рабочего агента в зависимости от температуры $T_т$ термальной воды

| $T_т$, °С | Изобутан | | | R142в | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_э$, кВт·с/кг | m, кг/с | $P_и$, МПа | $N_э$, кВт | m, кг/с | $P_и$, МПа |
| 100 | 10,4 | 0,4 | 0,9 | 11,0 | 0,66 | 0,93 |
| 110 | 14,8 | 0,49 | 1,0 | 15,2 | 0,81 | 1,025 |
| 120 | 19,6 | 0,54 | 1,2 | 20,1 | 0,88 | 1,26 |
| 130 | 25,5 | 0,65 | 1,4 | 25,9 | 1,13 | 1,26 |
| 140 | 32,2 | 0,72 | 1,6 | 32,7 | 1,2 | 1,57 |
| 150 | 40,1 | 0,78 | 2,0 | 40,4 | 1,4 | 1,705 |
| 160 | 50,4 | 0,9 | 2,4 | 49,1 | 1,5 | 2,13 |
| 170 | 65,8 | 1,07 | 3,2 | 59,5 | 1,68 | 2,58 |
| 180 | 76,6 | 1,25 | 3,4 | 71,9 | 1,98 | 3,105 |

В оптимизационных оценочных расчетах приняты следующие данные: внутренний диаметр эксплуатационной колонны скважины и наземных труб – 0,122 м; мощность эксплуатируемого пласта – 50 м; пористость пласта – 15 %, проницаемость пласта - $1 \cdot 10^{-12}$ м$^2$. Расчеты проведены для ГЦС, состоящей из одной добычной и одной нагнетательной скважин (табл.2). Существует оптимальный дебит ГЦС соответствующий максимальной полезной мощности ГеоЭС. Дальнейшее увеличение дебита первичного теплоносителя в контуре ГЦС приводит к увеличению общей мощности энергетической системы при одновременном снижении полезной мощности, так как резко возрастают затраты энергии на циркуляцию теплоносителя. В зависимости от температуры термальной воды полезная мощность ГеоЭС с ГЦС из двух скважин составляет 365 – 2000 кВт. Использование всего фонда простаивающих скважин позволит получить общую полезную мощность ГеоЭС до 300 МВт.

Сравним энергетические характеристики при существующих скважинах и при скважинах с оптимальными диаметрами для одного из площадей. На площади Кумухская при диаметрах нефтяных скважин 0, 122 м максимальная полезная мощность составляет 1310 кВт при циркуляционном дебите 37 кг/с и расстоянии между скважинами 1060 м (табл.2). Из условия минимума удельных капитальных затрат оптимальными для данной площади являются скважины диаметром 0,298 м при дебите ГЦС 260 кг/с, полезной мощности ГеоЭС 8850 кВт и расстоянии между скважинами 2810 м. Увеличение диаметров скважин до оптимального значения приводит к многократному увеличению циркуляционного дебита и полезной мощности. Из полученных данных следует, что для получения больших мощностей и улучшения экономических показателей ГеоЭС необходимо создание ГЦС с высокопроизводительными скважинами увеличенного диаметра.

В пределах ВПАБ имеются значительные ресурсы среднепотенциальных термальных вод (80…100 °С), которые используются крайне неэффективно. На геотермальных месторождениях скважины, добывающие такие воды, эксплуатируются только в холодное время года для отопления различных объектов. В табл. 3 приведены технологические параметры ГеоЭС, рассчитанные для гидрогеолого-геотермических условий Тернаирского геотермального месторождения, расположенного на окраине г. Махачкалы, из которых следует о неэффективности использования среднепотенциальных термальных вод для выработки электроэнергии в ГеоЭС с обратной закачкой. С увеличением расхода в ГЦС мощность нагнетательной насосной станции растет быстрее мощности

Таблица 2. Основные параметры ГеоЭС с использованием скважин на выработанных нефтяных и газовых месторождениях

| Наименование месторождения | Глубина залегания эксплуатационного горизонта, м | Температура воды на устье скважины, °С | Удельная мощность энергоустановки, кВт·с/кг | Оптимальный дебит ГЦС из двух скважин, кг/с | Расстояние между скважинами в ГЦС, м | Общая мощность ГеоЭС с ГЦС из двух скважин, кВт | Полезная мощность ГеоЭС с ГЦС из двух скважин, кВт | Кол-во скважин на месторождении (число ГЦС) | Общая полезная мощность ГеоЭС, кВт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Русский Хутор | 3400 | 130 | 25,5 | 29 | 932 | 740 | 528 | 10 (5) | 2640 |
| Южносухокумск + Мартовское | 3500 | 135 | 29,2 | 31 | 965 | 905 | 638 | 10 (5) | 3190 |
| Сухокумское + В. Сухокумское | 3600 | 140 | 32,2 | 32 | 981 | 1030 | 730 | 10 (5) | 3650 |
| Равнинное + Перекрестное | 4300 | 150 | 40,1 | 33 | 999 | 1323 | 950 | 10 (5) | 4750 |
| Дахадаевское + Солончаковое | 4400 | 160 | 50,4 | 37 | 1060 | 1865 | 1310 | 32 (16) | 20960 |
| Юбилейное +Кумухское | 4400 | 160 | 50,4 | 37 | 1060 | 1865 | 1310 | 32 (16) | 20960 |
| Степное + Восточно-Степное | 3600 | 150 | 40,1 | 35 | 1029 | 1404 | 1004 | 80 (40) | 40160 |
| Озерное + Бешкольское | 4500 | 165 | 58,1 | 39 | 1090 | 2266 | 1594 | 80 (40) | 63760 |
| Кочубейское + Тарумовское | 5500 | 175 | 71,2 | 39 | 1093 | 2777 | 1998 | 80 (40) | 79920 |
| Северо-Кочубей + Душетское | 5000 | 170 | 65,8 | 39 | 1091 | 2566 | 1840 | 40 (20) | 36800 |
| Майское + Капиевское | 3600 | 140 | 32,2 | 32 | 981 | 1030 | 730 | 40 (20) | 14600 |
| Махачкала-Таркинское | 3500 | 140 | 32,2 | 32 | 981 | 1030 | 736 | 8 (4) | 2944 |
| Ачису | 3200 | 120 | 19,6 | 26 | 881 | 510 | 365 | 8 (4) | 1460 |
| Бабаюрт | 3500 | 140 | 32,2 | 32 | 981 | 1030 | 736 | 10 (5) | 3680 |

ГеоЭС и с определенного небольшого расхода начинает превосходить мощность ГеоЭС. Из табличных данных видно, что в зависимости от начальной температуры термальной воды, максимальная полезная мощность бинарной ГеоЭС с контуром ГЦС составляет всего 39…163 кВт.

При малых расходах ГЦС работает в режиме самоциркуляционной систмы (СЦС). Естественная циркуляция воды происходит вследствие разности средней плотности воды в стволе нагнетательной и добычной скважин. В добычной скважине проявляется эффект термолифта, в нагнетательной скважине – термопресса [5]. В основе возникновения этих эффектов лежит термоупругое расширение жидкости и изменение ее плотности в зависимости от изменения средней температуры в стволе добычной и нагнетательной скважин по сравнению со средней температурой в простаивающей скважине. Показатели самоциркуляции возрастают с увеличением проницаемости эксплуатируемого пласта и ростом глубины его залегания.

Таблица 3. Технологические параметры ГеоЭС

| Дебит ГЦС, кг/с | Расстояние между скважинами, м | Давление нагнетания, МПа | Общая мощность ГеоЭС, кВт | Мощность нагнетатель-ного насоса, кВт | Полезная мощность ГеоЭС, кВт |
|---|---|---|---|---|---|
| Температура термальной воды $T_т$ = 80 $^oC$ | | | | | |
| 4 | 343 | Режим СЦС | 16,4 | 0 | 16,4 |
| 5 | 384 | 0,063 | 20,5 | 3,2 | 17,3 |
| 10 | 542 | 0,6 | 40,9 | 6,2 | 34,7 |
| **14** | **641** | **1,25** | **57,3** | **17,9** | **39,4** |
| 20 | 767 | 2,59 | 81,8 | 53,0 | 28,8 |
| 24 | 840 | 3,73 | 98,2 | 91,7 | 6,5 |
| 25 | 857 | 4,05 | 102,3 | 103, 6 | 0 |
| Температура термальной воды $T_т$ = 100 $^oC$ | | | | | |
| 7 | 455 | Режим СЦС | 72,6 | 0 | 72,6 |
| 8 | 487 | 0,087 | 83,0 | 0,7 | 82,3 |
| **23** | **826** | **3,18** | **238,5** | **75,5** | **163,0** |
| 35 | 1018 | 7,77 | 363,0 | 280,2 | 82,8 |
| 39 | 1075 | 9,73 | 404,4 | 391,4 | 13,0 |
| 40 | 1089 | 10,3 | 414,8 | 423,2 | 0 |

Для увеличения полезной мощности ГеоЭС необходимо снижать затраты энергии на закачку отработанного теплоносителя обратно в пласт. Этого можно достичь увеличением диаметров скважин в ГЦС и улучшением фильтрационных характеристик в призабойных зонах скважин.

Параметры ГеоЭС, соответствующие максимальной полезной мощности при различных диаметрах скважин ГЦС, приведены в табл.4. Рост диаметров скважин с 0,122 до 0,251 м приводит к увеличению полезной мощности более чем в 3-раза. Необходимо отметить, что с увеличением диаметров скважин увеличиваются и капитальные затраты на бурение, которые и так являются наиболее весомыми в общих затратах. В этих условиях, в зависимости от горно-проходческих условий места строительства скважин, возникает оптимизационная задача по определению оптимальных диаметров скважин, соответствующие минимуму затрат на единицу полезной мощности.

Эффективное освоение среднепотенциальных вод осуществимо в комбинированных геотермально-парогазовых энергоустановках (ГПЭ), имеющих преимущества и возобновляемых источников и ископаемых топлив [6]. В ГПЭ

(рис.2) выхлопные газы газотурбинной установки (ГТУ) используются для испарения и перегрева рабочего агента, циркулирующего в контуре ГеоЭС. Нагрев рабочего агента в ГеоЭС до температуры испарения осуществляется за счет термальной воды.

Таблица 4. Оптимальные параметры ГеоЭС

| № п/п | Параметр | Диаметры скважин ГЦС, м | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,122 | 0,129 | 0,150 | 0,198 | 0,251 |
| 1 | Дебит ГЦС, кг/с | 14 / 23 | 16 / 26 | 23 / 36 | 37 / 63 | 51 / 95 |
| 2 | Расстояние между скважинами, м | 641 / 826 | 686 / 878 | 823 / 1033 | 1043 / 1366 | 1225 / 1678 |
| 3 | Давление нагнетания, МПа | 1,25 / 3,18 | 1,3 / 3,2 | 1,49 / 3,27 | 1,52 / 3,51 | 1,6 / 3,8 |
| 4 | Общая мощность энергоустановки, кВт | 57,3 / 238,5 | 65,4 / 269,7 | 94,1 / 373,4 | 151,4 / 653,1 | 208,5 / 985,2 |
| 5 | Мощность нагнетательной станции, кВт | 17,9 / 75,5 | 21,3 / 85,7 | 35,1 / 121,4 | 57,6 / 228,1 | 83,5 / 372,2 |
| 6 | Максимальная полезная мощность энергоустановки, кВт | 39,4 / 163 | 44,1 / 184 | 59 / 252 | 93,8 / 425 | 125 / 613 |

Примечание: в числителе значения при температуре термальной воды $T_т$ = 80 °С, в знаменателе – при температуре термальной воды $T_т$ = 100 °С.

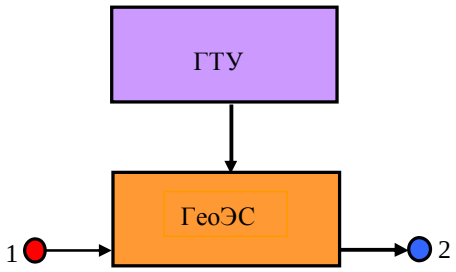



Рис.2. Геотермально-парогазовая энергетическая установка (1 – добычная скважина; 2 – нагнетательная скважина)

В табл.5 приведены параметры комбинированной ГПЭ и бинарной ГеоЭС, из которых следует о преимуществе ГПЭ.

Термальная вода с температурой 100 °С в технологической схеме ГПЭ позволяет нагреть 1,6 кг изобутана до температуры испарения $T_И$ = 89 °С, соответствующей давлению $P_И$ = 1,6 МПа. При этом температура отработанной воды $T_н$ = 40 °С. Расход термальной воды в контуре ГЦС, при мощности ПСУ в 1,5 МВт, составляет 21 кг/с.

Использование термальной воды с такой же температурой для нагрева и испарения в технологической схеме бинарной ГеоЭС позволит испарить 0,4 кг изобутана при оптимальной температуре испарения $T_И$ = 62 °С ($P_И$ = 1,6 МПа) и температуре отработанной воды $T_н$ = 64 °С. Массовый расход термальной воды для ГеоЭС мощностью 1,5 МВт составляет 144 кг/с. Для достижения такого расхода необходимо увеличивать количество скважин, что удорожает строительство собственно ГеоЭС. Снижение температуры отработанной термальной воды в комбинированной энергоустановке мощностью 1,5 МВт до 40 °С приводит к дополнительной экономии 2870 т у.т. / год.

Таблица 5. Параметры энергоустановок

| Наименование параметра | ГПЭ | ГеоЭС |
|---|---|---|
| Мощность блока ГТУ-4П, МВт | 4,3(э) 8,3(т) | - |
| Мощность блока на низкокипящем рабочем агенте, МВт | 1,5 | 1,5 |
| Расход термальной воды в контуре ГЦС, кг/с | 21 | 144 |
| Удельный расход рабочего агента (изобутан) | 1,6 | 0,4 |
| Расход рабочего агента (изобутан),кг/с | 33,6 | 57,6 |
| Температура термальной воды, $^oC$ | 100 | 100 |
| Температура отработанной воды, $^oC$ | 40 | 64 |
| Температура испарения рабочего агента, $^oC$ | 89 | 62 |
| Давление испарения рабочего агента, МПа | 1,6 | 0,9 |
| Мощность нагнетательной станции, МВт | 0,065 | 20,84 |
| Расстояние между скважинами, м | 790 | 2065 |

**Выводы:**

1. Одним из путей эффективного вовлечения геотермальных ресурсов в энергетический баланс региона является строительство бинарных ГеоЭС с использованием фонда простаивающих нефтяных и газовых скважин. Капитальные затраты на их реконструкцию для добычи термальной воды значительно ниже затрат на строительство новых скважин. В то же время использование простаивающих скважин не позволяет получать большие мощности на ГеоЭС из-за ограничения циркуляционного дебита за счет малых диаметров скважин. Строительство бинарных ГеоЭС на существующих скважинах повысит энергетическую безопасность и надежность энергоснабжения социально важных объектов, улучшит экологическую обстановку за счет вытеснения органических видов топлива, увеличит долю ВИЭ в энергобалансе региона.
2. Строительство геотермально-парогазовых установок позволит использовать среднепотенциальные термальные воды для выработки электроэнергии, добиться более глубокого срабатывания температуры термальной воды, что важно для улучшения экономических показателей геотермального производства и наиболее эффективно утилизировать тепло выхлопных газов ГТУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00371-а).

**Литература:**

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М., Физматлит, 2008. 376 с.
2. *Алхасов А.Б.* Использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии// Известия РАН. Энергетика, № 1, 2010. с.59 – 72.
3. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.* Электроэнергетическое освоение геотермальных ресурсов Северокавказского региона. Теплоэнергетика, № 2, 2011. с. 59 – 66.
4. *Алиев Р.М., Васильев В.А., Исрапилов М.И., Бадавов Г.Б.* Перспективы крупномасштабного использования геотермальной энергии в республике Дагестан// Известия РАН. Энергетика, № 5, 2010. с.125 – 131.
5. *Алишаев М.Г., Гайдаров Г.М., Каспаров С.А. и др.* Самоциркуляционная геотехнологическая система // Тр. Всесоюзной конф. «Народнохозяйственные и методические проблемы геотермии». Махачкала, 1984. с. 21 – 25.
6. *Алхасова Д.А., Алхасов Б.А.* Использование среднепотенциальных геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии // Материалы 2 Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2010. с. 233 – 238.

# ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КЛАСТЕРА ПО ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ НА ЮГЕ РОССИИ

Попель О.С., Фортов В.Е.

*ФГУБН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Москва, Россия; 125412, ул. Ижорская 13, стр.2; e-mail: O_Popel@oivtran.ru*

Интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) из года в год неуклонно растет на всех уровнях мирового сообщества. ВИЭ приобрели не только энергетическое и экологическое, но и мировое политическое звучание [1]. В наше время они уже вносят заметный вклад в глобальное потребление энергии, однако повышенный интерес к ним прежде всего связывается с надеждами на экологически безопасное и устойчивое энергоснабжение человечества в будущем. В то время как традиционная энергетика, базирующаяся на использовании ископаемых органических энергоресурсов, с начала XXI века росла в среднем с темпом всего около 2% в год, использование основных нетрадиционных ВИЭ росло в это же время со средними темпами в десятки процентов в год (см. рис.1) [2].

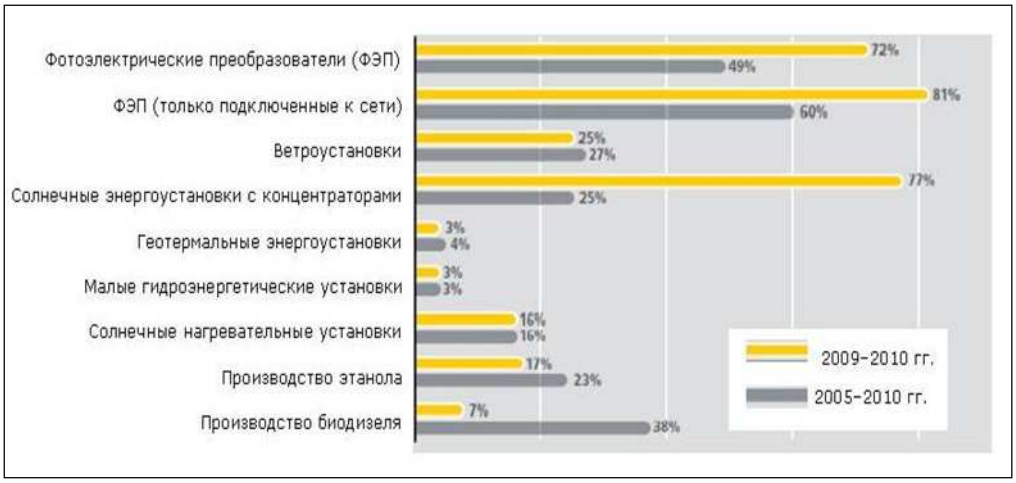



Рис.1. Средние годовые темпы роста мощности энергоустановок на ВИЭ и производства биотоплив в 2005–2010 гг.

Столь высокие темпы проникновения ВИЭ на крайне инерционный энергетический рынок, новые технологии на который пробиваются десятилетиями, говорят о том, что возобновляемая энергетика становится все более серьезным «игроком» и заслуживает пристального внимания.

Расширение масштабов освоения ВИЭ в мире сегодня связывается лишь с относительно новыми технологиями их энергетического использования. При этом вклад нетрадиционных ВИЭ в глобальное потребление энергии пока немногим превышает 2%, а в производство электроэнергии составляет менее 4%. Казалось бы, не много, однако отмеченные ранее высокие темпы развития практического использования ВИЭ свидетельствуют о том, что новые технологии преобразования нетрадиционных ВИЭ сделали заявку на то, чтобы претендовать на серьезные роли в будущей мировой энергетике.

Этот вывод подтверждается непрерывным ростом инвестиций в данный сектор энергетики, которые в 2010 году превысили 200 млрд. долларов (рис. 2) [2] и в отличие от инвестиций в другие сектора мировой экономики не претерпели

какого-либо спада вследствие мирового финансово-экономического кризиса 2008 года.

Страны-лидеры по инвестициям в ВИЭ включают Китай, Германию, США, Италию и Бразилию. Инвестиции Китая в 2010 году составили 49 млрд. долларов, Германия – 41 млрд. (из них 34,3 млрд. было инвестировано в малую распределенную энергетику на ВИЭ, в основном в крышные фотоэлектрические установки), США – 25 млрд. Максимальные темпы роста инвестиций в ВИЭ по отношению к 2009 году имели место в Италии (248%), США (58%) Канаде (47%), Бельгии (40%), Китае (28%), Индии и Бразилии (по 25%).

В 2011 году суммарная установленная мощность энергоустановок на нетрадиционных ВИЭ достигла 370 ГВт и сравнялась с суммарной мощностью действующих в 32 странах мира 439 ядерных энергетических реакторов. В Евро-Азиатской части земного шара вклад ВИЭ (без крупных гидроэлектростанций) в энергетический баланс региона превысил 6%.

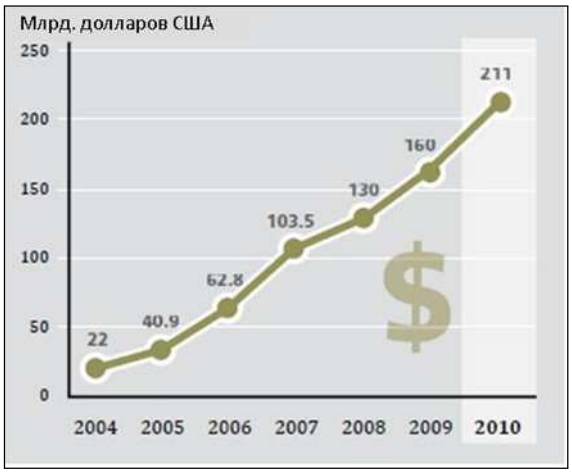



Рис.2. Рост инвестиций в развитие нетрадиционных ВИЭ

Важными являются также следующие факты, характеризующие состояние развития ВИЭ в некоторых странах на конец 2010 г. [2]:

В США вклад ВИЭ в суммарное потребление энергии достиг 10,9% (для сравнения вклад ядерной энергетики 11,3%) и вырос по сравнению с 2009 годом на 5,6%.

В Китае за год введено в эксплуатацию 29 ГВт новых мощностей на базе ВИЭ, что по отношению к установленной мощности всех электростанций страны (263 ГВт) составляет 12%. С учетом крупных ГЭС доля ВИЭ в суммарной мощности электрогенерирующих установок достигла 26% и 18% в суммарной генерации. Вклад ВИЭ в потребление первичной энергии в 2010 г. достиг 9%.

В Германии вклад ВИЭ в топливно-энергетический баланс страны достиг 11%, в том числе в производстве электроэнергии доля ВИЭ составила 16,8%, в производстве тепловой энергии (преимущественно в результате использования биомассы) 9,8%, а в использовании моторных топлив 5,8% (биотоплива). Среди различных ВИЭ, используемых для производства электроэнергии, лидирующую роль играют ветровые установки (36%), биомасса, малые ГЭС и фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии.

Рекордно высокие доли производства электроэнергии с использованием энергии ветра достигнуты в Дании (22%), Португалии (21%), Испании (15,4%) и в Ирландии (10,1%).

В настоящее время около 100 стран мира сформулировали целевые индикаторы по развитию ВИЭ на период до 2020 года и на более дальнюю перспективу. В большинстве случаев в течение ближайших 10-20 лет планируется достичь вклада ВИЭ в энергобалансы на уровне от 10 до 30%. Наиболее амбициозные целевые индикаторы приняты в Европейском Союзе (рис. 3).

Следует подчеркнуть, что в большинстве стран-лидеров ускоренное освоение ВИЭ осуществляется при определяющей государственной политической, законодательной и прямой финансовой поддержке. Вместе с тем некоторые технологии преобразования ВИЭ уже достигли технологической зрелости и стали в конкретных экономических и климатических условиях многих странах вполне конкурентоспособными.

Одним из действенных механизмов государственной поддержки развития ВИЭ стало создание в странах-лидерах национальных и международных исследовательско-демонстрационных центров (лабораторий), в которых концентрируются прикладные исследования, проводятся независимые испытания оборудования, разрабатываемого в различных лабораториях и университетах и на базе которых реализуются наиболее масштабные пилотные проекты.

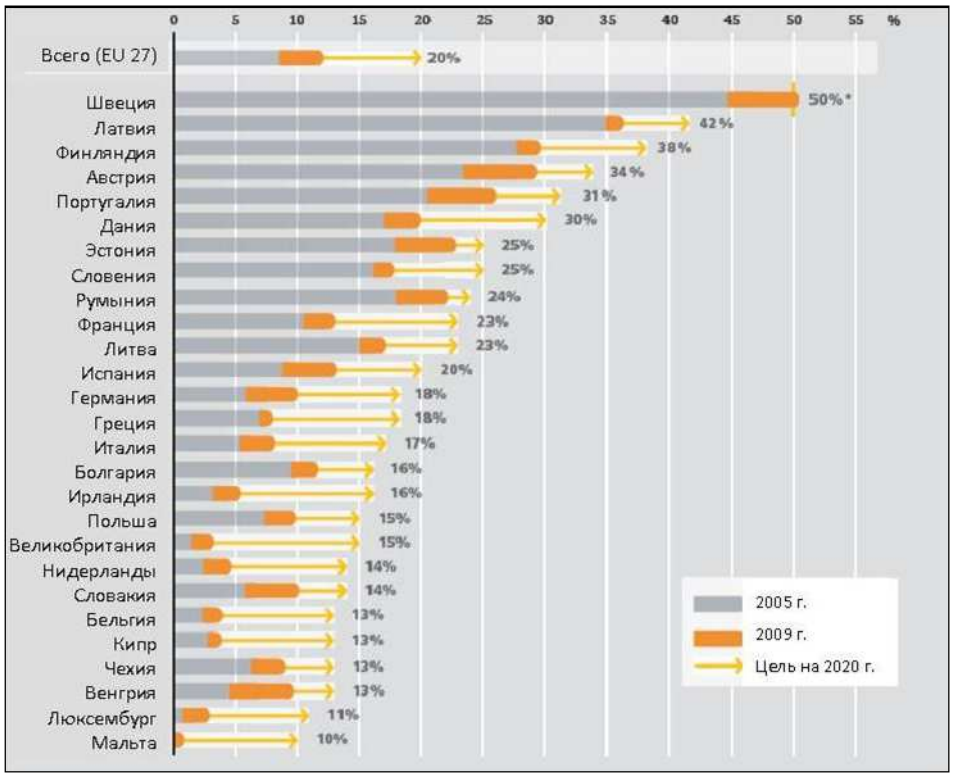



Рис.3. Достигнутые в 2005 и в 2009 гг. показатели по вкладу ВИЭ в конечное потребление энергии в странах ЕС и цели на 2020г.

Среди наиболее известных зарубежных научно-производственных центров можно назвать центры и лаборатории в США, Испании, Великобритании, Норвегии (рис. 4) и в других странах. Недавно создан крупный полигон по возобновляемой энергетике в Гобустане (Азербайджан).

Практическое освоение возобновляемых источников энергии в России, несмотря на принятие Правительством РФ решения о доведении вклада нетрадиционных ВИЭ в производство электроэнергии к 2020 году до 4,5%, сдерживается многими факторами. Среди них, безусловно, можно назвать и отсутствие в стране крупного Национального центра, который мог бы стать

местом отработки эффективных технологий использования ВИЭ и продвижения их на рынок.

Рис.4. Научно-производственные центры в области ВИЭ в разных странах

По инициативе ведущих российских научно-исследовательских институтов РАН, занимающихся проблемами возобновляемой энергетики (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ОИВТ РАН, ИПГ ДНЦ и др,), крупных ВУЗов (МИФИ, СПГЭТУ, ДГУ и др.), производственных компаний (Элтех-СПб, Hevel и др.) при поддержке Государственной Думы РФ и Правительства РД начато формирование концепции создания экспериментально–производственного комплекса «Зелёная Долина» и национального исследовательско-демонстрационного центра в области возобновляемых источников энергии на юге России.

Разработчики концепции исходят из следующих положений.

1. Стратегия социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа до 2025 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации № 1485-р от 6 сентября 2010 г., предусматривает опережающее развитие реального сектора экономики в субъектах СКФО, создание новых рабочих мест и повышение уровня жизни населения, обеспечиваемых инвестициями в развитие и интеграцию экономики региона в национальную и мировую экономику.
2. Одним из актуальных направлений развития экономики СКФО является освоение инновационных научно-технических решений в области создания интеллектуальных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии, предназначенных для повышения надежности и эффективности энергоснабжения населенных пунктов, развиваемых в регионе туристско-рекреационных зон, объектов бюджетной сферы, предприятий и других потребителей.
3. Важной государственной задачей [3] является развитие экологически чистых возобновляемых источников энергии, для которых уже сегодня имеются большие ниши конкурентоспособного применения в малой и распределенной энергетике, прежде всего, на Юге России.
4. Целью проекта является создание экспериментально-производственного комплекса и национального исследовательско-демонстрационного центра в

области возобновляемых источников энергии как основы научно-производственного кластера на юге России, ориентированного на промышленное освоение и развитие практического использования инновационных экологически чистых энергетических технологий в интересах СКФО и других регионов страны.

Для достижения цели проекта должны быть решены следующие **задачи**:

- разработка и освоение производства новых типов преобразователей солнечной, ветровой, геотермальной и других видов возобновляемых источников энергии;
- разработка и освоение выпуска новых типов накопителей электрической и тепловой энергии;
- разработка и освоение выпуска новых типов энергетических установок и систем интеллектуального управления, обеспечивающих их эффективное использование в малой распределенной и централизованной энергетике;
- разработка и освоение технологий выращивания микроводорослей различного назначения (производство горючего, белковых кормовых добавок, медицинских и фармакологических препаратов) на геотермальных водах различного химического состава, а также технологий энергетической переработки с/х отходов с получением биогаза и его применением в системах электроснабжения;
- организация комплексных натурных и лабораторных испытаний компонентов нового оборудования и создаваемых на его основе систем энергоснабжения;
- развитие инфраструктуры для обеспечения продвижения новых энергетических технологий и энергоустановок в различные сектора экономики Юга России и других регионов страны;
- организация подготовки научных и инженерных кадров в области возобновляемой энергетики.

Рис.5. Функциональная схема научно-производственного кластера

Структурно научно-производственный кластер видится состоящим из двух ключевых компонентов: экспериментально-производственного комплекса, основной задачей которого будет производство и продвижение на рынок различного энергетического оборудования, и исследовательско-демонстрационного центра, основными задачами которого могло бы стать проведение поисковых исследований и разработок, испытание и сертификация оборудования, созданного в экспериментально-производственном комплексе, подготовка научных и инженерных кадров для нужд кластера. Производственный комплекс должен базироваться на ряде действующих в регионе производственных

площадок. Для организации новых производств должны выделяться новые площади, либо расширяться существующие. Исследовательско-демонстрационный центр мог бы использовать в качестве базовой площадки научный полигон ОИВТ РАН «Солнце», расположенный в 20 км севернее г.Махачкалы на морском побережье (рис.7), а также экспериментальную базу университетов.

Рис.6. Структура научно-производственного кластера

Для финансирования кластера планируется привлекать средства из различных источников (рис.8). В финансировании проекта/подпроектов ожидается участие:

- ОАО «Роснано» – инвестирование «start-up», реализующихся в ходе работы проекта;
- Фонда «Сколково» - инвестирование проектов по разработке энергоэффективных систем;
- Минобрнауки РФ – финансирование НИР и НИОКР в рамках Федеральных целевых программ;
- других министерств, ведомств и фондов, заинтересованных в реализации проекта или его компонентов.

Рис.7. Научный полигон ОИВТ РАН «Солнце»

В июле 2012 года основные положения концепции экспериментально-производственного комплекса «Зеленая долина» были одобрены Минэкономразвития РФ [4].

Рис.8. Источники финансирования научно-производственного кластера

К формированию кластера проявили интерес ряд производственных компаний и администрации Ставропольского края и Ростовской области, ряд зарубежных научных центров, которые готовы внести свой вклад в его создание.

Для успешного развития работ требуется объединение усилий потенциальных участников масштабного проекта и тесная кооперация с региональными властями и заинтересованными министерствами и ведомствами. Реализация проекта обеспечит создание первого в стране экспериментально-производственного комплекса и национального исследовательско-демонстрационного центра в области возобновляемых источников энергии на базе сотрудничества ведущих российских и зарубежных научных центров, федеральных и региональных образовательных учреждений и производственных предприятий и компаний, что, несомненно, будет способствовать ускорению развития масштабного практического использования ВИЭ в регионе и во всей России.

**Литература:**

1. Энергетика в современном мире (монография). Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект». 2011. 165 С
2. Renewables 2011. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Centure. www.ren21.net.
3. Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. N 1-р. Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года.
4. Протокол от 24 июля 2012 г № 11-Д19 совещания у директора Департамента стратегического управления (программ) и бюджетирования А.Е. Шадрина с участием директора Департамента энергоэффективности и модернизации ТЭК Минэнерго России.

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ДЕМОНСТРАЦИОННОЙ ЗОНЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ ФИЛИАЛА ОИВТ РАН В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН

В.М. Батенин[1], В.М. Зайченко[1], В.В. Качалов[1], А.А. Чернявский[2]

*[1] ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Москва, Россия; 125412, ул. Ижорская 13/19.*
*[2] Ростовтеплоэлектропроект;*
*Ростов-на-Дону, Россия; 344002, Буденновский проспект 2.*

**Введение.** Вопросы, рассматриваемые в настоящем сообщении, неразрывно связаны и являются продолжением исследований, задачи которых были во многом сформулированы чл.-корр. РАН Э.Э. Шпильрайном и реализовывались коллективом, руководимым к.т.н. А.М. Амадзиевым, много лет возглавлявшим филиал ОИВТ РАН.

Перевод экономики на энергоэффективный путь развития является определяющим фактором обеспечения конкурентоспособности товаров и услуг, улучшения жизненного уровня населения страны. Одним из важнейших факторов повышения энергоэффективности является использование новых методов получения энергии, в первую очередь, создание системы распределенной энергетики на возобновляемых и местных топливно-энергетических ресурсах, к которым относится биомасса и отходы различных видов: древесные, сельскохозяйственные, твердые бытовые отходы (ТБО), отходы жизнедеятельности и т.д.

Энергоснабжение территорий ЮФО и СКФО обеспечивается Объединенной энергосистемой (ОЭС) Юга. В ее состав входят 12 региональных энергосистем: Астраханская, Волгоградская, Ростовская, Краснодарская, Ставропольская, Карачаево-Черкесская, Кабардино-Балкарская, Северо-Осетинская, Чеченская, Дагестанская, Калмыцкая и Ингушская с суммарной установленной мощностью электростанций около 18 млн. кВт.

Обеспечение бесперебойного энергообеспечения данного региона связано с решением ряда задач:

1. *Интенсивный рост электропотребления* в последние годы в ряде энергосистем обострил проблемы в электроснабжении потребителей этих районов. Для повышения надежности электроснабжения наряду с развитием электрических сетей в ОЭС Юга планируется в ближайшей перспективе ввод второго блока мощностью 1000 МВт на Волгодонской АЭС, а также реконструкция Ставропольской, Новочеркасской, Невинномысской ГРЭС, Краснодарской и Сочинской ТЭЦ с увеличением их мощности и эффективности за счет использования современных парогазовых и газотурбинных технологий, котлов с циркулирующим кипящим слоем.
2. *ОЭС Юга будет оставаться дефицитной* даже после ввода энергоблока №2 на Волгодонской АЭС и запланированной реконструкции тепловых электростанций. Наибольший дефицит испытывает Краснодарская энергосистема. Глубоко дефицитны также Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская и Северо-Осетинская энергосистемы. Чеченская, Ингушская и Калмыцкая энергосистемы не имеют собственных генерирующих источников и полностью покрывают свою потребность в электроэнергии из других энергосистем – Ставропольской и Ростовской, где есть некоторый избыток электрической энергии.
3. *Покрытие дефицита ОЭС Юга* в целом осуществляется из ОЭС Средней

Волги и ОЭС Центра. Однако планируемое интенсивное развитие экономики в России будет приводить к существенному уменьшению избытка мощности в соседних ОЭС. Покрытие дефицита в ОЭС Юга станет возможным только за счет дополнительного ввода собственных энергетических мощностей. К настоящему времени создание новых энергетических мощностей в СКФО еще не запланировано.

**Различные сценарии развития региона.** Согласно схеме развития Объединенной энергосистемы Северного Кавказа на период до 2020 года, разработанной «Южэнергосетьпроект» (Ростов-на-Дону) в 2004 году при развитии экономики по умеренному сценарию к 2020 году дефицит электроэнергии в ОЭС Юга составит 6,2 млрд. кВтч, а к 2030 году – 44,0 млрд. кВтч. По оптимистическому сценарию дефицит электроэнергии к 2020 году составит 59,3 млрд. кВтч, к 2030 году – 114,1 млрд. кВтч. Дефицит теплопотребления по оптимистическому сценарию составит к 2020 году 295,8 млн. Гкал, к 2030 году – 403,5 млн. Гкал. С 2004 года некоторые прогнозы изменились, но общая тенденция, заключающаяся в том, что Северный Кавказ на ближайшую и среднесрочную перспективу остается энергодефицитным регионом, сохраняется.

Обеспечить ликвидацию значительной доли этого дефицита целесообразно и уже сегодня технически возможно за счет интенсификации использования средств распределенной энергетики на базе местных и возобновляемых топливно-энергетических ресурсов. Для того, чтобы эта задача была решена, необходимы разработка и освоение промышленного производства систем распределенной энергетики, в том числе когенерационных газопоршневых технологий, солнечной и ветроэнергетики; использования геотермальных источников и малых ГЭС, биогазовых технологий. Особенно эффективным будет использование средств распределенной энергетики в районах, неподключенных к централизованным энергосистемам, без магистрального газоснабжения, где требуется завозить дорогостоящие жидкое топливо и уголь для обеспечения своих энергетических нужд. Такие районы занимают на юге России, в том числе и в СКФО, территорию в тысячи квадратных километров с населением несколько миллионов человек. Обеспечение этих районов собственными энергоресурсами за счет использования объектов распределенной энергетики позволит существенно улучшить условия жизни, обеспечит создание новых рабочих мест и приведет к улучшению социального климата в целом.

Большие возможности в плане повышения энерговооружённости представляет использование энергии ветра. С применением современных ветроэлектрических агрегатов единичной мощностью 1 – 6 МВт за счет экономического потенциала ветровой энергии, составляющего в ЮФО и СКФО более 700 млрд. кВтч/год, можно обеспечить выработку до 200 млрд. кВтч/год электроэнергии.

По оценкам ОИВТ РАН и Ростовтеплоэлектропроект валовый потенциал солнечной энергии на территориях ЮФО и СКФО составляет более 800 трлн. кВтч/год, технический потенциал – 82,2 трлн. кВтч/год, экономический – 7,4 трлн. кВтч/год. При строительстве солнечных электростанций (СЭС) только на бросовых землях можно обеспечить покрытие годовой потребности в электроэнергии до 420 млрд. кВтч и в тепловой энергии – 1150 млн. Гкал и ликвидировать дефицит электрической и тепловой энергии.

Многие районы СКФО, в том числе Дагестан, имеют значительные запасы геотермальных ресурсов. По предварительной оценке разведанные запасы

термальных вод в ЮФО и СКФО позволяют создать источники энергоснабжения общей мощностью 7 - 8 тыс. МВт с годовой выработкой 50 - 60 млрд. кВтч электроэнергии и 150 - 200 млн. Гкал тепла. Достоинством геотермальных энергоисточников в отличие от солнечных и ветроэлектростанций является независимость их мощности от времени суток, времени года и метеоусловий.

Значительным энергетическим потенциалом обладают и новые технологии утилизации отходов, к которым относятся древесные и сельскохозяйственные отходы, отходы жизнедеятельности и т.д. Энергетическая утилизация отходов позволяет произвести добавочное количество электрической и тепловой энергии без использования ископаемых топлив и обеспечить наиболее эффективную и экологически чистую их утилизацию.

Таким образом, комплексное использование солнечной, ветровой, геотермальной энергии, биоэнергетики, энергетической утилизации отходов, а также других видов распределенной энергетики наряду с применением новых систем аккумулирования может обеспечить практическое решение многих задач энергоснабжения Юга России.

Развитие систем распределенной энергетики в новых экономических условиях приобретает для регионов дополнительное значение. В настоящее время основным фактором, обеспечивающим благосостояние регионов, являются налоговые отчисления. Величина налогов напрямую связана с уровнем производства. Ввод новых производственных мощностей позволяет увеличить финансирование образования, медицины, благоустройства, строительства дорог, социальных выплат и т.д. - улучшить показатели, по которым определяется эффективность действий регионального руководства.

Если при создании новых производств в регионе собственных энергетических мощностей не хватает, то экономический эффект от развития энергетики будет проявляться в регионах, производящих энергию. Это означает недополученную прибыль в энергодефицитных регионах, в частотности в СКФО.

В качестве примера на рис.1 приведены данные о кумулятивной бюджетной эффективности проекта сооружения мини-ТЭЦ электрической мощностью 315 кВт и тепловой 450 кВт в поселке Нижний Архыз Карачаево-Черкесии.

За расчетный срок эксплуатации станция обеспечит поступление:

- в Федеральный бюджет – 166 млн. руб.;
- в консолидированный бюджет Карачаево-Черкесской Республики – 113 млн. руб.;
- в т.ч. в местный бюджет Зеленчукского района Карачаево-Черкесии – 34 млн. руб.

Таким образом, планируемая величина отчислений в бюджеты всех уровне за расчетный срок эксплуатации станции составит около 300 млн. руб. При этом общие затраты на сооружение станции составили в 2010 году 14,5 млн. руб.

Возможность получения значительных налоговых поступлений делает целесообразным использование бюджетных средств при сооружении автономных энергоисточников, что должно стимулировать административную поддержку при их строительстве.

Несмотря на то, что объем выполняемых исследовательских работ в стране в области энергосбережения и разработки новых методов получения энергии в настоящее время значителен, внедрение новых технологий происходит недостаточно быстрыми темпами. Существует определенная практика перехода от стадии разработок к внедрению новых научно-технических решений. Для этого

недостаточно выполнения только научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок. Необходимо создание демонстрационных объектов, на которых в натурных условиях будут представлены новые технологии энергосбережения и распределенной энергетики, где можно получить исчерпывающую информацию по технико-экономическим параметрам, срокам службы, консультацию по внедрению данных технологий в конкретных условиях потребителя, помощь в получении и использовании новых технологий и оборудования. Особую роль должна играть подготовка инженерных кадров, специализирующихся на разработке, создании и использовании энергосберегающих технологий и новых методов получения энергии на базе возобновляемых и местных топливно-энергетических ресурсов.

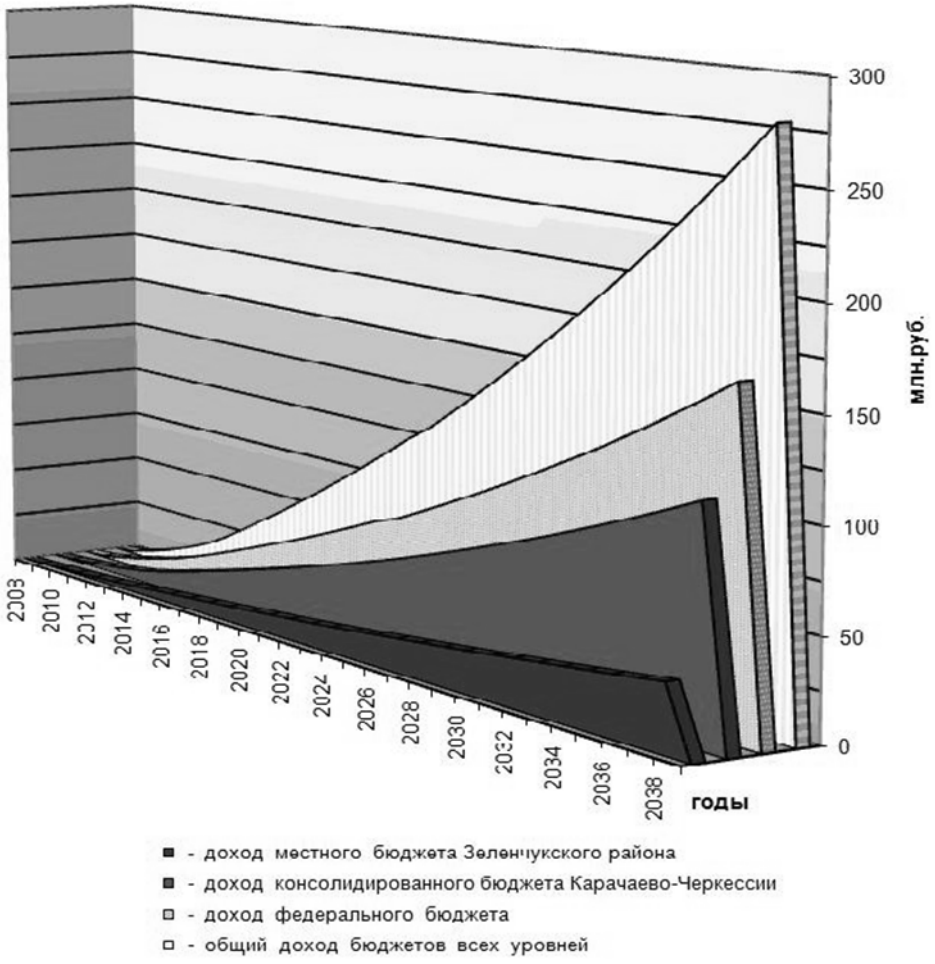



Рис.1. Кумулятивная бюджетная эффективность проекта сооружения мини-ТЭЦ электрической мощностью 315 кВт в поселке Нижний Архыз Карачаево-Черкессии

Целесообразно решение задач сосредоточить в специально созданных демонстрационных зонах, учитывающих географические и климатические особенности регионов. Филиал ОИВТ РАН в Дагестане, на наш взгляд, является наиболее подходящим объектом для создания демонстрационного полигона по энергосберегающим технологиям и новым методам получения энергии на территории СКФО.

Филиал ОИВТ РАН создавался в 1983 году именно с целью отработки новых методов получения энергии при использовании возобновляемых источников и их практического применения в топливно-энергетическом комплексе и других отраслях народного хозяйства Дагестана. Он включает в себя

комплекс лабораторных, административных и жилых зданий, оснащенных системами солнечного и геотермального отопления, имеет необходимую инфраструктуру для проведения исследований по отработке новых энергетических технологий. Опыт работы и имеющаяся инфраструктура при наличии доработок, учитывающих особенности работы в новых рыночных условиях позволяют создать на территории Филиала ОИВТ РАН крупный и демонстрационный и исследовательский центр по освоению методов распределенной энергетики для организации их промышленного производства и дальнейшего тиражирования на территории Дагестана, СКФО и Юга России в целом.

Структура подобного центра, разрабатываемые и осваиваемые технологии, участники работ, схемы и объемы финансирования, текущие и перспективные задачи – все это элементы большого проекта, разработка которого стоит сегодня на повестке дня совместной деятельности РАН, Правительства Республики Дагестан и руководства СКФО.

В качестве одного из нетривиальных шагов при организации демонстрационного полигона рассматривается создание демонстрационной ветроэнергетической установки мощностью 1 МВт[1] с системой аккумулирования энергии на базе газопоршневой установки, работающей на водородном или водородосодержащем топливе.

Из-за непостоянства ветровой обстановки и колебаний нагрузки в системе потребления среднегодовой коэффициент полезного использования автономных ветроэнергетических установок не превышает 18…22%. В западных странах резервирование энергии, вырабатываемой ветроэнергетическими агрегатами, осуществляется за счет включения комплекса ветроэнергетических агрегатов в единую сеть. Т.е. при отсутствии ветра в данном регионе постоянство характеристик обеспечивается либо за счет переброски энергии из тех регионов, где работают ветроэнергетические агрегаты, либо за счет централизованной энергосистемы. Для нашей страны подобная практика ограничена из-за больших расстояний и труднодоступности, а часто и отсутствия централизованной энергосистем.

Существующие в мировой практике схемы не обеспечивают аккумулирование энергии, производимой автономными ветроэнергетическими агрегатами при ее избыточном производстве. Экономика подобных энергетических комплексов подлежит тщательному анализу, тем не менее, указанное направление представляется перспективным, особенно в случае, когда рядом располагаются источники низкокалорийного газа на базе переработки отходов сельскохозяйственного производства.

Одним из возможных путей решения является получение водорода путем электролиза воды при избыточном производстве электрической энергии, и последующее использование полученного водорода в виде топлива для электростанций на базе газопоршневого двигателя – при недостаточном уровне производства электрической энергии. Те же подходы могут быть использованы при аккумулировании и резервировании электроэнергии, производимой солнечными электростанциями.

[1] При номинальной электрической мощности ветроустановки 1 МВт, ее среднегодовая мощность не превысит 300…350 кВт. Именно на эту мощность планируется сооружение газопоршневой установки на водороде. В принципе, можно рассмотреть сооружение установки меньшей мощности, однако в данном случае это будет «непредставительным» экспериментом, результаты которого не могут быть использованы на практике для последующего масштабирования.

До настоящего времени газопоршневой двигатель, работающий на чистом водороде, не создан. Основная трудность заключается в детонационном режиме сгорания водорода при его использовании в виде топлива в газопоршневом двигателе. Технических решений, обеспечивающих исключение детонационного режима при использовании водорода в качестве топлива для газопоршневых двигателей, в мире не существует.

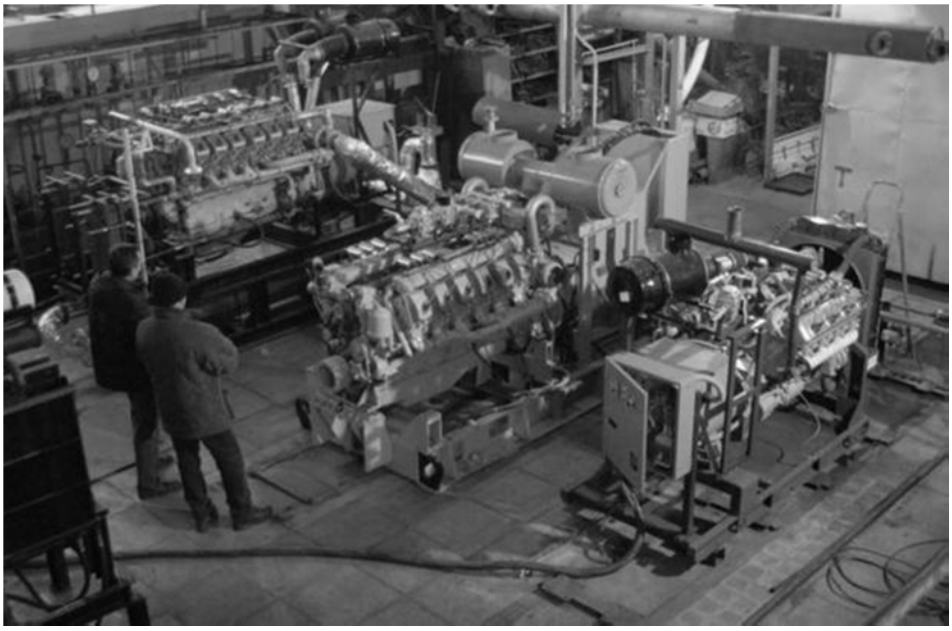


Рис.2. Комплексный стенд ОИВТ РАН для отработки конструктивных решений и режимных параметров отечественных электростанций и мини-ТЭЦ на базе газопоршневого двигателя

В ОИВТ РАН создан стенд для отработки режимных характеристик отечественных электростанций и мини-ТЭЦ на базе газопоршневого двигателя, которые могут быть использованы для систем аккумулирования и резервирования в комплексе с агрегатами, производящими водород или водородосодержащие газы.

На рис.2 предоставлена фотография стенда ОИВТ РАН по исследованию и отработке режимных параметров отечественных газопоршневых двигателей. Стенд является единственным в стране. На стенде была осуществлена экспериментальная проверка режимных параметров, полученных расчетным путем и обеспечивающих бездетонационное сжигание водорода в газопоршневом двигателе. (Понятие «работа на водороде» включает в себя использование водорода с определенными добавками, например, за счет рецикла продуктов сгорания или добавок низкокалорийного газа. При использовании «добавок» потеря мощности по отношению к использованию чистого водорода может составить 15%).

Полученные данные являются предварительными, требуют детальной проработки, но позволяют однозначно считать , что задача будет успешно решена. Это позволит разработать и создать демонстрационную установку, включающую ветроэнергетическую установку, систему производства и хранения водорода, а также энергогенерирующую установку на базе газопоршневого двигателя. Привлекательным, на наш взгляд, является интегрирование в состав подобной установки технологического комплекса по производству низкокалорийного газа из отходов сельскохозяйственного производства. В этом случае работа газопоршневого двигателя на смеси водорода и биогаза позволит, с одной

стороны, обеспечить его бездетонационную работу, а с другой, выровнять в некоторой степени график работы основных электрогенерирующих агрегатов. Подобные энергосистемы наиболее полно отвечают проблеме обеспечения независимого энергоснабжения многих сельскохозяйственных предприятий. При этом основными задачами, решение которых необходимо при их проектировании и внедрениями являются:

- определение рациональных значений мощности энергетического комплекса и составляющих его элементов;
- выбор основного оборудования;
- разработка алгоритмов управления как отдельными элементами, так энергетического комплекса в целом.

Часть этих задач может быть решена с использованием лабораторной базы ОИВТ РАН, однако для комплексной отработки основных характеристик энергетического комплекса крайне желательным представляется его создание в рамках демонстрационной зоны на базе филиала ОИВТ РАН в г. Махачкала.

# CROSSOVER MODELS FOR THE THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF FLUIDS AND FLUID MIXTURES IN THE CRITICAL AND SUPERCRITICAL REGIONS-REVIEW

Abdulagtov I.M.[1,2]

[1] *Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology; Boulder, Usa; CO 80305; e-mail: ilmutdin@boulder.nist.gov*
[2] *ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т Имама Шамиля 39а.*

**1. Introduction.** Industry continues to widely exploit the remarkable anomalous properties of nearcritical and supercritical fluids and fluid mixtures. For example, near-critical and supercritical fluids and fluid mixtures has recently become a subject of growing scientific interest due to its crucial role in a variety of natural processes, as well as because of emerging promising technological applications for the environmentally friendly destruction of toxic and hazardous wastes [1-14]. Supercritical fluids are of fundamental importance in geology and mineralogy (for hydrothermal synthesis), in chemistry, in the oil and gas industries, and for some new separation techniques, especially in supercritical fluid extraction. Supercritical fluids have also been proposed as a solvent or reaction medium for a number of technological applications including coal conversion, organic synthesis, destructive oxidation of hazardous wastes, enhanced oil recovery, activated carbon regeneration, formation of inorganic films and powders, supercritical chromatography, organic reaction rate modification and precipitation polymerization. Therefore, knowledge of the thermodynamic and transport properties of nearcritical and supercritical fluids has potentially important industrial applications such as petroleum and natural gas engineering, for rational design of chemical reactors and high pressure extraction and separation equipment.

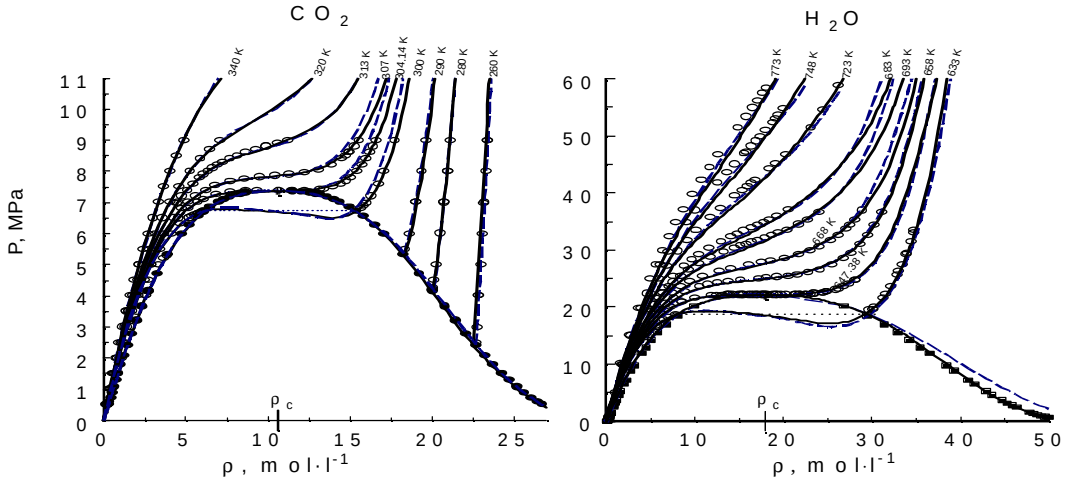



Fig.1

The advantages of supercritical fluid technology arise primarily from the unusual properties exhibited by fluids under supercritical conditions. Due to large compressibility ($K_T \to +\infty$) near the critical point, the small changes in pressure can produce substantial changes in density (see Fig.1) which, in turn, affects diffusivity, viscosity, dielectric, and solvation properties, thus dramatically influencing the kinetics and mechanisms of chemical reactions in supercritical media. The critical point is the center of the anomalous behavior all of the thermodynamic [15] and transport properties

of fluids [16]. The properties of pure fluids change markedly when it is approaching to temperatures and pressures near or above the critical point. In this work we presented comprehensive review of the available scaling type equations of state to accurate calculate the thermodynamic and transport properties of pure fluids and fluid mixtures in the critical and supercritical regions.

**2. Asymptotic and Nonasymptotic Scaling Behavior of the Thermodynamic and Transport Properties of Pure Fluids near the Critical Point.** In the critical region, the details of intermolecular interaction become insignificant and the behavior of the system is mainly determined by anomalously large fluctuations involving a great number of molecules [17-23]. This leads to the universality in the behavior of the system and makes inapplicable the classical methods of description based on the consistent account of two-, three-, and many-particle interactions between the molecules. In the classical theory of Landau (mean-field theory), the equation of state near the critical point is obtained by expanding the thermodynamic potential in powers of the degrees of freedom. If we take, for example, the dimensionless deviation from the critical density, we will see that in the first approximation the isotherms of a one-component liquid near the critical point have the form that is analogous to that of the van der Waals isotherms. The Landau theory proves to be valid only for systems with interparticle long-range interaction in the temperature range $1 >> t >> Gi$, where $Gi$ is the Ginzburg number. In the temperature range of $t << Gi$, *i.e.*, for the systems with strongly developed fluctuations of the order parameter, *e.g.*, pure substances in the vicinity of the critical point or solutions near the critical curve, the Landau theory is inapplicable. The criterion for the applicability of the mean-field theory (Landau theory) can be written as follows

$$1 >> \Delta t >> G_i = \frac{u_4^2}{64\pi^2 u_4^2}\left(\frac{V_0}{\xi_0^3}\right)^2, \qquad (1)$$

where $V_0$ is the molecular volume; and $\xi_0$ is the radius of the direct intermolecular interaction (the direct correlation length). For describing such systems, the concept of a scaling invariance is used, which underlie the modern fluctuation theory of phase transitions and critical phenomena [17-23].

The properties of the near-critical fluids are so drastically different from those of liquid or vapor states: one that is highly compressible and highly expandable, large isobaric heat capacity, low speed of sound, high thermal conductivity, high viscosity, low diffusivity, and high light scattering [15,16] (see Figs.2 and 3).

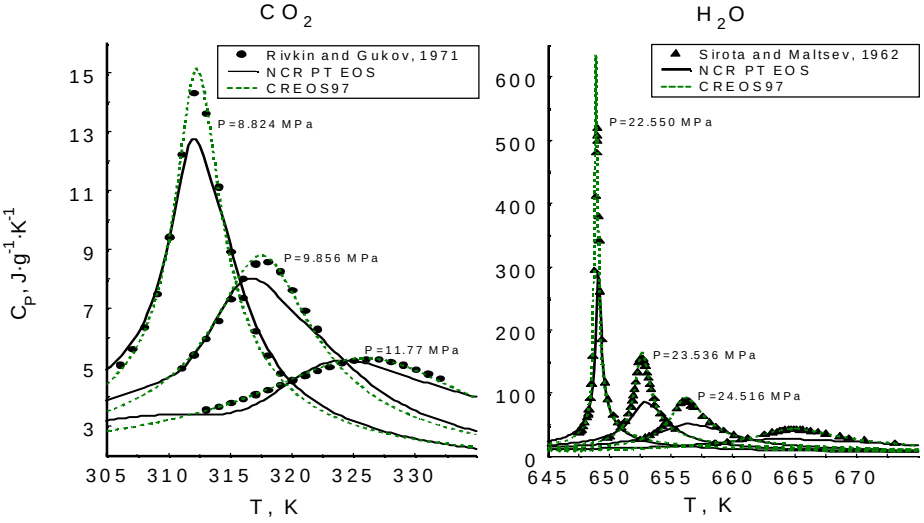



Fig.2.

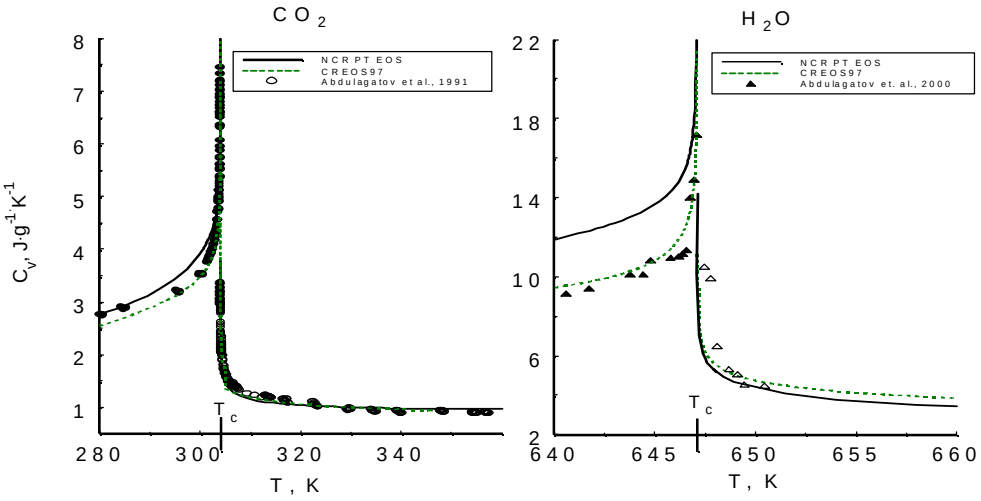



Fig.3.

At the critical point, located at the top of the coexistence curve of a pure fluid, the difference between saturated vapor $\rho^{vap}$ and saturated liquid $\rho^{liq}$ disappears ($\rho^{vap}=\rho^{liq}$). At the critical point the intensive properties of two-phases in equilibrium become identical. At the critical temperature, the vapor pressure $P_S$ as a function of temperature $T$ goes over into the curve of pressure $P$ versus $T$ along the critical isochore $\rho=\rho_C$ without a discontinuity in the slope, $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\rho_C}=\left(\frac{dP_S}{dT}\right)_{CR}$. In the critical region $P$-$\rho$ isotherms has an inflection point, with $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T_C}$ =0 vanishing at the critical point $\rho=\rho_C$ and $T=T_C$, therefore the compressibility $K_T=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T=-\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ becomes very large ($K_T\to+\infty$). The all thermodynamic and transport properties of fluids are changes rapidly when the critical point is approached. The thermal-expansion coefficient (expansivity) $\alpha_P=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$, differences between the isobaric $C_P$ and isochoric $C_V$ heat capacities, speed of sound $W$, thermal conductivity $\lambda$, thermal diffusivity $D_T$, are related to the compressibility $K_T$ by

$$\alpha_P=\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho K_T, \tag{2}$$

$$C_P-C_V=\frac{T}{\rho}\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho^2 K_T, \tag{3}$$

$$W^2=\frac{1}{\rho}\frac{C_P}{C_V}\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho^{-1} K_T^{-1}, \tag{4}$$

$$\Delta\lambda_C=\frac{\rho C_P k_B^{1/2} T^{1/2}}{6\pi\eta K_T^{1/2}}, \tag{5}$$

$$D_T=\frac{\lambda}{\rho C_P}, \tag{6}$$

Since $K_T$ is diverge at the critical point, while $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho$ remains finite, it follows that all

of these properties will diverge ($\alpha_P, C_P, \lambda \to +\infty$) or vanished ($W, D_T \to 0$) at the critical point. The isochoric heat capacity $C_V$ is diverge at the critical point also as simple power laws of the form [15,28]:

$C_V = A^+ t^{-\alpha}$ along the critical isochore $\rho = \rho_C$, $T > T_C$ (one-phase) (7)

$C_V = A^- t^{-\alpha}$ along the critical isochore $\rho = \rho_C$, $T < T_C$ (two-phase) (8)

$C_V = A_0 t^{-\alpha'}$ along the coexistence curve $T = T_S(\rho)$ ($\alpha \approx \alpha'$) (9)

$C_V = A_1 |\Delta\rho|^{-\alpha/\beta}$ along the critical isotherm $T = T_C$, (10)

where $\alpha$=0.112, $\beta$=0.325 are the universal critical exponents that are related to one another by universal relations [15,28]; $\Delta\rho = (\rho - \rho_C)/\rho_C$; and $t = (T - T_C)/T_C$. But the critical enhancement of $C_V$ is not directly related to $K_T$ and is much smaller that $C_P$. The critical enhancement of the viscosity $\eta$ at the critical point is weak [16]. Since both, the compressibility $K_T$ and the thermal – expansion coefficient (expansivity) $\alpha_P$ diverges at the critical point, the density and consequently all of the other thermophysical properties will vary rapidly as a function of pressure or temperature in the critical region. The $K_T$ diverges at the critical point cause the presence of long-range density fluctuations in fluids near the critical region. The spatial extent of these density fluctuations can be characterized by a correlation length, $\xi$ [17-23]. The correlation length $\xi$ diverges at the critical point approximately proportional $\rho K_T^{1/2}$. The modern theory of critical phenomena [17-23] suggests that the thermophysical properties of fluids near the critical point exhibit the same singular asymptotic critical behavior as that of the lattice gas. Theory of critical phenomena predicts that the asymptotic thermodynamic behavior of fluids near the critical point can be described in terms of critical power laws and critical scaling laws [15,28]:

$\overline{\chi} = \Gamma_0^{\pm} t^{-\gamma}$, ($\Delta\overline{\rho} = 0$, $t \geq= 0$, and $\Delta\overline{\rho} = \Delta\overline{\rho}_{cxc}$), (11)

$\overline{C}_V = A_0^{\pm} t^{-\alpha}$, ($\Delta\overline{\rho} = 0$, the critical isochore), (12)

$\Delta\overline{\rho} = B_0 t^{\beta}$, ($\Delta\overline{\rho} = \Delta\overline{\rho}_{cxc}$, coexistence curve), (13)

$\Delta\overline{\mu} = D_0 \Delta\overline{\rho} |\Delta\overline{\rho}|^{\delta-1}$, ($t$=0, the critical isotherm), (14)

$\xi = \xi_0^{\pm} |t|^{-\nu}$, ($\Delta\overline{\rho} = 0$, $t \geq= 0$, and $\Delta\overline{\rho} = \Delta\overline{\rho}_{cxc}$), (15)

$\lambda \propto t^{-\gamma+\nu(1+z)}$, ($\Delta\overline{\rho} = 0$, $t \geq= 0$), (16)

$\eta \propto t^{\nu z}$, ($\Delta\overline{\rho} = 0$, $t \geq= 0$), (17)

where $\nu z$=0.04. In these equations $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, $\delta$, and ν are the universal critical exponents, while $\Gamma_0^{\pm}$, $A_0^{\pm}$, $B_0$, $D_0$, and $\xi_0^{\pm}$ are the system dependent (non-universal) critical amplitudes. However, between the six amplitudes there exist four universal relations [15,28]:

$$\frac{A_0^-}{A_0^+} = \left[(1-2\beta)/(\gamma-1)\right]^2 (b^2-1)^{\alpha}, \quad (18)$$

$$A_0^+ \Gamma_0^+ B_0^2 = \gamma(\gamma-1)(b^2-1)^{2\beta}/2\alpha b^2, \quad (19)$$

$$\frac{\Gamma_0^-}{\Gamma_0^+} = \frac{(1-2\beta)(b^2-1)}{2(\gamma-1)}, \quad (20)$$

$$\Gamma_0^+ D_0 B_0^{\delta-1} = b^{\delta-3}(b^2-1)^{\gamma-1}, \quad (21)$$

where $b^2 = (\gamma - 2\beta)/\gamma(1-2\beta)$, $t = (T - T_C)/T$, $\Delta\bar{\rho} = (\rho - \rho_C)/\rho_C$. Only two critical exponents and critical amplitudes are independent. There are other universal relations between the critical exponents, namely

$$\alpha + 2\beta + \gamma = 2, \quad \beta(\delta - 1) = \gamma \quad \text{and} \quad 2 - \alpha = \nu d,$$

where $d$ is the dimensionality of space. The range of validity of the critical power laws (11) to (17) is restricted to a very small range of temperatures ($t$<$10^{-2}$) and densities ( $\Delta\bar{\rho} < 0.25$) near the critical point. The theory of critical phenomena cannot predict the values of these non-universal constants, so it must be estimate from $C_V$ measurements. A number of universal relations exist between the various critical amplitudes (see Eqs. 18 to 21) and only two of them are independent. The theoretical values for these universal relationships are $\frac{A^+}{A^-} = 0.52$ and $A^+\Gamma^+B^2 = 0.056$.

For comparison with a real experiment, it is very important to allow for the non-asymptotic corrections to the asymptotical power laws (11) to (17), where more reliable data can be obtained, whereas in the asymptotic region, it is very difficult to obtain reliable experimental data because of the effects of gravity and other experimental difficulties. The critical fluctuations lead to the anomalous changes in the heat capacity $C_V$, isothermal compressibility $K_T$, *etc.*, in rather wide ranges of temperature and density around the critical point. In particular, for $CO_2$ this region extends over ranges $T_C \le T \le 333$ K in temperature and $380 \le \rho \le 635$ kg·m$^{-3}$ in density. In this region a crossover from the asymptotic (singular) to classical (regular) behavior of $C_V$ occurs (see sections 4.2 and 4.3). The allowance for the Wegner's [24-27] corrections makes it possible to describe the non-asymptotic behavior of $C_V$ and other thermodynamic functions along the critical isochore and coexistence curve and saturation density $\Delta\rho$ in the form

$$\frac{C_V T_C}{VP_C} = \frac{A^+}{\alpha} t^{-\alpha}\left[1 + A_1^+ t^{\Delta} + A_2^+ t^{2\Delta} + \cdots\right] - B_{cr} \quad \text{for } \rho = \rho_C,\ T \ge T_C, \tag{22}$$

$$\frac{C_V T_C}{VP_C} = \frac{A^-}{\alpha} t^{-\alpha}\left[1 + A_1^- t^{\Delta} + A_2^- t^{2\Delta} + \cdots\right] \quad \text{for } \rho = \rho_C \text{ at } T \le T_C, \tag{23}$$

$$\Delta\rho = B_0 t^{\beta}(1 + B_1 t^{\Delta} + B_2 t^{2\Delta} + \cdots) \quad \text{for } T \le T_C, \tag{24}$$

where $A^{\pm}$ and $B_0$ are the asymptotic critical amplitudes, and $A_i^{\pm}$ and $B_1$ are the critical amplitudes of the correction (nonasymptotic) terms of Wegner's expansion, and $\alpha$ = 0.112, $\beta$ = 0.325, and $\Delta$ = 0.51 are the universal critical exponents [28-30]. The numerical solution of the Ising lattice [26,27] also gives a similar series with a similar value for $\Delta$. The universal complexes constructed of the critical amplitudes of the asymptotic terms of Wegner's expansion have been studied in sufficient detail both theoretically and experimentally [31-37]. However, there are a number of universal relationships between the critical amplitudes of the non-asymptotic terms $A_i^{\pm}$ and $B_1$,

$$\frac{A_1^+}{\Gamma_1^+} = (\gamma + \Delta)\alpha/\gamma(\gamma - 1) \text{ and } \frac{A_1^+}{B_1} = \frac{2\alpha(\gamma + \Delta)(b^2 - 1)^{(\beta+\Delta)}}{\gamma(\gamma - 1)}, \tag{25}$$

which have not still received sufficient experimental confirmation. The theoretical values for these nonasymptotical universal relations are $\frac{A_1^+}{\Gamma_1^+} = 0.95$ and $\frac{A_1^+}{B_1} = 1.10 \pm$

0.25. Since the effect of fluctuations on the anomalous behavior of heat capacity decreases and the role of non-asymptotic corrections increases with going away from the critical point, it is obvious that there is a relation between the non-asymptotic critical amplitudes, the Ginzburg parameter $Gi$, and the crossover parameters [31,34]. A quantitative estimation of the effect of fluctuations on the critical behavior of heat capacity is given by the Ginzburg parameter $Gi$, which determines the limits of the region of applicability of the classical Landau theory. There are also the relations between Ginzburg parameter $Gi$ and the non-asymptotic critical amplitudes in Wegner's expansion $A_1^{\pm}$, $B_1$ and crossover parameters [31,34].

The experimental data on the heat capacity $C_V$ and the $T_S - \rho_S$ dependence at the coexistence curve provide to estimate the values of the critical amplitudes and test the theoretical prediction of the universal relations between them. The values of the critical amplitudes of asymptotic and non-asymptotic terms of Wegner's expansion, found from the experimental data, made it possible to calculate the value of the Ginzburg parameter $Gi$.

Anisimov et al. [38] studied the asymptotic critical amplitudes $A_0^+$ and $A_0^-$ of the isochoric heat capacity for light and heavy water. They reported updated values of the critical amplitudes and concluded that the critical amplitudes for $D_2O$ and $H_2O$ are very close. Kiselev et al. [39,40] obtained the values of these critical amplitudes from the crossover equation of state: $A_0^+ = 34.1$ and $A_0^- = 64.8$ for $D_2O$ ($A_0^+ / A_0^- = 0.526$) and $A_0^+ = 32.04$ and $A_0^- = 60.89$ for $H_2O$ ($A_0^+ / A_0^- = 0.526$). These values of the critical amplitudes $A_0^+$ and $A_0^-$ for $D_2O$ differ by about 6.5 % from the values for light water recommended by Anisimov et al. [38] ($A_0^+ = 32 \pm 1$ and $A_0^- = 61 \pm 2$). The values of the amplitude ratio of asymptotic terms $\frac{A^+}{A^-}$=0.536±0.005 ($A_0^- = 0.1212 \pm 0.03$; $A_0^+ = 0.0649 \pm 0.03$) for the isochoric heat capacity of toluene [41] along the critical isochore in the temperature ranges $T > T_C$ (single-phase) and $T < T_C$ (two-phase) are in good agreement with values predicted by theoretical models (Ising model $\frac{A^+}{A^-} = 0.523$ [33]; field theory $\frac{A^+}{A^-}$ = 0.541 [35]; and ε-expansion $\frac{A^+}{A^-}$ = 0.520 [35]). The accurate determination of the critical amplitudes for pure light and heavy water from the accurate isochoric heat capacity measurements along the critical isochores are presented by Polikhronidi et al. [122,123].

**3. Asymptotic Scaling Behavior of the Thermodynamic Properties of Fluid Mixtures near the Critical Points.** The equation of state of the scaling theory can be derived rigorously only for systems with isolated transition points described by two independent variables, *e.g.*, the critical point of pure liquids. The state of binary systems is described by three independent variables $T$, $\rho$, and $x$. Instead of the isolated critical point, there exists a line of the critical points in this case. The asymptotic behavior of isochoric heat capacity and other thermodynamic functions for mixtures near the critical point does not obey the laws that are valid for pure substances near the critical point (see Eqs. 7 to 17). The so-called renormalization of the critical exponents occurs for the fluid mixtures near the critical points. The principal concepts of the scaling hypothesis can successfully be applied to mixtures if the theory of isomorphism of critical

phenomena is used [42-50]. The main idea of the hypothesis of isomorphism is as follows. With a certain choice of isomorphic thermodynamic variables, the equation of state of a complex system (*e.g.*, mixtures) coincides with the behavior of the "ideal" system.

Near the critical lines, the behavior of a thermodynamic system may not obey simple power laws, but has a more complex, crossover character. In particular, the isochoric heat capacity of binary mixtures near the liquid-gas critical point may not to tend to infinity according to the power law $t^{-\alpha}$, as in the case of pure substances, but remains finite. The theory of isomorphism is based on the extending of the main ideas of the scaling hypothesis, which was first formulated for pure substances, onto binary mixtures. The main ideas of the hypothesis of isomorphism were formulated in [42-51]. Isomorphism means that with a proper choice of isomorphic variables, the thermodynamic potentials of various systems have identical functional relation with the temperature and the order parameter. In particular, a one-component liquid is isomorphic with the model of lattice gas if linear combinations of temperature and chemical potential are selected as the thermodynamic variables instead of the temperature and the potential themselves. Thus, the lattice gas serves as the ideal system for the one-component system. For binary systems, depending on the choice of the order parameter, the concentration difference $\Delta x(p) = x - x_c(p)$ or the reduced density $\Delta\rho(\tilde{\mu}) = \rho / \rho_c(\tilde{\mu}) - 1$, where $\tilde{\mu} = \mu_2 - \mu_1$ is the difference of chemical potentials of the pure components of the mixture two equivalent conditions for choosing the ideal system and isomorphic thermodynamic potentials exist. A one-component liquid can be selected as the ideal system for treating liquid-gas equilibria in mixtures, since at $x \to 0$ and $x \to 1$ the critical line terminates at the critical points of the pure components involved, and the order parameter $\Delta\rho(\tilde{\mu})$ of the mixture transforms into the order parameter of the pure substance $\Delta\rho$.

A comprehensive analysis of the consequences of the isomorphism principle to the critical behavior of mixtures has been presented by Anisimov et al. [44,48,49,52], recently Polikhronidi et al. [124,125]. According of the isomorphism principle near-critical behavior of binary fluids is controlled by two characteristic parameters $K_1$ and $K_2$ which are determined by the slope of the critical locus. The parameter $K_1$ is responsible for strongly divergent properties such as the isothermal compressibility $K_T$ and isobaric heat capacity $C_P$, while the parameter $K_2$ controls the deformation of weakly divergent properties like the isochoric heat capacity $C_V$ and defines the range of Fisher renormalization of the critical exponents [45]. The parameters $K_1$ and $K_2$ are defined as [53]

$$K_1 = \frac{x(1-x)}{\rho_C R T_C}\left[\frac{dP_C}{dx} - \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)^{c}_{\xi,\rho=\rho_C}\frac{dT_C}{dx}\right] \tag{26}$$

and

$$K_2 = \frac{x(1-x)}{T_C}\frac{dT_C}{dx}. \tag{27}$$

Correspondingly, two characteristic temperature differences $\tau_1$ and $\tau_2$ and two characteristic density differences $\Delta\bar{\rho}_1$ and $\Delta\bar{\rho}_2$ are defined through $K_1$ and $K_2$

$$\tau_1 = \left[\frac{\Gamma_0^+ K_1^2}{x(1-x)}\right]^{1/\gamma},\ \tau_2 = \left[\frac{A_0^+ K_2^2}{x(1-x)}\right]^{1/\alpha},\ \Delta\bar{\rho}_1 = B_0\tau_1^{\beta}, \text{ and } \Delta\bar{\rho}_2 = B_0\tau_2^{\beta}. \tag{28}$$

For $H_2O$, for example, the values of the asymptotic critical amplitude are $A_0^+ = 31.6$, $B_0$=1.98, and $\Gamma_0^+ = 0.058$. In dilute solution limit the expression between the brackets in equation (26) for the $K_1$ reduces to the Krichevskii parameter $K_{kr}$ [53]

$$K_{kr} = \lim\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{VT}^{C} = \frac{dP_C}{dx} - \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\xi,\rho=\rho_C}^{c} \frac{dT_C}{dx}. \qquad (29)$$

Along the critical isochore in the one-phase region all properties of a binary fluids mixture will exhibit the some behavior as those of a pure fluid in the range of temperatures $\tau >> \tau_1$ and $\tau >> \tau_2$. At $\tau_2 < \tau < \tau_1$ properties that exhibit strong singularities in one-component fluids (associated with the critical exponent $\gamma$) will reach a plateau, however, weakly singular properties (associated with the critical exponent $\alpha$) will continue to grow. At $\tau < \tau_2$ those properties that diverse weakly in one-component fluids will be saturated and all the critical exponents will be renormalized by a factor $1/(1-\alpha)$. In term of density, along the critical isotherm the behavior of all properties will be one-component-like at densities $|\Delta\overline{\rho}| >> \pm\Delta\overline{\rho}_1$ and Fisher renormalization occurs at $|\Delta\overline{\rho}| << \pm\Delta\overline{\rho}_2$ [52].

As a rule, near the liquid-gas critical points experiments are performed at constant $\rho$ and *x,* and are $\tilde{\mu}$ a function of temperature. This means that the experimental conditions are not isomorphic and, as was shown by Fisher [45,54], a renormalization of the critical exponents occurs, which means that the character of the anomalous behavior of isochoric heat capacity changes. A detailed analysis of the character of these renormalizations was performed in [47-51,55-57]. The hypothesis of isomorphism was verified microscopically using functional-analysis methods of statistical physics [58,59] and in solutions to various lattice models of binary mixtures [60-62]. The theory of isomorphism is used as the basis for deriving isomorphic equations of state near the line of critical points.

The isomorphic crossover equation of state for binary mixtures [47,55-57,63-71] allows for two possible types of renormalization of the critical exponent $\alpha$ for isochoric heat capacity in binary mixtures. At $\varphi$<<1 (where $\varphi = r(x)\xi^{1/\alpha}$) and $q$<<1 (where $q = tGi^{-1}$), Fisher's renormalization $\alpha \to -\alpha/(1-\alpha)$ takes place and the singular part of heat capacity tends to a constant value [57]

$$C_{VX}^{\sin} \cong A\xi\left[1 - \xi\left|\Delta t(x)\xi\right|^{\alpha/(1-\alpha)}\right] \cong ak\xi, \qquad (30)$$

where $A = ak\gamma(\gamma-1)/2\alpha b^2$ is the critical amplitude of heat capacity, $C_V$, and $\Delta t = T/T_C(x) - 1$.

The parameter $\varphi$ determines the renormalization of the critical exponent $\alpha$ of the heat capacity (Fisher's renormalization [45,54]). The parameter $\xi$ is determined by the non-universal parameters and universal critical exponents as follows

$$\xi = \frac{(1-\alpha)T_C^2}{Ax(1-x)}\left[\frac{dT_C}{dx}\right]^{-2}. \qquad (31)$$

Thus, in binary mixtures, an intermediate temperature region appears at $\Delta t \to 0$, in which the effective critical exponent $\alpha_{eff} \cong 0$ while the parameters *a* and *k* remain finite.

In another limit ($\varphi$>>1, $q$>>1), there occurs a renormalization (or crossover) of the type "fluctuational behavior (scaling) to mean field (Landau behavior)."

However, in this case the amplitude of the singular part of heat capacity must decrease with increasing parameter $q$ (decreasing Ginzburg parameter). Sharp changes in the parameter $q$ when treating experimental $C_{VX}$ data in terms of isomorphic crossover equation of state just indicate the renormalization of the second type. Intermediate cases are also possible. The effective critical exponent of $C_{VX}$ $\alpha_{eff}$ ($0 \le \alpha_{eff} \le 0.112$) depend on the parameters $q$, $\varphi$.

Along the critical isochores $\rho = \rho_C(x)$, the isochoric heat capacity of a binary mixture may be represented in the form [57,72,73]

$$\frac{C_{VX}}{T} = A^* \phi_{C_V}(q) + B^*, \qquad (32)$$

where $A^*$ and $B^*$ are non-universal constants; $\phi_{C_V}(q)$ is the universal crossover function for the heat capacity of the mixture [57]

$$\phi_{C_V}(q) = q^{-\alpha} R^{\alpha}(q) \left\{ 1 + \left[ \frac{2\alpha}{(1-\alpha)} \right] q \left( \frac{R'}{R} \right) + \left[ \frac{\alpha q^2}{(1-\alpha)(1-\alpha)} \right] \left[ \frac{R''}{R} - 1 - \alpha \left( \frac{R'}{R} \right)^2 \right] \right\}, \qquad (33)$$

where $R'(q)$ and $R''(q)$ are the first and second derivatives of the function $R(q) = 1 + q^2/(b_0 + q)$ with respect to $q$. The value of $\alpha$ usually fixed at theoretical values ($\alpha$=0.112); the parameters $A^*$, $B^*$, $b_0$, and $Gi$ were considered as non-universal adjustable constants. It can be seen from Eq. (32) that at $q << 1$ the crossover function $R(q) \cong 1$ and Eq. (32) transformed into the crossover equation for pure substance, and, therefore, the heat capacity $C_{VX}$ along the critical isochore behaves as that for pure substance

$$\frac{C_{VX}}{T} = A^* t^{-\alpha} + B^* \qquad (34)$$

At $q >> 1$, the Fisher renormalization [45,54] $\alpha \to -\alpha/(1-\alpha)$ of the singular part of heat capacity $C_{VX}$ occurs at $t \to 0$. The ($T_C$,$x$) experimental data can be used to determine the values of the derivative $dT_C/dx$ and estimate the values of crossover parameter from Eq. (31) which determined asymptotic behavior of heat capacity for mixtures near the critical line. In solutions of electrolytes, where strong long-range interactions are predominant, the Ginzburg parameter is small and a temperature range $Gi \le \Delta t \le 1$ appears where the Landau theory, the mean-field theory ($\alpha$=0, $\beta$=0.5) is valid. When the Ginzburg parameter is very small ($Gi \cong 10^{-12}$ to $10^{-8}$), the singular part of the free energy is negligible in the whole range of experimentally achievable temperatures, and the heat capacity of such a system is an analytic function of temperature and density. The values $Gi \cong 10^{-3}$ to $10^{-2}$ correspond to an intermediate region, where a crossover from the fluctuation behavior of the system ($\alpha_{eff}$ = 0.11, $\Delta t << Gi$) to the mean-field behavior with the suppression of long-wavelength fluctuations ($\alpha_{eff}$=0, $\Delta t >> Gi$) occurs. Dilute aqueous solutions of electrolytes can be classified to such systems.

**4. Scaling Type Equations of State for Pure Fluids.** The classical equations of state do not ensure the universality of the description of the thermodynamic behavior of real liquids, particularly isochoric heat capacity. In this section we will give the review of the scaling type equation of state for pure fluids which used to accurate calculate the thermodynamic properties nearcritical and supercritical fluids.

**4.1. Extended Parametric Equation of State.** To represent thermodynamic properties of nearcritical and supercritical fluids the extended parametric scaling - type EOS are using [47,74,75,77,126]. This type scaling EOS defined as

$$\Delta\mu = ar^{\beta\delta}\theta(1-\theta)^2 + cr^{\beta\delta+\Delta}\theta, \quad (35)$$

$where $\Delta\mu = \mu - \mu_0(T)$, $\mu$ is the chemical potential, $\mu_0(T)$ is the analytical background of the chemical potential, *a* and *c* are the system-dependent parameters, $\beta$, $\delta$, and $\Delta$ are the universal critical exponents, *r* and $\theta$ are the parametric variables. Transformation thermodynamic parameters *T* and $\rho$ to parametric variables are defined as

$$t = r(1-b^2\theta^2) \quad \text{and} \quad \Delta\rho = kr^{\beta}\theta, \quad (36)$$

where $b^2$ is the universal parameter defining by the universal critical exponents [28-30], $t = (T - T_C)/T_C$, $\Delta\rho = (\rho - \rho_C)/\rho_C$, and $k = (b^2 - 1)/x_0$, $x_0$ is the values of scaling variable $x = t/|\Delta\rho|^{1/\beta}$ on the coexistence curve. The equation in terms of pressure derived from (35) is

$$\Delta P = (1+\Delta\rho)\Delta\mu - \Phi(r,\theta) - \Phi_0(T), \quad (37)$$

where

$$\Phi(r,\theta) = \frac{ak}{2b^4} r^{2-\alpha}\left[\frac{2\beta(b^2-1)}{2-\alpha} + \frac{2\beta(2\gamma-1)}{\gamma(1-\alpha)}(1-b^2\theta^2) + \frac{(2\beta-1)}{\alpha}(1-b^2\theta^2)^2\right] - \frac{kc}{2b^2}\frac{r^{2-\alpha+\Delta}}{1-\alpha+\Delta}\left[(1-2\beta)b^2\theta^2 - \frac{\gamma+\Delta}{2-\alpha+\Delta}\right], \quad (38)$$

and analytical function of temperature $\Phi_0(T)$ is

$$\Phi_0(T) = a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3. \quad (39)$$

The scaling behavior of the isochoric and isobaric heat capacities from this EOS defined as

$$\frac{\rho C_V}{T} = \frac{P_C}{T_C^2}\left[\frac{ak}{2\alpha b^2}\gamma(\gamma-1)r^{-\alpha} - \frac{kc}{2b^2}(\gamma+\Delta)\frac{r^{-\alpha+\Delta}}{1-(1-2\beta)b^2\theta^2} - \mu^{"}(\rho_C,T)\Delta\rho + f_0(T)\right], \quad (40)$$

where $f_0(T) = f_1 + f_2 t$ and $\mu^{"}(\rho_C,T) = m_1 + m_2 t$ are the analytical functions of reduced temperature and

$$\frac{\rho C_P}{T} = \frac{P_C}{T_C^2}\left[\frac{ak}{2\alpha b^2}\gamma(\gamma-1)r^{-\alpha} - \frac{kc}{2b^2}(\gamma+\Delta)\frac{r^{-\alpha+\Delta}}{1-(1-2\beta)b^2\theta^2} + (1+kr^{\beta}\theta)^{-2}\left\{akr^{1-\alpha}(s_0(\theta)+\gamma\theta^2) + ar^{\beta\delta-1}\gamma\theta + cr^{\beta\delta-1+\Delta}\frac{(\gamma+\Delta)\theta}{1-(1-2\beta)B^2\theta^2} + F\right\}^2\Psi\right] \quad (41)$$

$$F = ckr^{1-\alpha+\Delta}\left[\frac{(\gamma+\Delta)\theta^2}{1-(1-2\beta)B^2\theta^2} - \frac{(\gamma+\Delta)}{2B^2(1-\alpha+\Delta)}\right] - f^{'}(\tau), \quad (42)$$

$$\Psi = kr^{-\gamma}\left\{a\left(1+\frac{2\beta\delta-3}{1-2\beta}\theta^2\right) + cr^{\Delta}\left[1+\frac{2(\gamma+\Delta)B^2\theta^2}{1-(1-2\beta)B^2\theta^2}\right]\right\}^{-1} - (1+kr^{\beta}\theta)\mu^{"}(\upsilon_C,\tau) - f^{"}(\tau), \quad (43)$$

where $s_0(\theta) = s_{00} + s_{02}\theta^2$, $s_{00}$ and $s_{02}$ are the universal constants [47,74,75,77]. This type EOS was used to represent experimental thermodynamic properties some pure fluids ($CO_2$, $H_2O$, n-alkane) in the critical and supercritical ranges.

**4.2. Parametric Crossover Equation of State.** In this section, we consider the parametric crossover EOS for pure fluids in the critical and supercritical regions. In this model the dimensionless Helmholtz free energy is written in the form [39]

$$\overline{\rho}\overline{A}(T,\rho) = \Delta\overline{A}(\tau,\Delta\rho) + \overline{\rho}\overline{\mu}_0(T) + \overline{A}_0(T), \quad (44)$$

where $\Delta\overline{A}$ includes the critical contribution to the Helmholtz free energy, while $\overline{\mu}_0(T)$ and $\overline{A}_0(T)$ are the analytic functions of temperature which are represented by truncated Taylor expansions

$$\bar{\mu}_0(T) = m_0 + \sum_{j=1} m_j \tau^i \ , \ \bar{A}_0(T) = -1 + \sum_{j=1} A_j \tau^j \qquad (45)$$

In Eqs. (44) and (45) $A$ is the Helmholtz free energy per mole, $\rho$ is the density, $T$ is the temperature, and the thermodynamic quantities were made dimensionless with the aid of the critical temperature $T_C$, the critical density $\rho_C$, and the critical pressure $P_C$ as

$$\bar{T} = \frac{T}{T_C} \ , \ \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_C} , \ \bar{A} = \frac{\rho_C A}{P_C} \text{ and } \tau = \bar{T} - 1 = \frac{T - T_C}{T_C} , \quad \tau = \bar{\rho} - 1 = \frac{\rho - \rho_C}{\rho_C} \qquad (46)$$

The part of the Helmholtz free energy $\Delta\bar{A}$ which incorporates the effect of the long-range critical fluctuations is represented in the form

$$\Delta\bar{A}(r,\vartheta) = kr^{2-\alpha} R^{\alpha}(q) \left[ a\Psi_0(\vartheta) + \sum_{i=1}^{4} c_i r^{\Delta_i} R^{-\bar{\Delta}_i}(q) \Psi_i(\vartheta) \right], \qquad (47)$$

$$\Psi_i(\vartheta) = \sum_{j=0}^{5} \alpha_{ij} \vartheta^j \quad (i=0,1,\ldots\ldots,5), \qquad (48)$$

where the parameters $r$ and $\vartheta$ are defined by

$$\tau = r(1 - b^2 \vartheta) , \qquad (49)$$

$$\Delta\rho = kr^{\beta} R^{-\beta+1/2}(q)\vartheta + d_1 \tau , \qquad (50)$$

and where $\alpha$ ,$\beta$, and $\Delta_i$ are the universal critical exponents, $b^2$ is the universal linear-model parameter, $k$, $d_i$ ,and $c_i$ are system-dependent coefficients, while $R(q)$ and $\Psi_i(\vartheta)$ are universal functions (see Table 1). The crossover function $R(q)$ is defined by the expression

$$R(q) = \left( 1 + \frac{q^2}{1+q} \right)^2 , \qquad (51)$$

where the crossover parameter $q$ is related to the parametric variable $r$ by

$$q = (rg)^{1/2} . \qquad (52)$$

The system-dependent coefficient $g$ is proportional to the inverse Ginzburg number $Gi$. In the critical region at $rg<<1$ (or $|\tau| << Gi$ at the critical isochore and along the coexistence curve), $R(q)=1$ and Eq. (47) reproduces a Wegner expansion for the 3-dimensional Ising-like systems [24,25]

$$\Delta\bar{A}(\tau,\Delta\rho) = kr^{2-\alpha} \left[ \bar{a} f_0(\Delta\rho / |\tau|^{\beta}) + \sum_{i=1}^{4} \bar{c}_i \tau^{\Delta_i} f_i(\Delta\rho / |\tau|^{\beta}) \right]. \qquad (53)$$

For the large values of the variable $q$ at $rg>>1$ ($|\tau| >> Gi$), the crossover function $R(q)$ modifies each term in Eq. (47), therefore they all become analytic, and Eq. (47) is transformed into the extended Landau expansion

$$\Delta\bar{A}(\tau,\Delta\rho) = \sum_{i=0}^{2} \sum_{j=1}^{5} \bar{\alpha}_{ij} \tau^i \Delta\rho^j , \qquad (54)$$

which corresponds to the classical mean-field theory. In the range where $r \approx g$ ($|\tau| \approx Gi$), a crossover from the singular critical behavior to the analytic classical behavior are takes place.

All universal parameters for the parametric crossover model are listed in Table 2. A good description of experimental data with the parametric crossover model was achieved in the range of temperatures and densities bounded by

$$\tau + 0.625(\Delta\rho)^2 \le 0.25 , \qquad T \ge 0.995 T_C . \qquad (55)$$

In this region, the crossover model reproduces the data within their experimental uncertainty. This crossover model has been used to describe thermodynamic properties near-critical and supercritical toluene and benzene [64,65,76]. Figures 2 and 3 shows the comparison between experimental $C_P$ and $C_V$ data for pure water and carbon dioxide with values calculated with crossover model (44).

**4.3. Crossover Six-Term Landau Expansion for the Helmholtz-Energy Density of Pure Fluids.** Wyczalkowska et al. [78] have developed a representation of the thermodynamic properties of pure fluids in terms of an alternative crossover equation of state. The Helmholtz-energy density is defined as

$$\bar{A}(\bar{T},\bar{\rho}) = \Delta\bar{A} + \bar{\rho}\bar{\mu}_O(\Delta\bar{T}) + \bar{A}_O(\Delta\bar{T}), \tag{56}$$

where $\bar{\mu}_O(\Delta\bar{T})$ and $\bar{A}_O(\Delta\bar{T})$ are analytic background functions which are being represented by truncated Taylor expansions [79,80]:

$$\bar{A}_O(\Delta\bar{T}) = -1 + \sum_{k=1}^{4} \bar{A}_k (\Delta\bar{T})^k, \quad \bar{\mu}_O(\Delta\bar{T}) = \sum_{k=0}^{3} \bar{\mu}_k (\Delta\bar{T})^k, \tag{57}$$

where $\Delta\bar{A}$ is the affected by the critical fluctuations and can be incorporated into the Helmhotz-energy density by converting classical mean-field theory expression for $\Delta\bar{A}$ (Landau expansion) into the following equation [81-84]

$$\Delta\bar{A}_X = \frac{1}{2}tM^2\Gamma D + \frac{u^*\bar{u}\Lambda}{4!}M^4D^2U + \frac{1}{5!}a_{05}M^5D^{5/2}VU + \frac{1}{6!}a_{06}M^6D^3U^{3/2} + \frac{1}{4!}a_{14}tM^4\Gamma D^2U^{1/2} + \frac{1}{2!2!}a_{22}t^2M^2\Gamma^2DU^{-1/2} - \frac{1}{2}t^2K, \tag{58}$$

where $\Gamma, D, U, V,$ and $K$ are rescaling functions, which are defined in terms of a crossover function $Y$ as [79]

$$\Gamma = \mathrm{Y}^{(2\nu-1)/\Delta_S}, \; D = \mathrm{Y}^{-\eta\nu/\Delta_S}, \; U = \mathrm{Y}^{\nu/\Delta_S}, \; V = \mathrm{Y}^{(\Delta_A - 1/2)/\Delta_S}, \tag{59}$$

and

$$K = \frac{\nu}{\alpha\bar{u}\Lambda}(\mathrm{Y}^{-\alpha/\Delta_S} - 1) \tag{60}$$

In Eq. (58) $u^*$=0.472 is a universal "fixed-point" coupling constant $\eta, \nu, \alpha = 2 - 3\nu$ are universal critical exponents ($\nu$=0.63, $\eta$=0.03333) for the asymptotical critical behavior, $\Delta_S$=0.51 and $\Delta_A$=1.32 are the universal critical exponents for the leading symmetric and asymmetric correlation terms to the asymptotic critical behavior [85], $\bar{u}$ and $\Lambda$ (crossover parameters) are two parameters that govern the crossover from asymptotic singular critical behavior to the asymptotic classical critical behavior [86].
The crossover function $Y$ in Eq. (60) can be determined from equation [79,81,87]

$$1 - (1-\bar{u})Y = \bar{u}Y^{\nu/\Delta_S}\left[1 + \left(\frac{\Lambda}{k}\right)^2\right]^{1/2}, \tag{61}$$

where

$$k^2 = t\Gamma + \frac{u^*\bar{u}\Lambda}{2}M^2DU + \frac{1}{3!}a_{05}M^3D^{3/2}VU + \frac{1}{4!}a_{06}M^4D^2U^{3/2} + \frac{1}{2}a_{14}tM^2\Gamma DU^{1/2} + \frac{1}{2}a_{22}t^2\Gamma^2U^{-1/2}, \tag{62}$$

The function $k$, defined by Eq. (62), serves as a measure of distance from the critical point. The singular asymptotic critical behavior is recovered as $Y \to 0$ and $\Lambda/k \to \infty$ and the classical (Landau) expansion for the Helmholtz-energy density is recovered as $Y \to 1$ and $\Lambda/k \to 0$. The Landau variables $t$ and $M$ are related to $\Delta\bar{T}$ and $\Delta\bar{\rho}$ by following transformation [79,84]:

$$t = C_t \Delta\bar{T} + C\left(\frac{\partial \Delta\bar{A}_x}{\partial M}\right)_t \qquad \text{and} \quad M = C_\rho(\Delta\bar{\rho} - d_1\Delta\bar{T}) + C\left(\frac{\partial \Delta\bar{A}_x}{\partial t}\right)_M , \qquad (63)$$

where $C_t$, $C_\rho$, $C$, and $d_1$ are system - dependent (scaling-field) parameters. The corresponding expression for $\Delta\bar{A}$ in Eq. (56) is [79,84]

$$\Delta\bar{A} = \Delta\bar{A}_x - C\left(\frac{\partial \Delta\bar{A}_x}{\partial M}\right)_t\left(\frac{\partial \Delta\bar{A}_x}{\partial t}\right)_M \qquad (64)$$

The coefficients $C_t$ and $C_\rho$ determine the amplitudes of the asymptotic critical power laws, while $C$ and $d_1$ are coefficients related to asymmetric corrections to the asymptotic symmetric Ising-like critical behavior. The system - dependent parameters $\bar{u}$, $\Lambda$, $C_t$, $C_\rho$, $C$, and $d_1$ in the crossover equation of state , the coefficients $a_{ij}$ of the higher -order terms in the Landau expansion and the coefficients $A_k$ ($k$≥1) in the classical background contribution to $\bar{A}$ can be determined from a fit of the crossover equation to experimental pressure data. The coefficients $\mu_k$ ($k$≥2) in the expansion $\mu_0(\Delta\bar{T})$ determine the classical background to the specific heat capacity. The crossover Eq. (56) was applied to light and heavy water [78,83]. A good description of the experimental data for light water was achieved in the range $\rho$>165 kg·m$^{-3}$, $T$>630 K, and $\bar{\chi}^{-1} > 2$.

**5. Scaling Type Equations of State for Fluid Mixtures.**

**5.1. Asymptotic Crossover Models.** Belyakov et al. [66] developed a new parametric crossover model for the phase behavior of $H_2O$+NaCl solutions that corresponds to the Leung-Criffiths model in the critical region and is transformed into the regular classical expansion far away from the critical point. The model is optimized, and leads to excellent agreement with vapor-liquid equilibrium data for dilute aqueous solutions of NaCl. This crossover model is capable of representing the thermodynamic surface of $H_2O$+NaCl solutions in the critical region. The system-dependent constant of the model are: the critical parameters $T_C(x)$, $P_C(x)$, and $\rho_C(x)$; the asymptotic critical amplitudes $C_i$ ($i$=1-5), where $C_4$ is the heat capacity background amplitude; the Ginzburg number $Gi$; and the coefficients $A_i$ ($i$=1-3) in the analytical part of the thermodynamic potential. These constants can be determined by using the experimental critical parameter data and $P$-$T$ and $P$-$\rho$ equilibrium data from the literature. The structure of the crossover free-energy for binary mixtures was developed by Kiselev [67]. In accordance with the principle of the critical-point universality [42,43,51,54] with appropriately chosen thermodynamic variables, or the so-called isomorphic variables, the thermodynamic potential of binary mixtures has the same form as the thermodynamic potential of a one -component fluid. Therefore, the isomorphic free-energy density of a binary mixture is given by

$$\rho\bar{A}(T,\rho,\bar{x}) = \rho A(T,\rho,x) - \rho\bar{\mu}(T,\rho,\bar{x}), \qquad (65)$$

where $\bar{\mu} = \mu_2 - \mu_1$ is the difference in the chemical potentials $\mu_1$ and $\mu_2$ of the mixture components, $x = N_2/(N_1 + N_2)$ is the mole fraction of the second component in the mixture, $\rho A(T,\rho,x)$ is the Helmholtz free-energy density of the mixture, and the isomorphic variable $\bar{x}$ is related to the field variable $\zeta$ by the relation

$$\bar{x} = 1 - \zeta = \frac{e^{\bar{\mu}/RT}}{1 + e^{\bar{\mu}/RT}} . \qquad (66)$$

The relation between the concentration $x$ and the isomorphic variable $\bar{x}$ is

$$x = -\bar{x}(1-\bar{x})\left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial \bar{x}}\right)_{T,\rho}\frac{1}{RT}, \tag{67}$$

where $R$ is the universal gas constant. At fixed $\bar{x}$ the isomorphic free-energy density $\rho\bar{A}(T,\rho,\bar{x})$ is same function of $T$ and $\rho$ as the Helmholtz free-energy density of a one-component fluid. Therefore, the isomorphic free-energy density of binary mixtures is

$$\frac{\rho\bar{A}(T,\rho,\bar{x})}{R\rho_{CO}T_{CO}} = \bar{k}r^{2-\alpha}R^{\alpha}(q)\left[\bar{a}\Psi_0(\vartheta)+\sum_{i=1}^{4}\bar{c}_i r^{\Delta_i}R^{-\bar{\Delta}i}(q)\Psi_i(\vartheta)\right]+\sum_{i=1}^{4}\left(\bar{A}_i+\frac{\rho}{\rho_{CO}}\bar{m}_i\right)\tau^i(\bar{x})-\frac{P_{CO}(\bar{x})}{R\rho_{CO}T_{CO}}++\frac{\rho T}{\rho_{CO}T_{CO}}[\ln(1-\bar{x})+\bar{m}_O], \tag{68}$$

where

$$\tau = \frac{T}{T_C(\bar{x})}-1 = r(1-b^2\vartheta^2) \text{ and } \Delta\rho = \frac{\rho}{\rho_C(\bar{x})}-1 = \bar{k}r^{\beta}R^{-\beta+1/2}(q)\vartheta+\bar{d}_1\tau, \tag{69}$$

where all non-universal parameters are analytic functions of the isomorphic variable $\bar{x}$, $k$, $d_i$, and $c_i$ are the system-dependent coefficients, while $R(q)$ and $\Psi_i(\vartheta)$ are universal functions (see Table 2). The expression for the calculation of pressure $P$, isochoric heat capacity $C_{VX}$, isobaric heat capacity $C_{PX}$, and sound of velocity $W$ using the present crossover model are

$$\Delta\tilde{A}(\tau,\Delta\rho,\tilde{x}) = \tilde{k}r^{2-\alpha}R^{\alpha}(q)\left[\tilde{a}\Psi_0(\vartheta)+\sum_{i=1}^{4}\tilde{c}_i r^{\Delta_i}R^{-\bar{\Delta}_i}(q)\Psi_i(\vartheta)\right], \tag{70}$$

$$\tilde{A}_0(T,\tilde{x}) = \sum_{i=1}^{4}\tilde{A}_i\tau^i(\tilde{x})-\frac{P_C(\tilde{x})}{RT_{C0}\rho_{C0}},$$

$$\frac{d\tilde{m}_0}{d\tilde{x}} = \frac{1}{RT_C\rho_C}\frac{dP_C}{d\tilde{x}}+(\tilde{A}_1+\tilde{m}_1)\frac{\rho_{C0}}{\rho_C}\frac{T_{C0}}{T_C^2}\frac{dT_C}{d\tilde{x}},$$

$$\frac{P(\rho,T,\tilde{x})}{RT_{C0}\rho_{C0}} = \frac{\rho}{\rho_C}\left(\frac{\partial\Delta\tilde{A}}{\partial\Delta\rho}\right)_{\tau,\tilde{x}}-\Delta\tilde{A}-\tilde{A}_0, \tag{71}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\rho,x} = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\rho,\tilde{x}}+\left(\frac{\partial P}{\partial\tilde{x}}\right)_{\rho,T}\left(\frac{\partial\tilde{x}}{\partial T}\right)_{\rho,x},$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T,x} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T,\tilde{x}}+\left(\frac{\partial P}{\partial\tilde{x}}\right)_{T,\rho}\left(\frac{\partial\tilde{x}}{\partial \rho}\right)_{T,x},$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{T,\rho} = \left(\frac{\partial P}{\partial\tilde{x}}\right)_{T,\rho}\left(\frac{\partial\tilde{x}}{\partial x}\right)_{T,\rho},$$

$$\frac{\rho C_{V,x}(T,\rho,\tilde{x})}{TRT_{C0}\rho_{C0}} = -\left(\frac{\partial^2\Delta\tilde{A}}{\partial T^2}\right)_{\rho,\tilde{x}}-\left(\frac{\partial^2\tilde{A}_0}{\partial T^2}\right)_{\tilde{x}}-\frac{\rho}{\rho_{C0}}\left(\frac{\partial^2\tilde{M}_0}{\partial T^2}\right)_{\tilde{x}}- \tag{72}$$

$$-\left[\left(\frac{\partial^2\Delta\tilde{A}}{\partial T\partial\tilde{x}}\right)+\left(\frac{\partial^2\tilde{A}_0}{\partial T\partial\tilde{x}}\right)+\frac{\rho}{\rho_{C0}}\left(\frac{\partial^2\tilde{M}_0}{\partial T\partial\tilde{x}}\right)\right]\left(\frac{\partial\tilde{x}}{\partial T}\right)_{\rho,x},$$

with

$$\tilde{M}_0(T,\tilde{x}) = \sum_{i=1}^{4}\tilde{m}_i\tau^i(\tilde{x})+\frac{\rho_C T}{T_{C0}\rho_{C0}}\left[\ln(1-\tilde{x})+\tilde{m}_0\right],$$

$$C_{P,x}(T,\rho,\tilde{x}) = C_{V,x}(T,\rho,\tilde{x}) + \frac{T}{\rho^2}\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)^2_{\rho,x}\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)^{-1}_{T,x}, \quad (73)$$

$$W(T,\rho,\tilde{x}) = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T,x}\frac{C_{P,x}}{C_{V,x}}\right]^{1/2}, \quad (74)$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{x}}{\partial T}\right)_{\rho,x} = -\left(\frac{\partial x}{\partial T}\right)_{\rho,\tilde{x}}\left(\frac{\partial \tilde{x}}{\partial x}\right)_{\rho,T},$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{x}}{\partial \rho}\right)_{T,x} = -\left(\frac{\partial x}{\partial \rho}\right)_{T,\tilde{x}}\left(\frac{\partial \tilde{x}}{\partial x}\right)_{\rho,T},$$

$$x = \tilde{x} - \tilde{x}(1-\tilde{x})\frac{\rho_{C0}T_{C0}}{\rho T}\left[\left(\frac{\partial \Delta\tilde{A}}{\partial \tilde{x}}\right)_{\rho,T} + \left(\frac{\partial \tilde{A}_0}{\partial \tilde{x}}\right)_T + \frac{\rho}{\rho_{C0}}\left(\frac{\partial \Delta\tilde{M}_0}{\partial \tilde{x}}\right)_T\right],$$

$$\Delta\tilde{M}_0 = \tilde{M}_0 - \frac{T}{T_{C0}}\ln(1-\tilde{x}).$$

The critical curves were expressed as

$$T_C(\bar{x}) = T_{CO}(1-\bar{x}) + T_{C1}\bar{x} + \bar{x}(1-\bar{x})\sum_{i=1}^{2} T_i(1-2\bar{x})^i, \quad (75)$$

$$\rho_C(\bar{x}) = \rho_{CO}(1-\bar{x}) + \rho_{C1}\bar{x} + \bar{x}(1-\bar{x})\sum_{i=0}^{2} \rho_i(1-2\bar{x})^i, \quad (76)$$

$$P_C(\bar{x}) = P_{CO}(1-\bar{x}) + P_{C1}\bar{x} + \bar{x}(1-\bar{x})\sum_{i=0}^{2} P_i(1-2\bar{x})^i, \quad (77)$$

where subscript 0 and 1 correspond to the first and second components of the mixture, respectively. Along the critical line $\bar{x} = x$ and
$T_C(\bar{x}) = T_C(x)$, $\rho_C(\bar{x}) = \rho_C(x)$, and $P_C(\bar{x}) = P_C(x)$.

To represent all of the system-dependent parameters $\bar{d}_1(\bar{x}), \bar{k}(\bar{x}), \bar{a}(\bar{x}), \bar{c}_i(\bar{x}), \bar{g}(\bar{x}), \bar{m}_i(\bar{x})$, and $\bar{A}_i(\bar{x})$ the isomorphic generalization of the law of corresponding states (LCS) developed by Kiselev and Povodyrev [55] can be used. Following the generalization of the law of corresponding states Kiselev and Povodyrev [55] the dimensionless coefficients $\bar{d}_1(\bar{x}), \bar{k}(\bar{x}), \bar{g}(\bar{x})$ can be written in the form

$$\bar{k}_i(\bar{x}) = k_{io} + (k_{i1} - k_{io})\bar{x} + k_i^{(1)}\Delta Z_C(\bar{x}), \quad (78)$$

and all others coefficients are given by

$$\bar{k}_i(\bar{x}) = \frac{P_C(\bar{x})}{R\rho_{CO}T_{CO}}[k_{io} + (k_{i1} - k_{io})\bar{x} + k_i^{(1)}\Delta Z_C(\bar{x})], \quad (79)$$

where $\Delta Z_C(\bar{x}) = Z_C(\bar{x}) - Z_{CID}(\bar{x})$ is the difference between the actual compressibility factor of a mixture $Z_C(\bar{x}) = \frac{P_C(\bar{x})}{R\rho_c(\bar{x})T_c(\bar{x})}$ and its ideal part $Z_{CID}(\bar{x}) = Z_{CO}(1-\bar{x}) + Z_{C1}\bar{x}$.

In the context of the law of corresponding states, the mixing coefficients $k_i^{(1)}$ are universal constants for all binary mixtures of simple fluids [67,71]. For mixtures with $\Delta Z_C$ >0.06, one needs to use an extended version of the law of corresponding states with additional terms quadratic in $\Delta Z_C(\bar{x})$. This crossover Eq. (68) has been applied for

dilute aqueous NaCl solutions [66] and aqueous toluene [76] mixtures near the critical point of pure water. The values of the parameters $T_i, P_i, \rho_i$ can be finding from the fit of Eq. (68) to the experimental $T_C - x, P_C - x, \rho_C - x$ data.

In the works [40,64,70,71] for Type I binary mixtures, the functions $T_C(\bar{x})$, $\rho_C(\bar{x})$, and $P_C(\bar{x})$ were represented as simple polynomial forms of $\tilde{x}$ and $(1-\tilde{x})$. Water + toluene and water + n-hexane system corresponds to a Type III mixture, in which the VLE critical locus at high pressures is transformed into the LLE critical locus that is disconnected from the critical point of pure solute - toluene. Therefore, for $T_C(\bar{x})$ and $\rho_C(\bar{x})$ in dilute water + toluene solutions ($x \le 0.15$) Kiselev et al. [76] used the same expressions as in papers [40,64,70,71,127] Eqs. (75) and (76) while the critical pressure $P_C(\bar{x})$ is expressed as a function of $T_C(\bar{x})$

$$P_c(\tilde{x}) = \begin{cases} P_{c0} + \sum_{i=1} P_i \left(T_c(\tilde{x}) - T_{c0}\right)^i, & T_{\min}^c < T_c(\tilde{x}) \le T_{c0} \\ P_{c1}, \quad \tilde{x} = 1 \end{cases}, \qquad (80)$$

where $T_{\min}^c$ is the lowest critical temperature at the $P_C$ - $T_C$ critical locus, and the subscripts *c0* and *c1* correspond to the pure solvent (water) and solute (toluene), respectively.

The range of validity of the parametric crossover model is

$\tau + 1.2\Delta\rho^2 \le 0.5, \quad T \ge 0.98 T_c$.

**5.2. Crossover Six-Term Landau Expansion for the Helmholtz-Energy Density of Fluids Mixtures.** Abdulkadirova et al. [53] developed an accurate crossover equation of state to represent the thermodynamic properties of mixtures of light and heavy water in the critical region. A crossover equation of state previously developed for pure components (see section 4.3) extended to the mixtures on the basis of the principle of isomorphism of the critical phenomena. This equation represents the thermodynamic properties of mixtures of light and heavy water in the same range of temperatures and densities as for the pure components. The isomorphic Helmholtz-energy density $\tilde{A} = \rho A T_C / T P_C$ [53] is

$$\hat{A}_{iso}(\tau, \rho, \zeta) = \frac{P_C(\zeta)}{R T_C(\zeta)} \left[\Delta\tilde{A}(\tau, \Delta\tilde{\rho}, \zeta) + \tilde{A}_0(\tau, \zeta) + \rho h_0(\tau, \zeta)\right], \qquad (81)$$

where $\hat{A} = \rho\tilde{A} P_C / R T_C$, $\Delta\tilde{A}(\tau, \Delta\tilde{\rho}, \zeta)$ is the represent the contribution that is affected by the critical fluctuations (see Eq. 58, where system-dependent coefficients $a_{ij}(\zeta)$ are function of $\zeta$), $\tilde{A}_0(\tau, \zeta)$ and $h_0(\tau, \zeta)$ are analytic background functions which are can be represent as truncated Taylor series expansions

$$\tilde{A}_0(\tau, \zeta) = -1 + \sum_{j=1}^{4} \tilde{A}_j(\zeta) \tau^j(\zeta) \text{ and } h_0(\tau, \zeta) = \frac{1}{\rho_C(\zeta)} \sum_{j=0}^{3} \tilde{\mu}_j(\zeta) \tau^j(\zeta), \quad (82)$$

where $\tilde{A}_j(\zeta)$ and $\tilde{\mu}_j(\zeta)$ are system-dependent coefficients function of $\zeta$. The mole fraction *x* of the solute is related to field variable $\zeta$ by

$$x = \zeta - \frac{\zeta(1-\zeta)}{\rho} \left(\frac{\partial \hat{A}_{iso}}{\partial \zeta}\right)_{\hat{T}, \rho}, \qquad (83)$$

where

$$\left(\frac{\partial \hat{A}_{iso}}{\partial \zeta}\right)_{\hat{T},\rho} = \left[\tilde{A}_0(\zeta)+\tilde{\mu}_0(\zeta)\right]\frac{dP_C/RT_C}{d\zeta} - Z_C(\zeta)\frac{d\rho_C}{d\zeta}\tilde{\mu}_0(\zeta) + \frac{P_C(\zeta)}{RT_C(\zeta)}\frac{d\tilde{\mu}_0}{d\zeta} - \left[\tilde{A}_1(\zeta)+\tilde{\mu}_{11}(\zeta)\right]\frac{P_C(\zeta)}{RT_C^2(\zeta)}\frac{dT_C}{d\zeta} \quad (84)$$

with $\tilde{A}_0(\zeta) = -1$ and $Z_C(\zeta) = P_C(\zeta)/\rho_C(\zeta)RT_C(\zeta)$. At the critical locus $\left(\frac{\partial \hat{A}_{iso}}{\partial \zeta}\right)_{\hat{T},\rho}$ =0 and $x=\zeta$, therefore on the critical locus $T_C(\zeta)=T_C(x)$, $P_C(\zeta)=P_C(x)$, $\rho_C(\zeta)=\rho_C(x)$. The principle of isomorphism of the critical phenomena asserts that, at constant value of the variable $\zeta$, $\hat{A}_{iso}$ of a mixture has the same dependence on $\tau$ and $\Delta\tilde{\rho}$ as that of a pure fluid with the same system-dependent coefficients being analytic functions of $\zeta$.

The system dependent coefficients for the mixture can be determine using following mixing rules [85]

$$\tilde{\mu}_1(\zeta) = (1-\zeta)\tilde{\mu}_1^{(1)} + \zeta\tilde{\mu}_1^{(2)} + \zeta(1-\zeta)\tilde{\mu}_1^{(12)} \text{ and}$$
$$\tilde{\mu}_2(\zeta) = (1-\zeta)\tilde{\mu}_2^{(1)} + \zeta\tilde{\mu}_{21}^{(2)} + \zeta(1-\zeta)\tilde{\mu}_2^{(12)}. \quad (85)$$

The values of two noncritical background mixing coefficients $\tilde{\mu}_1^{(12)}$ = -0.01800 and $\tilde{\mu}_2^{(12)}$ =-1.44911 for $H_2O$+$D_2O$ mixture [53] were determined using the observed enthalpies of mixing. This model represents the *PVTx* data by [86] for $H_2O$+$D_2O$ mixture with a standard deviation of 0.2 %.

Povodyrev et al. [87] have developed a crossover scaling model for describing the thermodynamic properties of near-critical binary mixtures. This model was applied to aqueous solutions of sodium chloride. This model described densities and concentrations at vapor-liquid equilibrium and isochoric heat capacities in the one-phase region. The description shows crossover from asymptotic Ising-like critical behavior to classical (mean - field) behavior. Six-term Landau expansion crossover model was extended to binary mixtures since according to the isomorphism principle the behavior of the mixture is universal. In binary mixtures the Helmholtz free-energy density $\bar{A}$ must be generalized to an isomorphic free -energy density $\bar{A}_{iso}(T,\rho,\mu)$ which exhibits the same near-critical behavior [88].

The isochoric heat capacity along the critical isochore from this model can be calculated from the following expression

$$\frac{C_{VX}}{R} \propto \frac{A_0^+}{\tau_2[\tau(\mu)/\tau_2]^\alpha + 1} - \frac{B_{cr}[\tau(\mu)/\tau_2]^\alpha}{[\tau(\mu)/\tau_2]^\alpha + 1} + \frac{C_{VX}^r}{R}, \quad (86)$$

where $B_{cr}$ represents a fluctuation-induced modification of the background isochoric heat capacity [89,90], $\tau(\mu) = 1 - T_C(\mu)/T$ related to $\tau(\bar{x}) = 1 - T_C(\bar{x})/T$ by following equation

$$\frac{\tau(\bar{x})}{\tau_2} \propto \left[\frac{\tau(\mu)}{\tau_2}\right]^{1-\alpha}\left[1+\left(\frac{\tau(\mu)}{\tau_2}\right)^\alpha\right], \quad (87)$$

where $\tau_2 = \left[A_0 x_C(1-x_C)\frac{1}{T_C^2}\left(\frac{dT_C}{dx_C}\right)\right]^{1/\alpha}$.

In the region $\tau >> \tau_2$, we have $\tau(\bar{x}) \approx \tau(\mu)$. However, in the region $\tau << \tau_2$, we have $\tau/\tau_2 \approx \left[\tau(\bar{x})/\tau_2\right]^{1/(1-\alpha)}$. Hence, the apparent critical exponents are renormalized in this region by a factor $1/(1-\alpha)$ and the isochoric heat capacity does not diverge. At $\tau >> \tau_2$

$$\frac{C_{VX}}{R} \propto A_0^+ \tau(\mu)^{-\alpha} - B_{cr} + C_{V,X}^r , \qquad (88)$$

diverges at the critical point like $C_V$ in pure fluid. At $\tau << \tau_2$

$$\frac{C_{VX}}{R} \propto \frac{A_0^+}{\tau_2}\left[1 - \left(\frac{\tau(\mu)}{\tau_2}\right)^{\alpha}\right] - B_{cr}\left(\frac{\tau(\mu)}{\tau_2}\right)^{\alpha} + \frac{C_{VX}^r}{R}, \qquad (89)$$

exhibits a finite cusp with an infinite slope.

Parametric crossover equation of state (65) - (71) has been applied for $H_2O$+$D_2O$ mixture [40] to predict of thermodynamic properties and phase behavior over a wide region around the locus of the vapor-liquid critical points. This crossover equation of state is based on the isomorphic generation of the law of corresponding states. This equation yields a good representation of thermodynamic property data in the range of temperature $0.8T_C(x) \le T \le 1.5T_C(x)$ and densities $0.35\rho_C(x) \le \rho \le 1.65\rho_C(x)$. Only the critical locus of the $H_2O$+$D_2O$ mixture and equation of state for the pure components are needed in order to predict the phase and the critical behavior of the mixture. It is not necessary to fit additional experimental data. For pure heavy water the crossover equation of state developed by Kiselev et al. [40] was used while for pure light water the parametric crossover equation of state developed by Kiselev and Friend [39] was adopted. Since for the $H_2O$+$D_2O$ mixture maximum values of $\Delta Z_C$ <<0.06 the linear expression in $\Delta Z_C(x)$ has been used. For the mixing coefficients $k_i^{(1)}$ the same values employed earlier for methane + ethane and ethane + n-butane mixtures [67] have been used.

**6. Crossover SAFT Equation of State.** The molecular-based equations of state, such as statistical associating fluid theory (SAFT), employ equations which have been developed as an alternative to empirical EOS's for associating liquids. In its original [91-93] and modified [94-97] form SAFT cannot reproduce the critical parameters $T_C$, $P_C$, and $\rho_C$ simultaneously and, therefore, is incapable of reproducing different thermodynamic properties such as vapor-liquid equilibria (VLE), *PVT*, densities, specific heats, enthalpies, and excess properties in the gas and liquid phases simultaneously with the same set of the system-dependent parameters. In addition, all of these analytical equations of state fail to reproduce the non-analytical, singular behavior of fluids in the critical region, caused by long-scale fluctuations in density.

A general, renormalization-group theory based procedure for incorporating the long-range density fluctuations into any classical-analytical equation was proposed by Kiselev [98]. This procedure has been successfully applied to the SAFT [99-100], SAFT-BACK [101,102], and SAFR-VR [103,104] equations of state. In all cases, this method produces a thermodynamically self-consistent and accurate crossover EOS near- to and far-from the critical point of pure fluids. Recently, in combination with the generalized crossover density functional (DFT) and decoupled mode theory (DMT), this procedure has been also extended to the interfacial [103,105] and transport [104] properties of pure fluids.

In this paper, we continue a study initiated in our previous works for cubic [105,106] and SAFT [100] EOS. Firstly, we have developed a "global" crossover (GC) SAFT equation of state for methanol, ethanol and higher n-alkanols, which unlike the crossover SAFT EOS developed earlier [100] contains a so-called kernel term [107] and reproduces the asymptotic scaling behavior of the isochoric heat capacity in the critical region. Secondly, we developed on the basis of the GC SAFT equation and the density

functional theory a generalized GC SAFT-DFT model for surface tension. Combining the GC SAFT equation with the crossover decoupled mode theory we have also developed a GC SAFT-DMT model for the transport properties and compared this model with experimental thermal conductivity and thermal diffusivity data for methanol and ethanol.

In order to obtain a "global" crossover EOS, which in the critical region reproduces all known scaling laws and in the limit of low densities is reduced to the ideal gas equation of state , we follow the crossover approach developed by Kiselev [98]. Following this approach, we first represent the dimensionless Helmholtz free energy $a(T,v) = A(T,v)/RT$ in the form

$$a(T,v) = \Delta a(\Delta T, \Delta v) + a_{bg}(T,v) \tag{90}$$

where the critical part of the dimensionless Helmholtz free energy

$$\Delta a(\Delta T, \Delta v) = a^{res}(\Delta T, \Delta v) - a_0^{res}(\Delta T) + \overline{P}_0(\Delta T)\Delta v - \ln(\Delta v + 1) \tag{91}$$

and the background contribution is given by

$$a_{bg}(T,v) = a^{res}(T) + a^{id}(T) - \overline{P}_0(T)\Delta v \tag{92}$$

In Eqs. (91) and (92), $v = 1/\rho$ is a molar volume, $\Delta T = T/T_{0c} - 1$ and $\Delta v = v/v_{0c} - 1$ are dimensionless distances from the classical critical temperature $T_{0c}$ and molar volume $v_{0c}$, respectively, $\overline{P}_0(T) = P_0(T, v_{0c})v_{0c}/RT$ is the dimensionless pressure, $a_0^{res}(T) = a^{res}(T, v_{0c})$ is the dimensionless residual part of the Helmholtz energy along the critical isochore $v = v_{0c}$, and $a^{id}(T)$ is the dimensionless temperature-dependent ideal-gas Helmholtz free energy.

In the second step, we replace the classical values of $\Delta T$ and $\Delta v$ in the critical part $\Delta a(\Delta T, \Delta v)$ with the renormalized values [100,107]

$$\bar{\tau} = \tau Y^{-\alpha/2\Delta_1} + (1+\tau)\Delta T_c Y^{2(2-\alpha)/3\Delta_1}, \tag{93}$$

$$\Delta\bar{\varphi} = \Delta\varphi Y^{(\gamma-2\beta)/4\Delta_1} + (1+\Delta\varphi)\Delta\varphi_c Y^{(2-\alpha)/2\Delta_1}, \tag{94}$$

where $\alpha = 0.11, \beta = 0.325, \gamma = 2 - 2\beta - \alpha = 1.24$, and $\Delta_1$=0.51 are universal non-classical critical exponents, $t = T/T_c$ - 1 is a dimensionless deviation of the temperature from the real critical temperature $T_c$, $\varphi = v/v_c - 1$ is a dimensionless deviation of the molar volume form the real critical molar volume $v_c$, $\Delta T_c = (T_c - T_{0c})/T_{0c} << 1$ and $\Delta v_c = (v_c - v_{0c})/v_{0c} << 1$ are dimensionless shifts of the critical temperature and volume, respectively, and $Y(\tau, \varphi)$ denotes a crossover function.

In this work, for $Y(\tau, \varphi)$ we use a simple phenomenological expression obtained by Kiselev *et al.* [98-100].

$$Y(q) = \left(\frac{q}{1+q}\right)^{2\Delta_1}, \tag{95}$$

where following our recent work for the generalized cubic EOS [105,106], the renormalized distance to the critical point $q$ we find from a solution of the crossover sine model (SM)

$$\left(q^2 - \frac{\tau}{Gi}\right)\left[1 - \frac{p^2}{4b^2}\left(1 - \frac{\tau}{q^2 Gi}\right)\right] = b^2\left\{\frac{\varphi[1 + v_1\exp(-10\varphi)] + d_1\tau}{m_0 Gi^{\beta}}\right\}^2 Y^{1-2\beta/\Delta_1} \tag{96}$$

where the coefficients $m_0$, $v_1, d_1$, and the Ginzburg number $Gi$ are the system-dependent parameters, while the universal parameters $p^2$ and $b^2$ can be set equal to the

linear model (LM) parameter $p^2 = b^2 = b_{LM}^2 \cong 1.359$. The crossover SM as given by Eq. (96) is physically equivalent to the crossover sine model developed earlier [100,107,108], but with a different empirical term $\propto v_1 \exp(-10\varphi)$, which provides at the triple point of liquids the physically obvious condition $Y = 1$.

Finally, a "global" crossover expression for the Helmholtz free energy can be written in the form

$$a(T,v) = \Delta a(\bar{\tau},\bar{\varphi}) - K(\tau,\varphi) - \Delta v\bar{P}_0(T) + a_0^{res}(T) + a^{id}(T) \qquad (97)$$

with the kernel term given by

$$\mathrm{K}(\tau,\varphi) = \frac{1}{2}a_{20}\tau^2\left[\Upsilon^{-\alpha/\Delta_1}(\tau,\varphi) - 1\right] + \frac{1}{2}a_{21}\tau^2\left[\Upsilon^{-(\alpha-\Delta_1)/\Delta_1}(\tau,\varphi) - 1\right] \qquad (98)$$

The coefficients $a_{20}$ and $a_{21}$ in Eq. (98) correspond to the asymptotic, $A_0^+$, and first Wegner-correction, $a_1^+$, terms in the asymptotic expression for the isochoric heat capacity $C_V = -T\left(\partial^2 A/\partial T^2\right)_V$ along the critical isochore at $t \to +0$ [23]

$$C_V(t)/R = A_0^+|t|^{-\alpha}\left(1 + a_1^+|t|^{\Delta_1}\right) + B_{bg}^+(\tau), \qquad (99)$$

where $B_{bg}^+$ is a background contribution above the critical temperature $T > T_c$. It is easy to demonstrate that in the generalized SAFT EOS with the kernel term as given by Eq. (98), the critical asymptotic and first correction amplitudes are given by

$$A_0^+ = \frac{(2-\alpha)(1-\alpha)}{2}a_{20}Gi^{\alpha}, \quad a_1^+ = \frac{(2-\alpha+\Delta_1)(1-\alpha+\Delta_1)}{(2-\alpha)(1-\alpha)}\frac{a_{21}}{a_{20}}Gi^{-\Delta_1}. \qquad (100)$$

The crossover equation of state can be obtained by differentiation of Eq. (97) with respect to volume

$$P(T,v) = \frac{RT}{v_{0c}}\left[-\frac{v_{0c}}{v_c}\left(\frac{\partial\Delta a}{\partial\varphi}\right)_T + \bar{P}_0(T) + \left(\frac{\partial K}{\partial\varphi}\right)_T\right] \qquad (101)$$

The GC SAFT EOS as defined by Eq. (101) in addition to the classical SAFT parameters also contains the Ginzburg number $Gi$, the rectilinear diameter $d_1$, the sine model parameter $m_0$, and the crossover parameter $v_1$, and the coefficients $a_{20}$, and $a_{21}$; the last two parameters are specifically from the kernel term.

***Thermodynamic properties:*** The crossover SAFT EOS described above for associating fluids contains 11 system-dependent parameters and, as we have shown in our previous work on propan-1-ol [107], is capable of describing the volumetric and caloric properties of one-component fluids with high accuracy. Unfortunately, this equation requires a substantial data set (including accurate *VLE*, *PVT*, $C_P$ and $C_V$ data) for the determination of optimal parameters; this prevents widespread use of the GC SAFT EOS for engineering calculations. This model was applied for methanol [108]. Because of the high polarity and strong association between molecules, methanol is challenging to model, and, therefore, it is an interesting test for the GC SAFT EOS. The parameters $m$, $v^{oo}$, $u^o$, $\varepsilon^{AB}$, and $\kappa^{AB}$ for methanol have been found from a fit of the GC SAFT EOS to experimental one –phase region *PVT* , *VLE* , -data obtained from the literature. We would especially like to emphasize the excellent agreement between the predictions of the GC SAFT EOS and experimental one-phase $C_P$ and one- and two phase $C_V$ data in the critical region shown in Figs. 4-6.

The dashed curves in Figs.4 to 6 correspond to the values calculated with IUPAC EOS [109]. As one can see, the GS SAFT and IUPAC EOS [109] give very close predictions for the isobaric heat capacity along the near critical isobar at $P$=10

MPa. However, unlike the GC SAFT EOS, the multi-parameter equation of state developed by de Reuck and Craven [109] even qualitatively does not reproduce an asymptotic behavior of the isochoric heat capacity in the critical region.

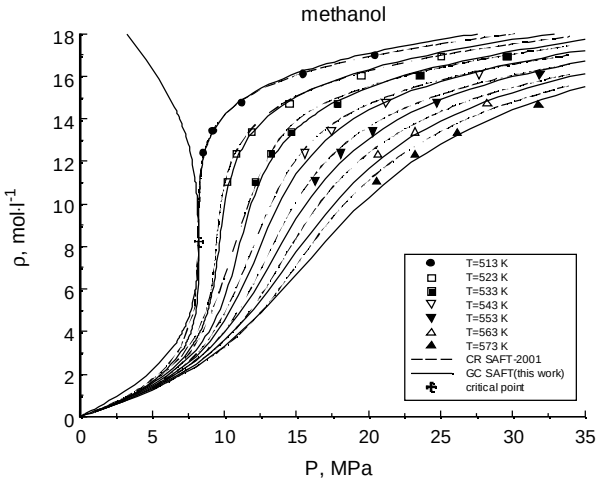



Fig.4.

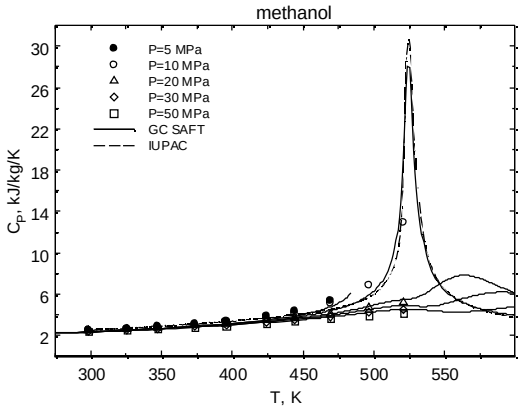



Fig.5.

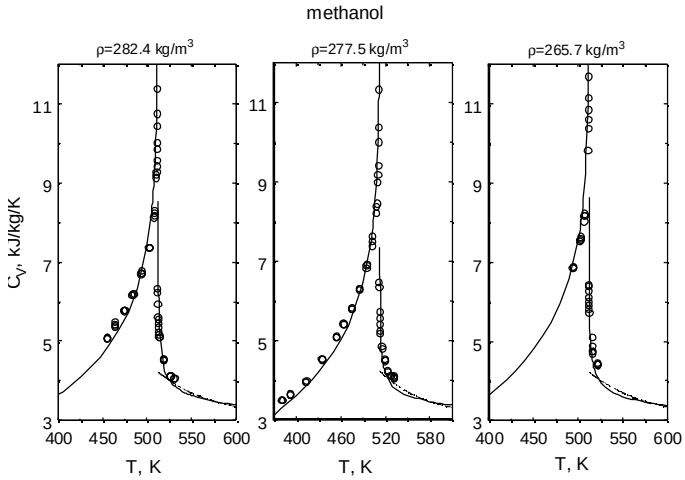



Fig.6.

In the second step, we developed the GC SAFT EOS for ethanol and higher n-alkanols up to heptan-1-ol. For ethanol we adopt the same critical density as employed earlier by Kiselev and Ely [105] in the generalized corresponding states model. All other system-dependent parameters in the GC SAFT EOS for ethanol have been found from a fit of the GC SAFT EOS to VLE and one-phase *PVT* data obtained from the

literature. For all other n-alkanols we adopt values of the critical parameters employed earlier by Kiselev and Ely [105]. For all n-alkanols, the GC SAFT EOS reproduces the saturated pressure and liquid density data with an AAD of less than 1 % and the vapor densities with an AAD of about 3-4 %. The excellent agreement between the predictions of the GC SAFT EOS and experimental data for *PVT* of ethanol is observed. The equation of state by Dillon and Penoncello [111] for pure ethanol, similar the IUPAC EOS [109] for methanol considered above, also fails to reproduce the $C_V$ -data in the critical region, while the GC SAFT EOS even asymptotically close to the critical point, and is in excellent agreement with experimental data.

***Thermal conductivity:*** For the thermal conductivity of n-alkanols we use a crossover decoupled-mode theory (DMT) model for the transport coefficients in pure fluids and fluid mixtures developed by Kiselev and Kulikov [112,113]. In the limit of pure components, the crossover expression for the thermal conductivity takes the form [112-114]

$$\lambda = \frac{k_B T \rho C_P}{6\pi\eta_b \hat{\xi}} \Omega(z) + \lambda_b, \tag{102}$$

where $\eta_b$ the viscosity, and $\lambda_b$ is a background part of the thermal conductivity can be represented as a sum of the dilute-gas and the residual contributions

$$\lambda(\rho,T) = \lambda^0(T) + \Delta\lambda_r(\rho,T), \tag{103}$$

where $\lambda^{(0)}$ is the dilute-gas thermal conductivity that depends only on temperature and $\Delta\lambda_r$ is the residual thermal conductivity. The crossover function $\Omega(z) = \Omega\left(q_D\hat{\xi}\right)$ in Eq. (102) is given by

$$\Omega(z) = \frac{2}{\pi}\left[\tan^{-1}(z) - \frac{1}{\sqrt{1+y_{1D}z}}\tan^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{1+y_{1D}z}}\right)\right], \tag{104}$$

where

$$y_{1D} = \frac{6\pi\eta_b{}^2}{k_B T \rho q_D\left(\phi_1 + y_1^{-1}\right)}, \quad y_1 = \frac{k_B T \rho C_P}{6\pi\eta_b \hat{\xi}\,\lambda_b}. \tag{105}$$

In Eqs. (102)-(105), $q_D$ is a cutoff wave number, the renormalized correlation length is given by Kiselev and Huber [113]

$$\hat{\xi} = \xi_{OZ}\exp\left(-\frac{1}{q_D\xi_{OZ}}\right) \tag{106}$$

(where $\xi_{OZ} = \xi_0\sqrt{\chi_T/\Gamma_0}$ corresponds to the Ornstein-Zernike approximation for the correlation length, Landau and Lifshitz [115]), and $\phi_1 = \phi(k_{1D}\hat{\xi}) = \phi(z)$ is the dynamical scaling function [112,114]

$$\phi(z) = \frac{3\left[1+z^2+\left(z^3-z^{-1}\right)\tan^{-1}(z)\right]}{4z^2(1+z^2)} \tag{107}$$

calculated at a constant value of the wave number $k_{1D} = 0.1q_D$. Asymptotically close to the critical point at $q_D\hat{\xi} >> 1$, the parameter $y_1 >> 1$, the crossover function $\Omega(z)$ approaches unity, and the thermal conductivity along the critical isochore diverges at $\tau \to +0$ as $\lambda \propto \tau^{-\gamma/2}$. Far away from the critical point, at $q_D\hat{\xi} << 1$, the crossover

function $\Omega(z) \to 0$, and the thermal conductivity $\lambda$ becomes equal to its background part $\lambda_b$.

In the work [128], we applied the GC SAFT- DMT model for the calculation of the thermal conductivity of methanol and ethanol in a wide range of temperatures and pressures, including the critical and supercritical regions. All thermodynamic properties in the GC SAFT- DMT model, Eqs. (104)-(107), are calculated with the GC SAFT EOS, with the cutoff wave number $q_D^{-1} = 3x_0$, where for the critical amplitude $x_0$ we adopt the values obtained in the GC SAFT-DFT model for the surface tension

$$x_0^{C1OH} = 0.114 \text{ nm}, \quad x_0^{C2OH} = 0.111 \text{ nm}, \quad x_0^{C4OH} = 0.124 \text{ nm}. \qquad (108)$$

The viscosity $\eta_b$ in Eqs. (102) and (105) is a shear viscosity which is an analytic function of the temperature and density. For methanol, we adopted the expression given in [63] that represents the data in the liquid and vapor phase up to about 500 MPa to about 3 %. For the viscosity of ethanol, we are not aware of any wide-ranging, accurate correlations so we present one here. In this work, $\eta_b$ has been represented as the sum of a dilute gas contribution and a residual term [116],

$$\eta_b(\rho,T) = \eta^{(0)}(T)[1 + B_\eta(T)\rho] + \Delta_H\eta(\rho,T); \qquad (109)$$

the term $\eta^{(0)}(T)$ represents the viscosity in the limit of zero density, $B_\eta(T)$ is the second virial coefficient for viscosity based on Rainwater-Friend theory [117], and $\Delta_H\eta(\rho, T)$ is the contribution that represents the higher-order density terms as a function of the absolute temperature $T$ and density $\rho$. We expressed the higher density terms $\Delta_H\eta(\rho,T)$ in terms of the reduced density $\delta = \rho/\rho_R$ and the reduced temperature $\tau = T/T_R$ using the form [118]

$$\Delta_H\eta(\rho,T) = 1000\left(\sum_{j=2}^{3}\sum_{k=0}^{2} \alpha_{jk}\frac{\delta^j}{\tau^k} + c_1\delta\left(\frac{1}{\delta_0 - \delta} - \frac{1}{\delta_0}\right)\right) . \qquad (110)$$

$$\delta_o = c_2 + c_3\sqrt{\tau} . \qquad (111)$$

where the viscosity is in mPa·s and the reducing parameters were $T_R$ = 513.9 K and $\rho_R$ = 5.991 mol/L.

For the residual contribution in both fluids, methanol and ethanol, we use here a polynomial in temperature and density

$$\Delta\lambda_r(\rho,T) = \sum_{i=1}^{3}\left(b_{i1} + b_{i2}\frac{T}{T_c}\right)\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^i , \qquad (112)$$

which has recently been shown to accurately represent hydrocarbon fluids such as isobutene, butane and propane [119-121]. The parameters $b_{i,j}$ ($i$=1-3, $j$=1,2) in the residual contribution have been found from a fit of the GC SAFT-DMT model to the selected data sets for methanol and ethanol from the literature, that cover a wide range of temperature and pressure conditions above and below the critical point. The comparisons with the experimental thermal conductivity data are shown in Figs. 7 to 9.

For both fluids the very good agreement between the GC SAF-DMT model and experimental thermal conductivity data is observed. The GC SAFT-DMT reproduces all thermal conductivity data for methanol (n=430) and ethanol (n=230) with an AAD of 0.85 %. The sharp maxima of the thermal conductivity observed at $P$=10 MPa and $T$=512 K in methanol (see Fig. 9) and at near critical pressures at $T$=520 K for ethanol (see Fig. 8) correspond to the critical enhancements caused by long-range density as

described by the first term in right-hand side of Eq. (102). In Fig. 9 we show the thermal conductivity for methanol as a function of density calculated along the selected isobars and isotherms with the GC SAFT-DMT model. As one can see, the maximum of the thermal conductivity, observed at $T \to T_C$, increase drastically as the pressure and temperature approach their critical values.

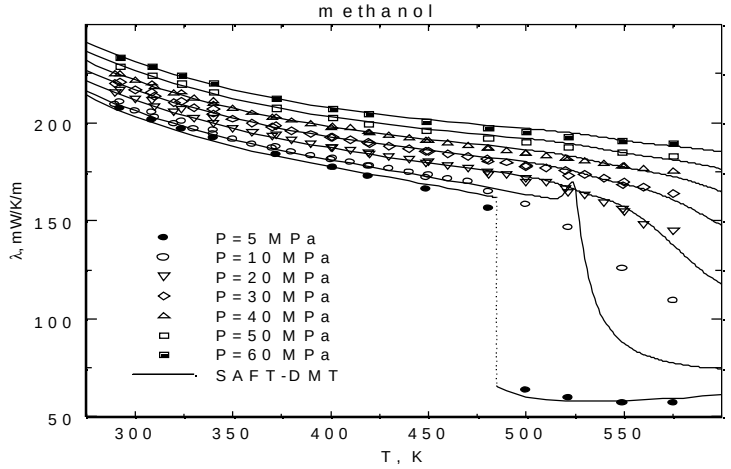



Fig.7.

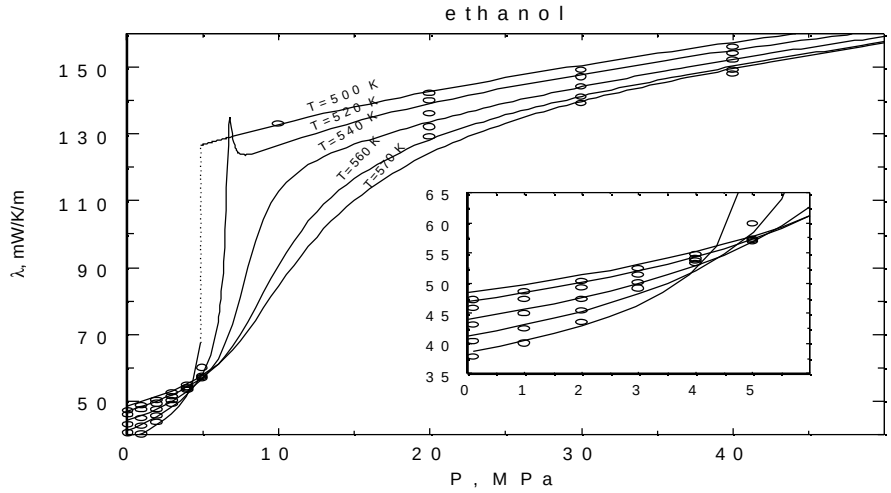



Fig.8.

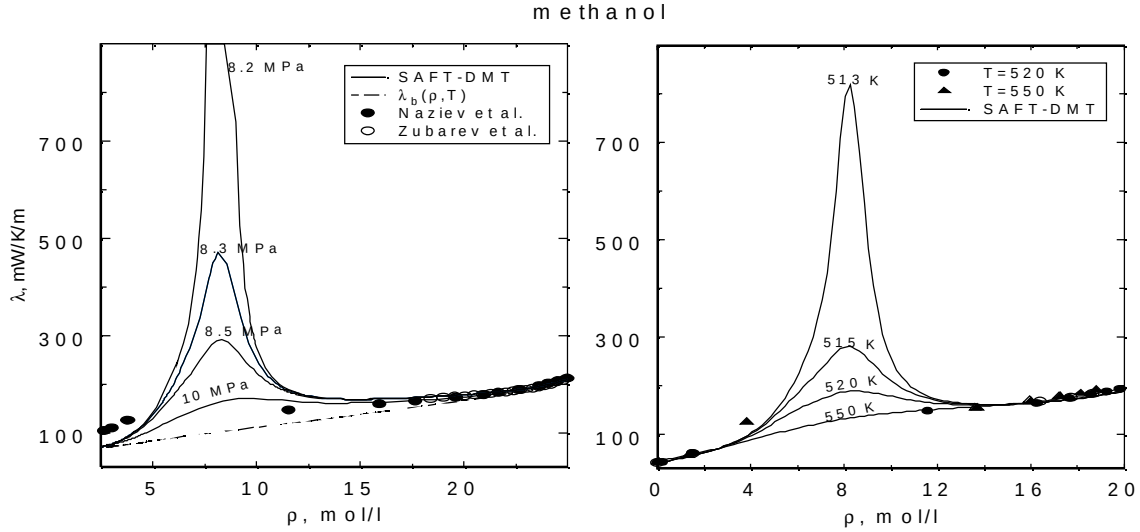



Fig.9

**Acknowledgments.** Abdulagatov I.M. thanks the Thermophysical Properties Division at the National Institute of Standards and Technology USA for the opportunity to work as a Guest Researcher at NIST during the course of this research.

**References:**

1. Franck E.U., In: Steam, Water, and Hydrothermal Systems: physical and Chemistry Meeting the Needs of Industry. Proc. 13th Int. Conference Prop. Water and Steam, P.R. Tremaine, P.G. Hill, D.E. Irish, and P.V. Balakrishnam, (eds.). NRC Research Press, 2000, pp.22-34.
2. Shaw R.V., Brill N.B., Clifford A.A., Eckert C.A., Franck E.U., Chem. Eng. News, 69, 36 (1991).
3. Shaw R.W., Boukis N. (eds.), Guidelines for phase separations in high-temperature and supercritical water solutions, A Report on a Workshop Organized by the US Army Research Office and the Forschungszentrum Karlsruhe, 7-9 July 1999, Army Research Laboratory, Research Triangle Park, NC, 2000.
4. Penniger J.M.L., Supercritical Fluid Technology, eds. J.M.L. Penninger, Rodosz M., McHugh M.A., and Krukonis V.J., (Elsevier, New York), 1987, p.309.
5. Naragan R., Antol M.J., Supercritical Fluid Science and Technology, eds. K.P. Joohnston and J.M.L. Penninger, (ACS, Washington, DC), 1989 , p.226.
6. Modell M., Gaudet G.G., Simson M., Hong G.T., Bieman K., Supercritical water. Solid wastes management 26-30, (1982).
7. Thomason T.B., Modell M., Haz. Wastes, 1, 453 (1984).
8. Staszak C.N., Malinaaski K.C., Killilea W.R., Environ. Prog., 6, 39 (1987).
9. Barner H.E., Huang C.Y., Johnson T., Jacobs G., Martch M.A., J. Hazardous Materials, 32, 1 (1992).
10. Matson D.W., Peterson R.C., Smith R.D., Adv. Cer. Mat., 1, 242 (1986).
11. Yonker C.R., Wright R.W., Frye S.L., Smith R.D., Supercritical Fluids. T.G. Squires, M.E. Paulaitis eds., (ACS Symp. Ser. N329), 1987, p.172.
12. Kim S., Johnston K.P., Supercritical Fluids. T.G. Squires, M.E. Paulaitis eds., (ACS Symp. Ser. N329), 1987, p.42.
13. Supercritical Fluid Technology, F.V. Bright and M.E.P. McNally, eds., (ACS, Symp. Ser., Washington, DC), 1992.
14. Illés V., Daood H.G., Perneczki S., Szokonya L., Then M., J. Supercrit. Fluids, 17 (2000) 177.
15. Sengers J.V., Levelt Sengers J.M.H., Critical Phenomena in Classical Fluids, in C.A. Croxton (ed.), Progress in Liquid Physics, Wiley, New York, 103 (1978).
16. Sengers J.V., Int. J. Thermophys., 6, 203 (1985).
17. Kadanoff L.P., Physica, 2, 263 (1966).
18. Potashinskii A.Z., Pokrovskii V.L., JETP, 50, 439 (1966).
19. Migdal A.A., JETP, 55, 1964 (1968).
20. Polyakov A.M., JETP, 55, 1026 (1968)
21. Wilson K.G., Phys. Rev., 4, 3174 (1971).
22. Wilson K., Kogut J., The Renormalization Group and ε-Expansion, Wiley, NY, 1974.
23. Ma S., Moder Theory of Critical Phenomena. Benjamin, Mass.., 1976.
24. Wegner, F.J., Phys. Rev. B., 5, 4529 (1972).
25. Ley -Koo M., Green M.S., Phys. Rev. A., 23, 2650 (1981).
26. Saul D.M., Wortis M., Jasnow D., Phys. Rev. B., 11, 2571 (1975).
27. Camp W.J., Van Dyke J.P., Phys. Rev. B., 11, 2579 (1975).
28. Sengers J.V., Levelt-Sengers J.M.H., Ann. Rev. Phys. Chem., 37, 189 (1986).
29. Fisher M.E., Zinn S.-Y., Upton P.J., Phys. Rev., B59, 14533 (1999).
30. Guida R., Zinn-Justin J., J. Phys. A Math Gen., 31, 8103 (1998).
31. Chen Z.Y., Albright P.C., Sengers J.V., Phys. Rev., A 41, 3161 (1990).
32. Abdulagatov I.M., Polikhronidi N.G., Batyrova R.G., J. Chem. Thermodyn., 26, 1031 (1994).
33. Liu A.J., Fisher M.E., Physica A, 156, 35 (1989).
34. Tang S., Sengers J.V., Chen Z.Y., Physica, 179, 344 (1991).
35. Bagnuls C., Bervilliev C., Meiron D.I., Nickel B.C., Phys. Rev. B., 35, 3585 (1987).
36. Bagnuls C., Bervilliev C., Phys. Rev. B., 32, 7209 (1985).
37. Beck L., Ernst G., Gürtner J., J. Chem. Thermodyn., 34, 277 (2000).
38. Anisimov M.A., Povodyrev A.A., Roseli J.P., Sengers J.V., Kiselev S.B., Friend D.G., In: Proc. 13th Int. Conf. Props. Water and Steam, P.R. Tremaine, P.G. Hill, D.E. Irish, and P.V. Balakrishnan, eds. (NRC Press, Ottawa, 2000), p. 339.
39. Kiselev S.B., Friend D.G., Fluid Phase Equilibria, 155, 33 (1999).
40. Kiselev S.B., Abdulagatov I.M., Harvey A.H., Int. J. Thermophys., 20, 563 (1999).

41. Polikhronidi N.G., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Batyrova R.G., J. Chem. Eng. Data, 46, 1064 (2001).
42. Griffiths R.B., Wheeler J.C., Phys. Rev., A2, 1047 (1970).
43. Saam W.F., Phys. Rev., A2, 1461 (1970).
44. Anisimov M.A., Critical Phenomena in Liquids and Liquid Crystals, Gordon and Breach, Philadelphia, (1991).
45. Fisher M.E., Phys. Rev., 176, 237 (1968).
46. Potashinskii A.Z., Pokrovskii V.L., Khokhlachev S.B., JETP, 63, 1521 (1972).
47. Anisimov M.A., Kiselev S.B., Thermophysical Properties of Liquids and Liquid Solutions in Critical Region. Sov. Thech. Rev. Ser. B. Thermophysics. Harwood Academic Publisher, New York, 1, 337 (1987).
48. Anisimov M.A., Gorodezkii E.E., Kulikov V.D., Sengers J.V., Phys. Rev. E., 51, 1199 (1995).
49. Anisimov M.A., Gorodezkii E.E., Kulikov V.D., Povopdyrev A.A., Sengers J.V., Physica A., 220, 277 (1995).
50. Anisimov M.A., Gorodezkii E.E., Kulikov V.D., Sengers J.V., JETP Lett., 60, 535 (1994).
51. Anisimov M.A., Voronel A.A., Gorodezkii E.E., JETP, 33, 605 (1971).
52. Anisimov M.A., Sengers J.V., In: Equations of State for Fluids and Fluids Mixtures, edited by J.V. Sengers, R.F. Kayser, C.J. Peters and H.J. White, Jr. (Elsevier, Amsterdam), 2000, p.381.
53. Abdulkadirova Kh.S., Wyczalkowska A., Anisimov M.A., Sengers J.V., J. Chem. Phys., 116 4597 (2002).
54. Fisher M.E., Scaling, Universality, and Renormalization Group Theory, in F.J.W. Hahne (ed.), Critical Phenomena, Lectures Notes in Physics, Springer, Berlin, 186, 1 (1988).
55. Kiselev S.B., Povodyrev A.A., Fluid Phase Equilibria, 79, 33 (1992).
56. Povodyrev A.A., Kiselev S.B., Anisimov M.A., Int. J. Thermophys., 14, 1187 (1993).
57. Kiselev S.B., Kostukova I.G., Povodyrev A.A., Int. J. Thermophys., 12, 877 (1991).
58. Fakhretdinov I.A., Chalyi A.V., Izv. Vysh. Ucheb. Zavedenii, ser. Fisika, 1, 35 (1976).
59. Barantsev V.G., Kuz'min V.D., Physics of Liquid State. Kiev. KGU. 1977. P.32.
60. Thompson C.J., J. Math. Phys., 7, 531 (1966).
61. Mikulinskii M.A., Uspekhi Fizich. Nauk, 110, 213 (1973).
62. Gorodezkii E.E., Mikulinskii M.A., JETP, 66, 986 (1974).
63. Kiselev S.B., Sengers J.V., Int. J. Thermophys., 14, 1 (1993).
64. Kiselev S.B., Rainwater J.C., J. Chem. Phys., 109, 643 (1998).
65. Belyakov M.Yu., Kiselev S.B., Rainwater J.C., Fluid Phase Equilibria, 151-152, 439 (1998).
66. Belyakov M.Yu., Kiselev S.B., Rainwater J.C., J. Chem. Phys., 107, 3085 (1997).
67. Kiselev S.B., Fluid Phase Equilibria, 128, 1 (1997).
68. Kiselev S.B., Fluid Phase Equilibria, 147, 7 (1998).
69. Kiselev S.B., Kulikov V.D., Int. J. Thermophys., 18, 1143 (1997).
70. Kiselev S.B., Rainwater J.C., Huber M.L., Fluid Phase Equilibria, 150, 469 (1998).
71. Kiselev S.B., Rainwater J.C., Fluid Phase Equilibria, 141, 129 (1997).
72. Abdulagatov I.M., Bochkov M.M., Mursalov B.A., Thermophysical Properties of Substances and Materials, GSSSD, Moscow, Vol. 27, p.95, 1989.
73. Abdulagatov I.M., Kiselev S.B., Levina L.N., Zakar'yaev Z.R., Mamchenkova O.N., Int. J. Thermophys., 17, 423 (1997).
74. Grigor'ev B.A., Kurumov D.S., Abdulagatov I.M., Vasil'ev Yu.L., Russ. High Temperature, 24, 1096 (1986).
75. Grigor'ev B.A., Rastorguev Yu.L., Kurumov D.S., Gerasimov A.A., Kharin V.E., Plotnikov D.S., Int. J. Thermophys., 11, 487 (1990).
76. Kiselev S.B., Ely J., Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Magee J.W., Ind. Eng. Chem. Res., 41, 1000 (2002).
77. Kiselev S.B., Kostukova I.G., J. Chem. Phys., 98, 6455 (1993).
78. Wyczalkowska A., Abdulkadirova Kh.S., Anisimov M.A., Sengers J.V., J. Chem. Phys., 113, 4985 (2000).
79. Chen Z.Y., Abbaci A., Tang S., Sengers J.V., Phys. Rev., A 42, 4470 (1990).
80. Luettmer-Strathmann J., Tang S., Sengers J.V., J. Chem. Phys., 97, 2705 (1992).
81. Sengers J.V., in: Supercritical Fluids, E.Kiran and J.M.H. Levelt Sengers (eds.), Kluwer, Dordrecht, 1994, pp.231-271.
82. Wyczalkowska A., Sengers J.V., J. Chem. Phys., 111, 1551 (1999).
83. Wyczalkowska A., Abdulkadirova Kh.S., Anisimov M.A., Sengers J.V., In: Steam, Water, and Hydrothermal Systemss: Proc. of the 13th International Conference on the Properties of Water and Steam. P.R. Tremaine, Ph.G. Hill, D.E. Irish, P.V. Balakrishnan (Eds.).NRC Research Press.

Ottawa, 2000, pp.365 - 373.
84. Chen Z.Y., Albright P.C., Sengers J.V., Phys. Rev., A 41, 3161 (1990).
85. Jin G.X., Tang S., Sengers J.V., Phys. Rev. E., 47, 388 (1993).
86. Bazaev A. R., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Bazaev E.A., Ramazanova A.E., J. Supercritical Fluids., 26, 115 (2003).
87. Povodyrev A.A., Anisimov M.A., Sengers J.V., Levelt Sengers J.M.H., Physica A., 244, 298 (1997).
88. Povodyrov A.A., Jin G.X., Kiselev S.B., Sengers J.V., Int. J. Thermophys., 17, 909 (1995).
89. Anisimov M.A., Kiselev S.B., Sengers J.V., Tang S., Physica, A 188, 487 (1992).
90. Cheng H., Anisimov M.A., Sengers J.V., Fluid Phase Equilibria, 128, 67 (1996).
91. Jackson G., Chapman W. G., Gubbins K. E. Molec. Phys., 65, 1 (1988).
92. Chapman W. G., Gubbins K. E., Jackson G., Radosz M. Fluid Phase Equilib., 52, 31 (1989).
93. Chapman, W. G.; Gubbins, K. E.; Jackson, G.; Radosz, M. Ind. Eng. Chem. Res., 29, 1709 (1990).
94. Huang, S. H.; Radosz, M. Ind. Eng. Chem. Res., 29, 2284 (1990).
95. Huang, S. H.; Radosz, M. Fluid Phase Equilib., 70, 33 (1991).
96. Fu, Y.-H.; Sandler, S. I. Ind. Eng. Chem. Res., 34, 1897 (1995).
97. Kraska, T.; Gubbins, K. E. Ind. Eng. Chem. Res., 35, 4727 (1996).
98. Kiselev, S. B. Fluid Phase Equilib. 147, 7 (1998).
99. Kiselev, S. B.; Ely, J. F. Ind. Eng. Chem. Res., 38, 4993 (1999).
100. Kiselev S. B., Ely J. F., Adidharma H., Radosz M. Fluid. Phase. Equilib. 183-184, 53 (2001).
101. Hu, Z.-Q.; Yang, J.-C.; Li, Y.-G. Fluid Phase Equilib., 205, 1 (2003).
102. Hu, Z.-Q.; Yang, J.-C.; Li, Y.-G. Fluid Phase Equilib., 205, 25 (2003).
103. McCabe, C.; Kiselev, S. B. Fluid Phase Equilib., 219, 3 (2004).
104. McCabe, C.; Kiselev, S. B. Ind. Eng. Chem. Res., 43, 2839 (2004).
105. Kiselev, S. B.; Ely, J. F. J. Chem. Phys., 119, 8645 (2003).
106. Kiselev, S. B.; Ely, J. F. Fluid Phase Equilib. 222/223, 149 (2004).
107. Kiselev, S. B.; Ely, J. F.; Abdulagatov, I. M.; Magee, J. W. Int. J. Thermophys., 6, 1373 (2000).
108. Kiselev S. B., Ely J. F. Fluid Phase Equilib. 174, 93 (2000).
109. de Reuck, K. M.; Craven, R. J. B. Methanol. International Thermodynamic Tables of the Fluid State-12; Blackwell, Oxford, 1993.
110. I. M. Abdulagatov, S. B. Kiselev, J. F. Ely, N.G. Polikhronidi, A. Abdurashidova, Int. J. Thermophys., 2005 excepted.
111. Dillon, H. E.; Penoncello, S. G. Int. J. Thermophys. 25, 321 (2004).
112. Landau, L. D.; Lifshitz, E. M. Statistical Physics, Part 1, Pergamon Press: New York, 1980.
113. Kiselev, S. B.; Kulikov, V. D. Int. J. Thermophys., 18, 1143 (1997).
114. Kiselev, S. B.; Kulikov, V. D. Int. J. Thermophys., 15, 283 (1994).
115. Kiselev, S. B.; Huber, M. L. Fluid Phase Equilib., 142, 253 (1998).
116. Vogel, E.; Küchenmeister, C.; Bich, E.; Laesecke, J. Phys. and Chem. Ref. Data, 27, 947 (1998).
117. Rainwater J. C., Friend D. G. Phys. Rev. A, 36, 4062 (1987).
118. Huber M. L., Laesecke A., Perkins R, Energy & Fuels 18, 968 (2004).
119. Perkins, R. A. J. Phys. and Chem. Ref. Data, 47, 1272 (2002).
120. Perkins, R. A., Ramires, M.L.V., Nieto de Castro, C.A. Cusco, L. J. Phys. and Chem. Ref. Data, 47, 1263 (2002).
121. Marsh, K. N., Perkins, R.A., Ramires, M.L.V. J. Chem. Eng. Data, 47, 932 (2002).
122. Polikhronidi N.G., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Stepanov G.V., Int. J. Thermophys., 22, 189 (2001).
123. Polikhronidi N.G., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Stepanov G.V. Int. J. Thermophys., 23, 745 (2002).
124. Polikhronidi N.G., Batyrova R.G., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Stepanov G.V., J. Supercritical Fluids, 33, 209 (2004).
125. Polikhronidi N.G., Abdulagatov I.M., Magee J.W., Stepanov G.V. Int. J. Thermophys., 24, 405 (2003).
126. Martynets V.G., Matizen E.V., Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki. 40, 507 (1974).
127. Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Magee J.W., Kiselev S.B., Ely J.F., Ind. Eng. Chem. Res., 44, 1967 (2005).
128. Kiselev S. B., Ely J. F., Abdulagatov I. M., Huber M. L., Ind. Eng. Chem. Res., 44, 6916 (2005).

# КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ОТРАСЛЕЙ И СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ СЕВЕРО–КАВКАЗСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА. ЭКОНОМИКА→ «ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА» + ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Абдурахманов Г.М.

*ФГБОУ Дагестанский государственный университет;*
*Махачкала, Россия; 367025, ул.Дахадаева 21; e-mail: ecodag@rambler.ru*

В практике планирования применятся два подхода к стратегической модели: во–первых, стратегия сохранения и совершенствования того, что есть (имеем); и, во–вторых, стратегия развития, обеспечивающая новое качество состояния объекта управления. При первом варианте применяется ресурсной подход и стратегическое планирование осуществляется от достигнутого, т.е. присутствует перенос прошлых взглядов на будущее. При втором варианте в основе используют целевую установку состояния на определенный срок.

Главная задача при этом состоит в поиске, создании и использовании новых возможностей, то есть следует ответить на вопрос: Что нужно делать, чтобы достичь поставленной цели? При таком подходе будущее будет управлять настоящим, это инновационный путь развития. Приходится констатировать, что обеспечение перехода экономики с ресурсного на инновационный путь развития в настоящий период нереально. Можно лишь заложить основу для такого перехода.

Сценарий развития – проектируемая схема – модель, определяющая тенденции развития хозяйственных комплексов в будущем периоде при выбранных приоритетах – для региона определяет развитие экономики через ее модернизацию, основанную на высвобождении частной инициативы, на активной интеграции региона и Российского мирового сообщества при одновременной защите производителей от недобросовестной конкуренции. Данный сценарий должен быть адаптирован для региона – субъекта развития, структурно–логическая модель ее для Республик СКФО.

В этой Стратегии развития региона, рассматриваются четыре сценария развития региона – инерционный, стабилизационный или аграрно–ориентированный, рекреационный и энергетический, которые дополнены нами экологически направленным сценарием устойчивого развития, который весьма реален в случае непринятия радикальных мер. Во всех трех вариантах прослеживается традиционный подход к стратегии развития региона, не учитывающий экологический статус региона. Их основное различие состоит в выборе отрасли, являющейся точкой роста (энергетика, рекреация, сельскохозяйственное производство). Выбор конкретного сценария определяется имеющимся соотношением «потенциал – ресурсы». При этом следует иметь в виду, что любой из сценариев не исключает развития отраслей, являющихся точками роста в иных сценариях. Каждый из сценариев предусматривает развитие комплекса отраслей, являющихся приоритетными для экономики региона, но в разных статусах, а именно, ведущих или ведомых (рис.1).

***Первый сценарий*** **– инерционный** – предполагает сохранение современных тенденций развития, существующих условий и главных особенностей функционирования основных отраслей экономики и социальной сферы с опорой на действующие организационно–экономические механизмы. Развитие по инерции означает следование в русле событий, происходящих в регионе, стране, адаптация к изменяющимся условиям существования, стремление к выживанию, ориентация на стихийно складывающиеся

закономерности в экономической жизни. При этом осуществляется вялотекущее реформирование хозяйства к условиям рынка без радикальных попыток решения накопившихся проблем как в отраслях и сферах экономики, так и в целом территории. Сохранение существующего инвестиционного предпринимательского климата приведет к относительно невысоким темпам экономического развития, незначительной степени диверсификации экономики, стагнации в сфере услуг. При этом произойдет ухудшение демографической ситуации, в т.ч. из-за сокращения рождаемости, увеличения демографической нагрузки на работающее население.

Возрастет износ основных фондов, как в производстве, так и в сфере услуг, что будет способствовать сокращению возможностей развития производства и повышению социальной напряженности, связанной с сокращением возможностей получения образовательных, медицинских, социальных и культурных услуг. Возрастет социальное расслоение населения, увеличится безработица, произойдет отток экономически активного населения в город и более привлекательные регионы. При данном сценарии внешний рынок сельскохозяйственной продукции будет крайне ограничен, определяя преимущественно натуральный тип хозяйства.

Вероятность рассматриваемого сценария в целом достаточно низкая, однако возможно и частное его исполнение, и переходные варианты, критическими моментами при инерционном варианте развития являются: неразвитость гражданского общества, низкая социальная активность, формальное отношение к развитию системы самоуправления; закрытость экономики региона, сохранение и усиление государственного протекционизма; отсутствие активной инвестиционной политики, неблагоприятный предпринимательский климат; недостаток государственного и частного инвестирования развития инфраструктуры; сохранение высокой дотационности консолидированного бюджета республик региона. При развитии республик региона по данному сценарию снизится ее конкурентоспособность.

***Второй сценарий*** **– стабилизационный или аграрно–ориентированный,** ведущей отраслью реального сектора экономики является сельское хозяйство. Данный вариант предполагает сохранение сложившейся структуры экономики, эволюционное развитие всех сфер хозяйственного комплекса. По этому сценарию положительные сдвиги могут быть получены, главным образом, за счет организационно–экономических мероприятий, направленных на повышение конкурентоспособности на внешнем рынке отдельных видов сельскохозяйственной продукции, таких как мясо, виноград, фрукты, винно–водочные изделия.

Использование материально–производственных ресурсов в сельском хозяйстве (особенно в растениеводстве) носит ярко выраженный сезонный характер, что обуславливает возникновение проблемы повышения эффективности их использования. В связи с этим возрастает роль оптимизации размеров и стоимостных характеристик материально–технических ресурсов.

Основная масса виноградных насаждений Российской Федерации сосредоточена в Северо–Кавказском Федеральном округе, в том числе в Республике Дагестан, где благоприятные почвенно–климатические условия позволяют возделывать эту культуру, а также благоприятные эколого–экономические и социальные условия для интенсивного развития виноградарства.

Возрождение виноградно–винодельческой отрасли Дагестана и Российской Федерации на новом качественном уровне является задачей

государственной важности.

Наличие трудового потенциала является достаточно значимым фактором. Массовая безработица в период реформ привела к снижению уровня квалификации работников АПК, а также к утрате навыков, стимулов и мотивов к труду, но рост трудового потенциала АПК может быть обеспечен только за счет сельского населения и роста его квалификации. Природные условия (климат, ландшафт) предопределяют развитие овцеводства и мясного скотоводства. Из отраслей растениеводства эффективно может развиваться плодоводство, кормопроизводство. Социально–культурные традиции населения также позволяют развивать вышеперечисленные виды деятельности. В качестве конкурентных продуктов предполагается выпуск таких товаров как мясо, мед.

Наращивание производства данных видов продукции не требует специальных программ и отдельного государственного регулирования. Развитие сельского хозяйства более высокими темпами может определить рост сопутствующих и поддерживающих отраслей, таких как:

- пищевая промышленность (производство колбас и копченостей)
- легкая промышленность (производство одеял и других изделий из шерсти);
- туризм (потребление продуктов питания);
- энергетика (переработка продукции сельского хозяйства);
- промышленность строительных материалов;
- производственная инфраструктура (связь, торговля, транспорт);
- услуги в области права, аудита, ветеринарии.

Развитие отраслей АПК вызовет спрос на новые ресурсосберегающие технологии в области семеноводства (разработка технологии выращивания адаптированных высокопродуктивных семян), племенного дела, кормопроизводства. Реализация рассматриваемого сценария возможна при осуществлении системы программных мероприятий с акцентом на следующее:

1. Электрификация сельского хозяйства, в частности, летних стоянок, для механизации производства и повышения его эффективности.

2. Выделение целевых бюджетных субсидий сельскохозяйственным предприятиям для проведения:

- ежегодного перезалужения;
- ежегодного поверхностного улучшения естественных сенокосных угодий;
- комплексной реконструкции оросительных систем на площади;
- замены вышедших из строя трубопроводов на оросительной сети;
- ежегодного внесения сельхозпредприятиями и фермерскими хозяйствами Республик 25% органических и минеральных удобрений;

3. Содействие развитию перерабатывающей промышленности в сельской местности через налогово–бюджетный и инвестиционный механизмы.

4. Дальнейшая реализация региональной целевой программы по финансовому оздоровлению предприятий–сельхозтоваропроизводителей.

5. Создание маркетинговых структур, ориентированных на малые предприятия, в т.ч. сельскохозяйственные.

Ожидаемый *социальный эффект* при реализации стратегии выражается в сохранении уклада жизни; повышении занятости сельского населения; развитии сельской местности; удовлетворении спроса на продукты питания.

Ожидаемый *экономический эффект:* рост объемов производства сельскохозяйственной продукции; рост налогооблагаемой базы; увеличение числа занятого населения в сельском хозяйстве.

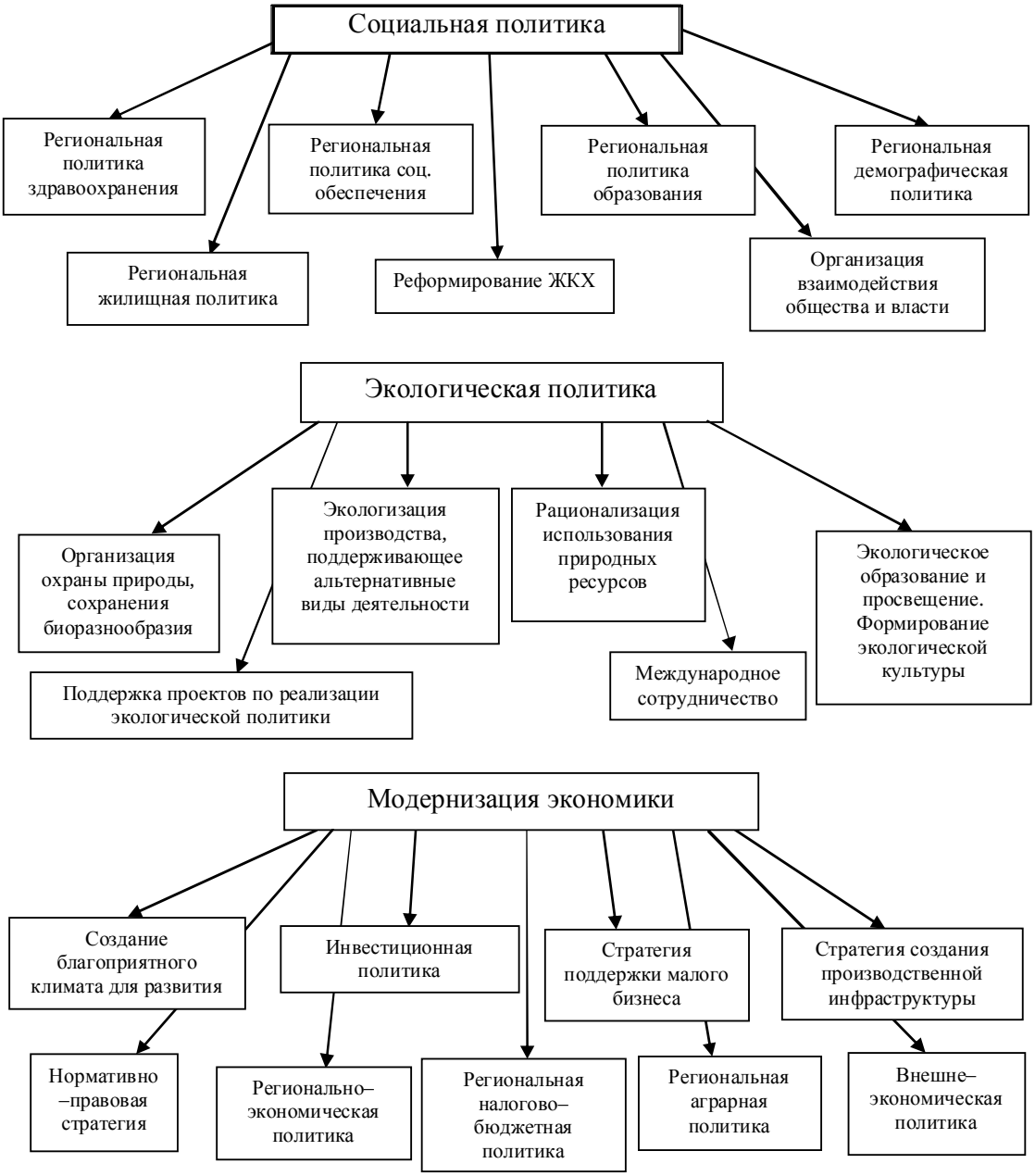



Рис.1. Возможная стратегия развития региона

***Третий сценарий*** **– рекреационный** – предусматривает приоритетное развитие рекреационно–туристских услуг на основе развития рыночной инфраструктуры (сферы обслуживания) и создания оптимального предпринимательского климата для функционирования малого бизнеса. Он предполагает зонирование территории региона, включающей в себя: особо охраняемые территории различных типов; «буферные» зоны, где осуществляется ведение традиционного природопользования коренных жителей, экологического и других видов туризма; зоны ведения интенсивной экономической деятельности с определенными экологическими ограничениями.

В основу стратегии положено преимущественное развитие турбизнеса как отрасли специализации в межрегиональном разделении труда. Регион привлекает внимание уникальными природными объектами, а также историческими и археологическими памятниками; разнообразными этническими традициями, обычаями и обрядами; местными промыслами и ремёслами, что выдвигает

республики СКФО на роль рекреационных территорий не только регионального, но и российского и международного значения. Трудовой потенциал с позиций наличия трудовых ресурсов вполне достаточен, однако не соответствует по квалификационным характеристикам. На ряд профессий спрос превышает предложение.

Производственный потенциал для реализации данной стратегии представлен сетью гостиниц и туристических баз. Инфраструктура туризма (дорожная сеть, современные линии связи, сеть развлечений и т.д.) является одним из слабых мест реализации данной стратегии.

Финансово–инвестиционный потенциал представлен преимущественно частными инвестициями, государственные инвестиции ограничены и должны использоваться для сооружения крупных туристических объектов и объектов инфраструктуры, которые и составят основу отрасли. Необходимо также сохранение современного объёма частных инвестиций в небольшие туристические проекты.

Наличие описанных условий позволяет создать конкурентоспособный продукт – туристические услуги широкого спектра, ориентированные на разного потребителя. Населением близлежащих регионов наиболее востребованы рекреационные ресурсы – возможности организации краткосрочного отдыха, в том числе активного (горные лыжи, рафтинг, конные и пешие туристические маршруты, альпинизм и т.д.). Для населения Европейской части России привлекательными являются возможности активного и санаторно–курортного отдыха. Активный туризм в сочетании с научно–познавательным наиболее привлекателен для зарубежных туристов.

Современное развитие туристической отрасли представлено во всех районах республик региона, предоставляемые туристические услуги дифференцированы по уровням доходов потребителей и имеют свой целевой рынок. Размещение туристических баз в регионе позволяет потребителям в полной мере ознакомиться туристов с биологическим и природным разнообразием региона, древними историческими памятниками (петроглифы, курганы и пр.) и тем самым сформировать многофункциональный региональный турпродукт, включающий в себя несколько видов туризма (экологический, пеший, конный, водный, лечебный, историко–познавательный и пр.). В настоящее время туроператорами в основном предлагается унифицированный продукт (проживание в летний период с трехразовым питанием и незначительной экскурсионной программой, включая рафтинг), что обусловлено финансовыми возможностями туроператоров и наличием у них средств обслуживания туристов.

В существующей структуре региональной экономики туризм относится к продуктам, требующим минимального государственного вмешательства для обеспечения развития и продвижения на рынок. Со стороны государства требуется сокращение административных барьеров и поддержка крупных инвестиционных проектов, к числу которых относятся горнолыжные комплексы и санаторно–курортные учреждения вместимостью более 1000 человек одновременно и значительными объемами вспомогательных сооружений.

Реализация рассматриваемого сценария возможна при осуществлении следующих мероприятий:

- Обеспечение защиты бюджетных расходов, направляемых на финансирование «точек роста», посредством формирования в законе самостоятельных разделов бюджета региона бюджет текущих расходов и бюджет развития (капитальные расходы).

- Льготное налогообложение лизинговых компаний, осуществляющих поставку оборудования в отрасли приоритетного развития регионов.
- Создание регионального инкубатора малых инновационных предприятий, осуществление информационной поддержки малого бизнеса, обучения и тренинга.
- Организация проектного финансирования на конкурсной и долевой основе с целью контроля органов местного самоуправления за финансируемыми инвестиционными проектами.
- Создание условий для продвижения турпродукта на рынок через участие в выставках, ярмарках,
- Организация работы по созданию территориального бренда региона. Для высокопрофессионального осуществления данной деятельности создание специализированного рекламного бюро.
- Повышение качества инвестиционных проектов через разработку системы государственного заказа и государственной оценки. Создание производств по выпуску спортивного и туристического инвентаря, спортивной одежды и обуви и т.д.
- Формирование в бюджете региона гарантийного фонда для частных инвесторов.
- Предоставление гарантий регионального бюджета по локальным инвестиционным проектам, имеющим общерегиональное значение, с обеспечением целевого использования кредитных ресурсов.
- Участие в инвестиционных ярмарках, форумах, в т.ч. зарубежных.

Реализация данной стратегии будет иметь следующий *социально–экономический эффект:*

- Развитие малого предпринимательства;
- Адаптация местного населения к рыночным условиям на основе их вовлечения в туристическую сферу и связанные с ней производства на основе самозанятости (особенно в сельском хозяйстве) и найма;
- Увеличение числа рабочих мест в турбизнесе и смежных отраслях;
- Создание среднего класса;
- Действие мультипликационного эффекта, т.е., подъём отраслей, связанных с туризмом;
- Увеличение поступления налоговых платежей от туристской деятельности во все уровни бюджетной системы;
- Сохранение культурно–исторического наследия.

***Четвертый* – энергетический сценарий развития** предполагает, что регион с учетом имеющихся объективных ограничений социально–экономического потенциала, исторического момента и характера динамики внешних условий в максимальной степени использует благоприятные возможности для развития экономики, социальной сферы и общества.

Решающими предпосылками реализации данного сценария являются:

- корпоративное единство всех граждан, общественных организаций и ветвей власти, высокая социальная активность населения;
- устойчивый благоприятный экономический климат;
- существенная поддержка федерального центра намечаемых преобразований;
- формирование оптимального баланса открытости экономики и позиций государственного протекционизма;
- эффективное использование культурного и интеллектуального потенциала для

развития экономической базы.

Он привлекает своей определенностью и реальностью структурных сдвигов в хозяйстве региона, возможностью определить четкие сроки реализации каждого этапа. Завершение строительства Ирганайской, Гоцатлинской ГЭС и реализация программы развития малой энергетики создаст определенные предпосылки для решения ряда острых проблем социально–экономического развития региона.

**Гидроэнергетические ресурсы Дагестана и их использование.** Республика Дагестан, в связи с наличием горного рельефа, обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом — 55 млрд кВтч (теоретический). Реки региона принадлежат к бассейну рек Сулак (наиболее значительные водотоки — реки Сулак, Аварское Койсу, Андийское Койсу, Кара-Койсу, Казикумухское Койсу), Самур, также имеется ряд небольших самостоятельных рек, впадающих в Каспийское море. Гидроэнергетический потенциал используется несколькими крупными, средними и малыми ГЭС. К числу первых относится Чиркейская ГЭС (1000 МВт, р. Сулак, введена в 1978 году), Миатлинская ГЭС (220 МВт, р. Сулак, введена в 1986 году), Чирюртская ГЭС-1 (72 МВт, р. Сулак, введена в 1964 году), Гельбахская ГЭС (44 МВт, р. Сулак, введена в 2007 году), а также находящиеся в процессе строительства Ирганайская ГЭС (800 МВт, р. Аварское Койсу, завершение строительства первой очереди в 400 МВт запланировано на 2008 год) и Гоцатлинская ГЭС (100 МВт, р. Аварское Койсу, завершение строительства запланировано на 2013 год).

Использование гидроэнергии имеет существенные преимущества и сопоставлении с другими источниками энергии она является возобновляемым источником, технология получения электроэнергии хорошо разработана, при выработке электроэнергии не происходит загрязнение окружающей среды; эксплуатация источника энергии довольно проста; в процессе эксплуатации не образуются отходы.

Намечаемое ускоренное использование гидроэнергетических ресурсов путем строительства за короткий срок каскадов гидроэлектростанций в горных районах со значительным увеличением генерирующих мощностей и производства дешевой электроэнергии позволит создать прочную энергетическую базу для ускоренного развития народного хозяйства республики на перспективу до 2020 года. Вследствие этого строительство гидроэлектростанций имеет комплексное значение. Оно является основой технического и технологического преобразования народного хозяйства республики, совершенствования его структуры, территориального размещения с учетом отсталой экономики горных районов.

Создаваемая мощная энергетическая база с низкой стоимостью электроэнергии, вырабатываемой гидроэлектростанциями, будет стимулировать интенсификацию промышленного производства и дальнейшее его развитие.

Наряду с этим намечено создать в горных районах три крупные территориально-производственные комплекса. На основе этих баз предусматривается строительство новых промышленных предприятий по переработке местных природных ресурсов. Прежде всего, предприятия по консервированию и переработке фруктов, продукции животноводства, по производству строительных материалов и конструкций.

Производимая гидроэлектроэнергия позволит резко увеличить (по расчетам в три раза) отпуск ее сельскому хозяйству, поднять энерговооруженность и производительность труда, технически перевооружить

отрасль, перевести ее на интенсивные технологии, поднять уровень комплексной механизации трудоемких процессов, в полной мере электрифицировать стационарные процессы в растениеводстве, животноводстве и ирригации. Создаваемые водохранилища позволят привлечь в сельскохозяйственный оборот более 22 тыс. га склонных и террасных земель в горных районах. На голых скалистых берегах водохранилищ, где в недавнем прошлом были вырублены леса, появится растительность.

Намечаемое использование гидроэнергетических ресурсов позволит провести реконструкцию старых дорог, сооружение новых. Эти дороги надежно свяжут горную часть Дагестана с равниной и будут способствовать организации новых туристических баз и маршрутов, повышению уровня медицинского, культурного, бытового и торгового обслуживания населения.

В результате осуществления этой программы к концу планируемого периода до 2020 г. выработка электроэнергии на электростанциях республики может быть доведена до 11,8 млрд. кВт. ч. в год.

Как следствие этих количественных и качественных изменений энергетическая система Дагестана станет способной в полной мере обеспечить качественной электроэнергией намечаемое ускорение развития народного хозяйства республики внести весомый вклад в энергобаланс Северо-Кавказского экономического района.

**Преимущества Малых ГЭС.** Малые ГЭС имеют ряд неоспоримых преимуществ в гористой местности перед остальными источниками как возобновляемой, так и не возобновляемой энергии. Вот некоторые из них:

1. Малые ГЭС предоставляют возможность генерации электроэнергии в непосредственной близости от потребителя, что в горной местности особенно актуально, так как отпадает необходимость проводить в труднодоступные горные районы линии электропередач. Этот факт сам по себе открывает новые горизонты перед малой гидроэнергетикой в горных районах, ведь протяженные ЛЭП - это как минимум дополнительные затраты при строительстве (которые в несколько раз выше чем аналогичное строительство на равнинных территориях), дополнительные потери при передаче, и дополнительные риски связанные с всевозможными авариями (оползень, камнепад и т.д.).

2. Малые ГЭС имеют в горных районах также и ряд неоспоримых преимуществ перед ТЭС. Во-первых, как и любая гидроэлектростанция, малая ГЭС способна производить электроэнергию по себестоимости в несколько раз дешевле, в сравнении с электроэнергией, производимой на ТЭС. Во-вторых, в отличие от ТЭС, гидроэлектростанция - это, как известно, источник возобновляемой электроэнергии, то есть нет необходимости постоянно подвозить топливо в труднодоступные районы, соответственно не будет и перебоев с его доставкой. То, о каких масштабах поставки идет речь, становится понятно из следующего примера: Один генератор малой ГЭС мощностью 1 МВт в течение года способен сэкономить около 1,5 тысяч тонн угля или около 5 тысяч баррелей нефти.

3. Малые ГЭС имеют все преимущества крупной гидроэлектростанции, но в тоже время не имеют недостатков присущих крупным ГЭС, а именно – не имеют потерь в виде затопляемых земель, не создают проблем нересту рыбы, оказывают минимальное влияние на экологию и т.д.

4. Основные конкуренты малой гидроэнергетики в труднодоступных горных районах, такие как солнечная и ветроэнергетика не выдерживают конкуренции по ряду показателей, а именно: безусловно, проигрывают в

надежности генерации. Солнечная энергетика слишком зависима от времени суток (ночные и утренние максимумы останутся непокрытыми), от погоды. Ветроэнергетика в этом плане уступает по надежности даже солнечной. Потому что, слишком непредсказуем ветер как атмосферное явление. К тому же строительство малой ГЭС выгодно относительно этих двух видов генерации и в плане затрат на строительство и в плане себестоимости производимой электроэнергии. Так 1 кВт установленной мощности малой ГЭС построенной по технологиям типового модульного строительства гидростанций обходится в 1000 долларов – это ниже чем стоимость установки ветрогенераторов и солнечных батарей и в несколько раз ниже стоимости ТЭС. Более того, если комбинировать малую гидроэлектростанцию с ветрогенератором, то это позволит свести к минимуму недостатки обоих систем (у малых ГЭС это маловодный период зимой, что может быть компенсировано ветрогенераторами).

5. Малые ГЭС могут быть построены с расчетом на минимальную воду. А значит, это очень положительно скажется на динамической устойчивости энергосистемы.

6. Еще одним неоспоримым плюсом малой гидроэнергетики является то, что источниками ресурсов МГЭС являются малые реки, неэнергетические водохранилища, каналы (в том числе судоходные), естественные и искусственные водосбросы.

7. Относительно быстрая окупаемость. Строительство малых ГЭС модульного типа помимо того, что не требует больших финансовых и временных затрат, к тому же и быстро окупается. Это связано и с достаточно дешевой себестоимостью вырабатываемой электроэнергии и с тем, что к ее выработке малая ГЭС может приступить в достаточно короткий период. Это и многое другое в условиях горной местности определенно делает строительство малых ГЭС в труднодоступных горных районах безусловным лидером по эффективности и отдаче, среди других источников генерации.

И если раньше строительство малой гидроэлектростанции сталкивалось с проблемой в виде нехватки или отсутствия ассортимента среди оборудования, то теперь оборудование для малых ГЭС производят многие фирмы США, Японии, Швеции, Швейцарии, Франции, Австрии, Великобритании. Производство такого оборудования начато и в государствах Восточной Европы.

Серьезное внимание уделяют повышению экономической эффективности малых ГЭС за счет упрощения их проектирования, строительства и эксплуатации, типизации проектных решений, стандартизации оборудования и полной автоматизации работы ГЭС.

Все вышеперечисленное позволяет сделать вывод о том, что малая гидроэнергетика в горных, труднодоступных районах это одно из самых перспективных и выгодных направлений развития энергетики.

**Перспективы освоения геотермальных ресурсов Дагестана.** В настоящее время в Дагестане имеется большое количество скважин, в которых получены притоки термальных вод дебитом от сотен до тысяч $м^3$/сут и температурой от $60^0$ до $107^0$С. Разведанные запасы термальных вод различной минерализации могут найти широкое применение для теплоснабжения, создания энергоемкого направления аграрного производства по выращиванию в зимний период сельхозпродукции в закрытых грунтах и ценных пород рыб в прудах, мойки шерсти, организации производства по извлечению ценных химических компонентов из высокоминерализованных вод, а также их использования для бальнеологических целей и розлив лечебных и столовых вод.

Ускоренному развитию геотермального производства в РД будут способствовать имеющиеся производственные мощности, накопленный опыт Института проблем геотермии ДНЦ РАН. Необходимы также дополнительные государственные инвестиции.

Характерной особенностью для Дагестана является наличие большого количества мелких потребителей энергии, удаленных от источников и центров распределения энергии, – это хутора, фермы и другие крестьянские хозяйства. Строительство линий электропередач, таким потребителям экономически невыгодно, а зачастую и технически затруднено. Специфика использования нетрадиционных источников энергии очень хорошо соответствует этим особенностям.

Необходимость широкого развития нетрадиционной энергетики в регионе не вызывает сомнений. Для осуществления этого необходима региональная программа со смешанным финансированием, государственной поддержкой в виде налоговых льгот и инвестиций, с конкретными исполнителями и конкретными ответственными.

Но сами исследования должны вестись несколько в ином направлении. Суть их должна заключаться не в бесконечных оценках ресурсов, и в не создании (а затем тиражировании) пока несовершенных и почти никому ненужных устройств, а в упорных поисках новых, более эффективных способов использования нетрадиционных источников, в нахождении оригинальных конструктивных решений, благодаря которым новые энергоустановки могли бы стать конкурентно способными с традиционными средствами энерго– и теплоснабжения.

Создание мощного энергоисточника в составе объединенной энергосистемы региона предполагает создание многоотраслевой экономики и дает возможность резкого повышения энерговооруженности, позволяет ускорить развитие отраслей переработки сельскохозяйственного сырья, оказывает положительное влияние на уровень благоустройства жилого фонда.

Экологически приемлемая или «Зеленая энергетика» позволит:

- полностью покрыть потребности населения в электроэнергии;
- экспортировать электроэнергию в соседние регионы;
- более эффективно развивать стратегически важные отрасли промышленности (цветная металлургия), производство стройматериалов, пищевая промышленность);
- комплексно развивать аграрно–промышленный комплекс;
- на новом качественном уровне развивать туризм.

Основными предпосылками реализации этого сценария являются: наличие значительных энергоресурсов и возрастающий спрос на электроэнергию в народном хозяйстве, который обусловлен ростом объемов производства в республике и соседних регионах, увеличением энергоемкости производства, повышением потребностей в электроэнергии со стороны населения.

Решающим фактором реализации этого пути развития является возможность использования энергетического потенциала рек Самур, Сулак, Терек и др. Существующая региональная экономическая структура привела к тому, что на региональном рынке труда образовался дефицит кадров, имеющих образование и опыт работы в строительной, энергетической отрасли. В случае реализации данного сценария необходимо организовать подготовку кадров (на базе Дагестанской школы энергетиков).

В то же время, среди условий реализации данной стратегии есть и

неблагоприятные. Энергетический путь развития возможен в случае привлечения значительных объемов инвестиций, их отсутствие делает невозможным строительство ГЭС, а, следовательно, и развитие региона по этому сценарию. Преодоление данного фактора возможно путем привлечения частного капитала со стороны крупных, средних, и мелких инвесторов. В условиях роста предложений инвестиционных ресурсов, который наблюдается в регионе, предлагаемый выход является реалистичным.

Энергетическое направление развития дает синергетический эффект, выражающийся в увеличении производства сопутствующих отраслей, к которым относятся отрасли, вырабатывающие ресурсы для ведущей отрасли, и потребляющие продукцию ведущей отрасли. К экономическим секторам, обеспечивающим электроэнергетику, относятся строительство, промышленность стройматериалов, дорожное хозяйство. Соответственно получат развитие производство строительных услуг, строительство и обслуживание дорог, песчано–гравийных смесей, изделия из природного камня, жилищно–коммунальных услуг и т.д.

К отраслям, являющихся активными потребителями электроэнергии относятся: цветная металлургия, промышленность стройматериалов, пищевая промышленность, сельское хозяйство, туристская отрасль. Соответственно, сопутствующими продуктами будут: цветные металлы (концентраты вольфрама, молибдена, меди); продукция аграрно–промышленного комплекса (мясо, колбасы, сыры, шерсть, корма и т.д.), а также турпродукты, предлагаемые туристской отраслью. Производство побочной продукции способно удовлетворить не только внутренний, но и внешний (по отношению к региону) спрос. Так продукция цветной металлургии будет полностью экспортироваться. Продукция остальных отраслей будет частично экспортироваться. Помимо развития сопутствующих отраслей энергетический сценарий развития активизирует инновационную сферу. Строительство и эксплуатация ГЭС вызовет внедрение инноваций в области технологии, управлении предприятием, повышения квалификации рабочей силы в сопутствующих отраслях, перечисленных выше. Реализация рассматриваемого сценария возможна при осуществлении следующих мероприятий:

1. Подготовка предложений и выход с законодательной инициативой о внесении изменений в Налоговый кодекс РФ в части сохранения льгот по налогу на прибыль, недвижимость при осуществлении капитальных вложений.
2. Обеспечение защиты бюджетных расходов, направляемых на финансирование «точек роста» посредством формирования в законе о республиканском бюджете самостоятельных разделов – бюджет текущих расходов и бюджет развития (капитальные расходы).
3. Оценка минерально–сырьевых ресурсов с учетом перспективного роста производства и проведение конкурса на разработку местной минерально–сырьевой базы: вольфрам, молибден, серебро, ртуть, мрамор и др.
4. Разработка и реализация региональной целевой программ по повышению конкурентоспособности продукции местных производителей.
5. Предоставление налоговых льгот в части региональных налогов предприятиям, осуществляющим модернизацию и техническое перевооружение, внедряющим ресурсосберегающие технологии, предварительно выработав критерии отбора льготируемых предприятий.
6. Льготное налогообложение лизинговых компаний, осуществляющих поставку оборудования в отрасли приоритетного развития региона.
7. Разработка и реализация региональной целевой программы по

электрификации и энергообеспечению региона на период до 2030г.

8. Формирование в бюджете региона гарантийного фонда для инвесторов.
9. Предоставление гарантий регионального бюджета по локальным инвестиционным проектам, имеющим общерегиональное значение, с обеспечением целевого использования кредитных ресурсов на основе разработки постатейных финансовых значений для кредитующих организаций.
10. Участие региона в инвестиционных ярмарках, форумах, в т.ч. зарубежных.

Развитие по данному сценарию позволит перейти в новое качественное состояние, основные параметры *социального характера* которого являются:

- улучшение демографических показателей на основе экономического роста;
- снижение смертности и увеличение рождаемости; улучшение основных параметров качества жизни за счет роста доходов, развития систем здравоохранения, культуры;
- увеличение среднемесячной зарплаты до эквивалента 300–400 $;
- повышение средней продолжительности жизни на 3–5 лет;
- постоянное снижение заболеваемости, повышение качества образования, в т.ч. специального;
- многоотраслевая структура экономики – развитие обрабатывающих отраслей, производящих продукцию на межрегиональный рынок;
- развитая сфера услуг и туризм, отвечающий международным стандартам;
- высокие (8–10%) темпы роста ВРП;
- рост инвестиций в основной капитал до 9–12% в год;
- стабильное увеличение экспортного потенциала;
- заметное повышение доли лиц, относящихся к среднему классу.

При развитии по такому сценарию регион обеспечит себе высокий уровень конкурентоспособности среди других регионов РФ. Вероятность реализации данного сценария достаточно высокая, и имеется достаточно высокий социально–экономический потенциал. Кроме того, срок для реализации запланированных идей и мероприятий вполне достаточен. Однако анализ показывает, что реальная траектория развития экономики региона осуществится в форме взаимопроникновения положений различных сценариев. На наш взгляд, наиболее вероятен синтез 2 и 3 вариантов.

Исходя из вышесказанного, нами предлагается ***пятый сценарий*** – **экологически направленный – устойчивого развития**. Основные условия реализации данного проекта приведены в табл.1**.** Структурная перестройка экономики под влиянием создания особой экономической зоны рекреационно–туристского типа и создания собственной энергетической базы на основе строительства системы малых ГЭС и использование нетрадиционных геотермальных источников получения электро– и тепловой энергии (солнечной, ветровой, биогаз) выразится в интенсивном развитии ряда отраслей, обязательное условие – экологизация производственных процессов. В сравнении с другими вариантами стратегии развития в данном случае происходит диверсификация экономики республики в целом и в ее административных районах, которая становится многоотраслевой, а отсюда – и более устойчивой.

Осуществление двух крупных инвестиционных проектов – рекреационного и энергетического – позволит более полно использовать природные ресурсы, а при условии экологизации производственной деятельности и сохранения окружающей природной среды создаст новые конкурентные преимущества или усилит существующие. Создание многоотраслевой устойчивой

экономики будет сопровождаться созданием большого количества новых рабочих мест, что повысит денежные доходы населения и будет способствовать росту уровня их жизни. Новые рабочие места потребуют совершенствование системы образования и подготовки кадров, что будет способствовать развитию социальной сферы. Развитие экономики обусловит увеличение налогооблагаемой базы, увеличение величины собственных доходов региона и населения, снижение дотационности, рост уровня и качества жизни жителей региона при сохранении окружающей природной среды.

Таблица 1. Условия реализации сценария устойчивого развития

| **Турпродукт + электроэнергия** | |
|---|---|
| **Параметры факторов** | **Параметры спроса** |
| ***Позитивные*** | ***Позитивные*** |
| Рекреационные и энергетические ресурсы | Приемлемость цен на услуги. Устойчивый спрос на электроэнергию. |
| Природные условия для развития многочисленных видов туризма. Наличие региональной программы по развитию энергетики и проектно–сметной документации | Диверсификация туристических объектов по всей территории региона. Развитие различных новых видов производства. |
| Формирующая сеть туристических баз, баз отдыха, кемпингов. Существующая энергосистема | Наличие на рынке разнообразных видов турпродуктов. Наличие устойчивого спроса на электроэнергию в соседних регионах. |
| Разработка схемы размещения туристических объектов на территории региона. Существующая промышленность стройматериалов. Состояние дорожного хозяйства | Включение в туристический пакет разнообразных дополнительных услуг (экскурсии, рафтинг и пр.) |
| ***Негативные*** | ***Негативные*** |
| Ограниченность земель в собственности региона. Ограниченность инвестиций. | Сезонный характер производства и спроса |
| Запрет строительства объектов капитального характера в лесах 1 группы | Низкое качество сервиса в сфере туризма; изношенность районных электросетей |
| Отсутствие подготовленного обслуживающего персонала, как для туристической отрасли, так и для энергетики | Конкуренция со стороны других регионов России |
| Окупаемость вложений в туристическую отрасль и в энергетику в течение 10-15 лет | |

**Экологоприемлемый путь развития Северо–Кавказского Федерального Округа.** Республики СКФО еще остаются теми редкими территориями России, которым удалось в силу ряда причин (особенности ландшафта, удаленность от индустриальных и административных центров, низкий уровень экономического, главным образом индустриального развития и др.) сохранить относительно нетронутым свой богатейший природный потенциал. Однако биологическое разнообразие, присущее данной территории, положительно характеризуя природную составляющую региона, отнюдь не свидетельствует о его полном экологическом благополучии. Имеются проблемы в значительной степени связанные с такими особенностями региона как высокая

сейсмичность, аккумулятивная способность горных и предгорных ландшафтов. Не являются исключением элементы антропогенного воздействия на природную среду, при этом наиболее активную роль играют трансграничные переносы вредных веществ, а также загрязнения, сформировавшиеся на территориях республик. Все эти факторы, а также низкий уровень развития здравоохранения в республиках, служат причиной того, что обсуждаемая территория является в Российской Федерации одной из больных регионов, по величине показателя – потерянные годы потенциальной жизни.

Существуют пять основных и весьма перспективных для горных условий видов природопользования: энергетика, горнорудная промышленность, сельское хозяйство, туризм, использование биологических ресурсов. Однако, наличие уникальных природных ресурсов, с одной стороны, и уязвимость горных ландшафтов, с другой, накладывают серьезные экологические ограничения на интенсивное индустриальное и аграрное развитие районов региона:

1. Ограничения индустриального развития связаны как с экономическими, так и с экологическими факторами. Это, прежде всего низкая энергообеспеченность республик и невозможность быстрого и эколого–приемлемого ее роста. Энергетические проблемы республик могут быть решены за счет развития малой энергетики. Строительство малых ГЭС, как правило, не ведет к резкой смене режима водотока, микроклимата и т.д., но зачастую ограничивает рекреационную ценность природных объектов и (или) выводит из оборота и без того ограниченные сельскохозяйственные угодья.

2. Почти четверть населения республик региона, проживают в городах, которые сегодня уже нельзя считать комфортным местом для жителей. Их территории характеризуются низкой инверсионной активностью и соответственно загрязненной атмосферой. Основными загрязнителями являются крупные и мелкие котельные, автомобильный транспорт. Дальнейшее расширение горнорудного производства в регионе возможно лишь при смене технологического режима добычи и переработки сырья, создании современной системы маркетинга. В настоящее время функционирование действующих предприятий малоэффективно из–за высокой отходности и энергоемкости технологий извлечения сырья, а также высоких транспортных расходов, как при поставке основных средств, так и при вывозе конечной продукции.

3. Экологические ограничения расширения горнорудного производства имеют множественный характер. Прежде всего, это полиметаллическая и редкометалльная специфика многих месторождений, освоение которых сопровождается расширением ареалов рассеяния тяжелых металлов – свинца, меди, цинка.

4. Аграрный сектор занимает важное место в экономике Республик региона. Здесь, где горное природопользование является основным элементом региональной системы, аграрное природопользование имеет четко выраженный очаговый характер. Особенно важно определение природного и экономического потенциалов его аграрного природопользования на топологическом уровне, учитывающем морфоструктуру территории, индивидуальное сочетание ландшафтов (типов местностей) в границах административно–хозяйственных субъектов (районов, предприятий, хозяйств). Выявление аграрно–природного потенциала хозяйствующих субъектов и его структуры позволит определить природную и экономическую предрасположенность к тому или иному виду аграрного природопользования, а также предсказать возможную реакцию природных комплексов на его дальнейшее развитие, т.е. определить

экологические ограничения того или иного вида сельскохозяйственной деятельности. Особое место в системе регионального горного природопользования занимают межгорные котловины, характеризующиеся высокой степенью хозяйственной освоенности, большей долей растениеводства и значительной распаханностью территории. Здесь мы видим типичный для горных местностей пример формирования объектно–обусловленной системы аграрного природопользования, когда наличие объекта, в данном случае межгорной котловины, наиболее благоприятной для проживания населения и осуществления хозяйственной деятельности, привносит новые виды деятельности и формы ее организации.

Эти районы требуют особого внимания специалистов – экологов и природоведов, так как с экологической точки зрения они наиболее уязвимы, и в случае нарушения определенных критериев хозяйственного освоения могут привести к разбалансированности целых региональных экологических систем. Очень важно определить экологическую емкость.

5. Использование разнообразных биологических ресурсов – важный резерв будущего развития региона. Важным источником будущего устойчивого социального и эколого–экономического развития СКФО могут стать его разнообразные, зачастую уникальные рекреационные ресурсы. Рекреационный путь развития регионов очень перспективен, но он должен быть организован и экологически приемлем. Рекреационное освоение территории должно проходить цивилизованно и сопровождаться адекватными мерами по сохранению природных ресурсов, а в ряде случаев – их восстановлением. Экологический статус СКФО – это основной резерв ее хозяйственного развития. Приоритет индустриального пути не приемлем для данного региона ни с экономической, ни с экологической, ни с социокультурной точек зрения.

Данный регион может и должен стать одним из первых в России, где на деле реализуется стратегия устойчивого развития. Сегодня это хорошо понимают не только ученые – природоведы и биологи, историки и археологи, этнографы и представители других отраслей науки, но и руководители субъектов СКФО.

Однако, анализ утвержденной Правительством России Стратегии развития СКФО, в части формирования правительственной финансово–бюджетной и экономической политики и определения экономических подходов и приоритетов, не подтверждает выбор регионом экологического пути развития.

Сравнивая все инвестиционные предложения по республикам, мы видим, что доля капитальных вложений, предусматриваемых на природоохранные мероприятия за счет всех источников финансирования, не превышает 0,11% общего объема инвестиций, тогда как мировая практика называет такие параметры необходимых отчислений на охрану окружающей среды и проведение природоохранных мероприятий от всех инвестиций в экономику региона, как 1–3 % от общего объема.

# ВОПРОСЫ ОБУЧЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ И МАГИСТРОВ ПО ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Алхасов А.Б. [1], Баранов Д.А.[2], Симакин В.В. [3], Тюхов И.И.[2]

*[1] ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru*

*[2] Московский государственный университет инженерной экологии; Москва, Россия; 105066, ул.Старая Басманная 21/4; e-mail: ityukhov@yahoo.com*

*[3] ФГУП Всероссийский электротехнический институт; Москва, Россия; 111250, ул.Красноказарменная 12.*

В рамках проводимой реформы научно-образовательного сектора страны в 2009 г. в России разработан и начал функционировать Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования (ФГОС ВПО), который представляет собой совокупность требований, обязательных при реализации основных образовательных программ бакалавриата и магистратуры всеми образовательными учреждениями высшего профессионального образования (высшими учебными заведениями, вузами) на территории Российской Федерации, и в частности, по направлению подготовки 140400 Электроэнергетика и электротехника [1-3]. Профиль подготовки бакалавриата - "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии" ориентирован на подготовку нового молодого поколения энергетиков, разрабатывающих, проектирующих и эксплуатирующих энергетические установки, устройства, использующие в качестве энергоресурса естественные энергетические потоки, а также нетрадиционные схемы тепло- и электрогенерации. В стратегической перспективе образование рассматривается как важнейший фактор и ресурс развития общества и государства.

Как показывает анализ программ бакалавриата, в частности по электроэнергетике и электротехники [4], основные профессиональные знания бакалавра формируются в течение последнего года обучения (всего 2200 часов, 900 аудиторных часов) (рис.1).

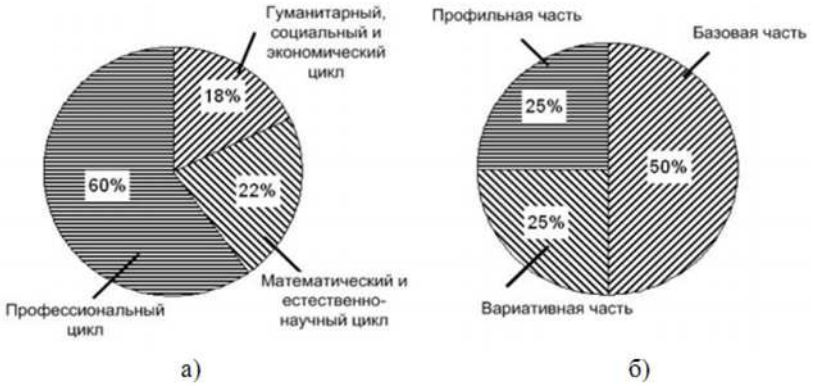



Рис.1. Общая структура (а) и структура профессионального цикла (б) учебного плана бакалавра по направлению подготовки электроэнергетика и электротехника [4]

Реализация учебного плана подготовки бакалавра по семестрам (рис. 2) показывает, что первые два общеобразовательных цикла распределены на начальные 3 года обучения (6 семестров). Определяющая часть общепрофессионального цикла распределена также на 3 года обучения (3-8 семестры) и только профильная часть профессионального цикла изучается фактически в одном 7 семестре.

Из анализа рис.2 следует, что представленный учебный план формирует неполное высшее образование, в котором преобладают базовая и вариативная части профессионального цикла (инженерная графика, прикладная механика, теоретические основы электротехники, электрические машины, общая энергетика и т.д.), а профильная часть профессионального цикла сокращена до 1100 часов. Этот показатель втрое ниже времени подготовки специалиста-инженера и, следовательно, втрое уменьшены профессиональные знания (компетенции), полученные бакалавром.

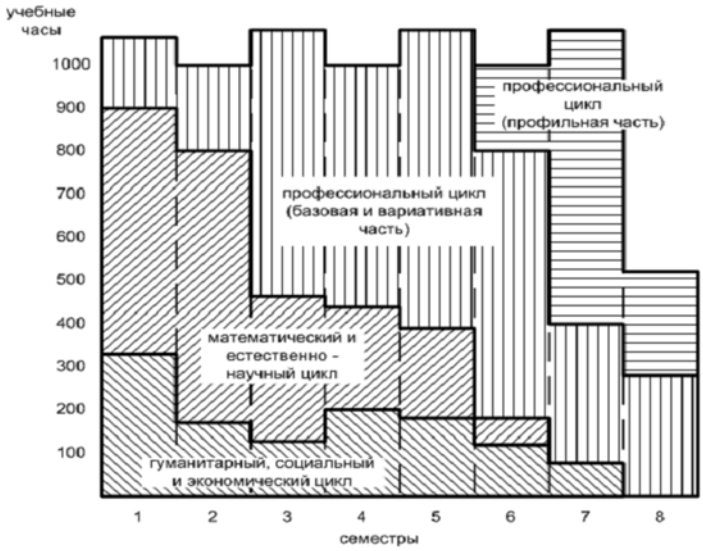



Рис.2. Структура реализации учебного плана бакалавра по направлению подготовки электроэнергетика и электротехника [4]

В то же время перед университетами ставится задача восстановить международную конкурентоспособность российской высшей школы. Т. о., задача подготовить квалифицированные кадры тем более в сжатые сроки стоит очень остро.

По мнению авторов статьи, решению поставленной задачи может способствовать введение в систему образования «физтеховского» подхода вовлечения студентов в реальную научно-исследовательскую и проектно-конструкторскую деятельность, осуществляемую совместно с академическими и прикладными НИИ, учреждениями, компаниями и другими организациями, занимающимися реальными разработками в соответствующих областях.

В новых условиях необходимо сохранить традиции МГУИЭ по вовлечению студентов в активную научную и проектную деятельность совместно с ОИВТ РАН, ИПГ ДНЦ РАН, ФГУП ВЭИ, ГНУ ВИЭСХ и другими организациями в рамках госбюджетных и договорных работ. Ряд работ выполненных на конкурсной основе по Федеральным целевым программам дали интересные результаты и способствовали своевременной защите аспирантов.

ФГУП ВЭИ, МГУИЭ и ИПГ ДНЦ РАН поддерживают инициативу ОИВТ РАН на предварительное проектирование Дагестанского Центра возобновляемой энергетики на базе филиала ОИВТ РАН в г. Махачкале, который призван более полному освоению возможностей возобновляемой энергетики в интересах ТЭК Республики Дагестан и страны в целом, а также для решения образовательных задач.

Комплекс филиала ОИВТ РАН в г. Махачкале – полигон «Солнце» включает: 5 двухэтажных жилых дома с активными и пассивными системами солнечного и геотермального теплоснабжения, в 3-х из которых используются

тепловые насосы для системы отопления, 3-х этажный лабораторный корпус с системой солнечного горячего водоснабжения, 2-х этажный административный корпус и столовая с системами солнечного горячего водоснабжения, другие объекты и сооружения, использующие солнечную и геотермальную энергию для различных целей (гелиосушилки, гелиотеплицы, водонагревательные установки), экспериментальные мастерские, а также различные вспомогательные здания и сооружения (примеры на фото, рис.3-5).

Рис. 3. Проф. Амадзиев А.М. с солнечным дистиллятором (полигон «Солнце» , 2010 г.)

Все здания и сооружения выполнены по специальным проектам и носят экспериментальный характер. На всех зданиях и сооружениях установлены солнечные водонагревательные установки и системы солнечного теплоснабжения.

Полигон «Солнце» имеет производственную и экспериментальную базу, позволяющую разрабатывать, исследовать и внедрять установки энергоснабжения, использующие НВИЭ (рис.3-5).

Рис.4. Система солнечного теплоснабжения (полигон «Солнце»)

Следует отметить, что полигон «Солнце» может стать основой Дагестанского Центра возобновляемой энергетики для разработки различных видов возобновляемых источников энергии и осуществления проектов по технологическим платформам: малая распределенная энергетика, перспективные технологии возобновляемой энергетики, интеллектуальная энергетическая система России. Необходимым условием этого является стабильное финансирование, как на федеральном, так и на местном уровне. Наличие такого

центра позволит качественно решать задачи подготовки, как бакалавров, так и магистров и качественно готовить специалистов высокого уровня, обладающими практическими навыками.

Опыт вовлечения студентов (в рамках курсовых работ, практики, дипломного проектирования), а также и аспирантов в работу полигона уже есть. Летом организуется лагерь для школьников. Регулярно в Институте проблем геотермии ДНЦ РАН проводится Школа молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени члена-корреспондента РАН Э.Э. Шпильрайна.

Рис.5. Солнечные коллекторы на крыше (полигон «Солнце»)

При стабильном и адекватном финансировании Центр сможет выполнять целый ряд функций: координация и организация НИР и ОКР (заметим, что без стадии ОКР практически невозможна коммерциализация инновационных разработок) с привлечением ведущих университетов, как Дагестана, так и РФ, тестовые и сравнительные испытания оборудования в реальных условиях работы и интеграции в существующие и новые объекты полигона, организация популяризация и демонстрация эффективных разработок широкой публики и властным структурам, координация международного сотрудничества (уже накоплен опыт проведения мероприятий, посвященных ВИЭ, по линии ЮНЕСКО), активное вовлечение талантливых школьников, студентов и аспирантов в реально осуществляемые научно-практические проекты. Такой подход поможет повысить качество обучения и практической подготовки бакалавров и магистров, а также будет способствовать решению задачи увеличения доли использования ВИЭ в стране до 4,5 % к 2020г.

**Литература:**

1. Федеральный образовательный стандарт высшего профессионального образования подготовки магистров по направлению 140400 Электроэнергетика и электротехника. М.: ФГОС-03, 2009.
2. Федеральный образовательный стандарт высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению 140400 Электроэнергетика и электротехника. М.: ФГОС-04, 2009.
3. Примерная основная образовательная программа высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению 140400 Электроэнергетика и электротехника. М.: МЭИ, 2010.
4. Платонов В.В. О проблемах подготовки в России специалистов в области электроэнергетического и электроэнергетического образования Москва, 2011, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, 45 стр.

# К ТЕОРИИ НЕЛОКАЛЬНОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: lanten50@mail.ru*

Развивается новый подход в теории нелокальной и неизотермической фильтрации основанный на применении математического аппарата интегро-дифференцирования дробного порядка.

Несмотря на историческую давность повышенного интереса к исследованиям движения жидкости в пористых средах [1-6] теория фильтрации далека от своего завершения, до сих пор остаются нерешенные проблемы фундаментального характера. Это связано с тем, что особенности многофазных сложных пористых структур приводят к сложной природе явлений тепломассопереноса, для которых характерны нелокальные эффекты памяти, сильных пространственных корреляций и самоорганизации. Помимо традиционных подходов в развитии теории фильтрации применяются математические методы квантовой теории поля [7,8]. Предпринимаются попытки применения теории самоорганизации с приложением методов детерминированного хаоса в развитии теории фильтрации [9]. Новейший этап развития теории фильтрации связан с учетом эффектов памяти и пространственных корреляций в сложных системах, в том числе и в пористых средах. Особый интерес в этом направлении представляет развитие теории нелокальной неизотермической фильтрации на основе применения методов дробного исчисления [10,11]. Принципиальное отличие нелокальной неизотермической фильтрации от ранее известных теорий фильтрации заключается в появлении в теории новых параметров. Этими параметрами являются показатели производных дробного порядка по времени и координате. С ними связано появление нового класса решений, которые позволяют создавать более адекватные математические модели процесса фильтрации.

**1. Традиционный подход.** Исследование процессов фильтрации жидкости в пористых средах включает уравнение движения вязкой жидкости Навье - Стокса, общее уравнение теплопроводности и уравнение непрерывности. Необходимость использования уравнения Навье-Стокса при течении жидкости в трещиновато пористых средах связано с тем, что силы вязкости играют очень важную роль. Течение жидкости в пористых средах представляет собой обтекание множества препятствий со сложной структурой поверхности (в частности, обладающей фрактальной структурой) и практическое использование уравнения Навье-Стокса становится невозможным. Поэтому используются уравнения гидродинамики в форме уравнения Эйлера, однако к действительно существующим массовым силам добавляются фиктивные массовые силы [1]. Наличие пористой среды учитывается с помощью закона Дарси:

$$v = -\frac{\tilde{\kappa}}{\mu} gradP, \qquad (1)$$

где $v$ - скорость фильтрации, $\tilde{\kappa}$ - проницаемость пористой среды, $\mu$ - динамическая вязкость жидкости, P - давление. Используя в уравнении Эйлера закон Дарси, получим для скорости движения жидкости выражение

$$\vec{v} = \frac{\kappa\rho}{\mu}(\vec{X} - \frac{1}{\rho} gradP), \qquad (2)$$

где $\rho$ - плотность жидкости, $\vec{X}$ - действительно существующая массовая сила. С учетом (2) в уравнении непрерывности, получим уравнение для фильтрации жидкости

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\kappa\rho}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\kappa\rho}{\mu}\frac{\partial P}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\kappa\rho}{\mu}\frac{\partial P}{\partial z}\right) = m\frac{\partial\rho}{\partial t} - g\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\kappa\rho^2}{\mu}\right). \qquad (3)$$

Здесь $\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{d\rho}{dp}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{d\rho}{dT}\frac{\partial T}{\partial t}$. Уравнение теплопроводности имеет вид

$$\rho T(\frac{\partial s}{\partial t} + v\nabla s) = div(\lambda\nabla T) + \frac{\eta}{2}(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ik}\frac{\partial v_i}{\partial x_k})^2 + \frac{\varsigma}{2}(divv)^2.$$

Здесь $\rho$ - плотность, Т – температура, $\lambda$ - теплопроводность, $\eta, \varsigma$ - сдвиговая и объемная вязкости. При вычислении производных от энтропии надо считать постоянным давление (температура и плотность меняются). В результате имеем

$$\frac{\partial s}{\partial t} = (\frac{\partial s}{\partial T})_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{T} c_P \frac{\partial T}{\partial t},$$

$$\nabla s = (\frac{\partial s}{\partial T})_P \nabla T.$$

Здесь $c_P$ - теплоемкость при постоянном давлении. В результате уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v\nabla T = div(\chi\nabla T) + \frac{\eta}{2\rho c_P}(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ik}\frac{\partial v_i}{\partial x_k})^2 + \frac{\varsigma}{2\rho c_P}(divv)^2,$$

где $\chi$ - температуропроводность. Аналогично случаю уравнения Навье-Стокса учет членов учитывающих вязкость жидкости осуществим с помощью перехода к эффективной среде. В результате уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\kappa}{\mu} gradp\nabla T = div(\chi\nabla T).$$

Таким образом, система уравнений для описания неизотермической фильтрации в пористых средах принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\kappa\rho}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\kappa\rho}{\mu}\frac{\partial p}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\kappa\rho}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right) = m(\frac{d\rho}{dp}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{d\rho}{dT}\frac{\partial T}{\partial t}) - g\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\kappa\rho^2}{\mu}\right) \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\tilde{\kappa}}{\mu} gradp\nabla T = div(\chi\nabla T) \qquad (5)$$

Считая $\tilde{\kappa}$ и $\mu$ постоянными величинами, получим следующую систему взаимосвязанных уравнений

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\tilde{k}}{m\mu}\frac{dP}{d\rho}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho\frac{\partial P}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\frac{\partial P}{\partial z}\right)\right] - 2g\rho\frac{\tilde{k}}{m\mu}\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{dP}{d\rho}\frac{d\rho}{dT}\frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - div(\chi\nabla T) = \frac{\tilde{\kappa}}{\mu}\nabla T \cdot gradP$$

Система уравнений (4,5) совместно с уравнением состояния $\rho = \rho(P,T)$ лежит в основе неизотермической фильтрации.

На практике часто наблюдается отклонения от линейного закона Дарси (1) и предлагаются различные формы обобщения закона Дарси. Возросший интерес к нелинейным законам фильтрации был связан с экспериментальными

данными, показывающими, что неучет нелинейных эффектов приводит к завышенным оценкам скорости потока флюида, в особенности для высокопроницаемых пластов. Известно много фактов, показывающих, что снижение фактического дебита скважины по сравнению с прогнозом, основанным на линейном законе Дарси, может достигать десятки процентов. В настоящее время существует большое количество публикаций по развитию неизотермической фильтрации с использованием обобщенных законов Дарси.

Область справедливости линейного закона Дарси определяется критическим значением числа Рейнольдса. В зависимости от выражения для числа Рейнольдса разными авторами предлагаются разные значения критического числа Рейнольдса, определяющего границы применимости линейного закона Дарси. По Н.Н. Павловскому значение критического числа Рейнольдса равно $\mathrm{Re}_{\text{крит}} = 7 \div 9$ а выражение для числа Рейнольдса имеет вид $\mathrm{Re} = \dfrac{1}{0.75m + 0/23} \dfrac{wd}{\nu}$, где $m$ –пористость, $w$ - скорость фильтрации, $d$ – эффективный размер зерен грунта, $\nu$ - кинематическая вязкость. В.Н. Щелкачев предлагает $\mathrm{Re}_{\text{крит}} = 4 \div 12$, число Рейнольдса определяется выражением $\mathrm{Re} = \dfrac{10}{m^{2.3}} \dfrac{w\sqrt{k}}{\nu}$. М.Д. Миллионщиков предлагает выражение для числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = \dfrac{wl}{\nu m}$ и $\mathrm{Re}_{\text{крит}} = 2.210^{-2}$.

Нелинейный закон Дарси дается выражением

$$v = -\frac{\kappa}{\mu} gradP + F(v, P.\varepsilon), \qquad (6)$$

где $F(v, P.\varepsilon)$ некоторая нелинейная функция от скорости фильтрации, давления, температуры совокупности дополнительных параметров флюида и пласта. Конкретные выражения для нелинейного закона Дарси приводятся в известных монографиях [1-6]. Более подробное изложение конкретных задач неизотермической фильтрации в монографии [6]. Отметим, что закон Дарси имеет более сложную природу, выходящую и за рамки нелинейной фильтрации. В частности имеет место пороговое поведение связи между скоростью фильтрации и градиентом давления [6].

**2. Нелокальный подход на основе дробного исчисления.** Для процессов переноса в пористых средах важным становится учет нелокальных эффектов по времени и координате. Обобщение закона Дарси, когда нелокальные эффекты учитываются в виде интегральных соотношений, приводят к интегро-дифференциальным уравнениям фильтрации. Решение таких уравнений сталкиваются с принципиальными трудностями. Учет эффектов памяти (временная нелокальность) и пространственных корреляций (пространственная нелокальность), в рамках традиционных подходов приводит к появлению в дифференциальных уравнениях интегрального оператора, где его ядро несет информацию о природе нелокальности. Для решения таких уравнений интегральные операторы представляются в виде ряда дифференциальных операторов с возрастающим показателем порядка дифференцирования и при наличии малого параметра ограничиваются несколькими членами ряда. В отсутствии малого параметра такой подход оказывается непродуктивным и, кроме того, полученные уравнения также не всегда удается решить.

Принципиально иной подход основан на применении математического аппарата интегро-дифференцирования дробного порядка – дробного исчисления. Исходные уравнения для стационарного случая в производных дробного порядка принимают вид [10,11]

$$\frac{d^{\beta}}{d\xi^{\beta}}(\rho v(\xi))=0,\quad v=-\frac{\ddot{k}}{\mu}\frac{d^{\gamma}}{d\xi^{\gamma}}P(\xi). \tag{7}$$

Уравнение (7) приводят к следующему уравнению для давления

$$\frac{d^{\beta}}{d\xi^{\beta}}(\rho\frac{k}{l\mu}\frac{d^{\gamma}}{d\xi^{\gamma}}P(\xi))=0\ . \tag{8}$$

Введем обозначения $\alpha=\beta+\gamma,\ 0<\alpha\le 2,\alpha=1+\eta,0<\eta\le 1$. Решение полученного уравнения (8) существенно зависит от уравнения состояния $\rho=\rho(P,T)$, где $P$ – давление, $T$ – температура. В случае жидкости можно считать $\rho=const.$ При $\eta=1$ решение уравнения (8) совпадает с решением обычного уравнения. В остальных случаях имеем нелинейные решения.

Переходя в уравнениях традиционной теории фильтрации к производным дробного порядка по времени и координате, получим

$$\frac{\partial^{\alpha}P}{\partial\tau^{\alpha}}-\frac{k}{m\mu}\frac{t_0}{l_0^2}\frac{dP}{d\rho}(\nabla^{\gamma}(\rho\nabla^{\gamma}P)-2g\rho\frac{k}{m\mu}\frac{t_0}{l_0}\frac{\partial^{\gamma}P}{\partial\xi^{\gamma}}=-\frac{dP}{d\rho}\frac{d\rho}{dT}t_0\frac{\partial^{\alpha}T}{\partial\tau^{\alpha}}, \tag{9}$$

$$\frac{\partial^{\alpha}T}{\partial\tau^{\alpha}}-\frac{t_0}{l_0^2}\nabla^{\gamma}(\chi\nabla^{\gamma}T)=\frac{\tilde{\kappa}}{\mu l_0^2}\nabla^{\gamma}T\cdot\nabla^{\gamma}P, \tag{10}$$

где производные дробного порядка определены следующими выражениями

$$\frac{\partial^{\alpha}T(\xi,\tau)}{\partial\tau^{\alpha}}=\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{\partial}{\partial\tau}\int_0^{\tau}\frac{T(\xi,z)}{(\tau-z)^{\alpha}}dz-\frac{T(\xi,0)}{\Gamma(1-\alpha)\tau^{\alpha}}\ , \tag{11}$$

$$\frac{\partial^{\beta}T(\xi,\tau)}{\partial\xi^{\beta}}=\frac{1}{2\Gamma(2-\beta)\cos\left(\frac{\pi}{2}(2-\beta)\right)}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{T(\xi',\tau)}{|\xi-\xi'|^{\beta-1}}d\xi'. \tag{12}$$

Здесь $|\xi|<\infty,\tau>0,\ 0<\alpha\le 1,0<\beta\le 2,\tau=t/t_0,\xi=x/x_0$ – безразмерные время и координата, $t_0,x_0$ – характерные время и масштаб. Производная Капуто (11) учитывает память (нелокальность во времени), производная Рисса (12) учитывает пространственные корреляции (пространственная нелокальность), $\Gamma(x)$ - Гамма функция Эйлера. Отметим, теория нелокальной теплопроводности на основе дробного исчисления была развита в работах [12, 13]. Система уравнений (9,10) совместно с уравнением состояния $\rho=\rho(P,T)$ описывает процессы нелокальной неизотермической фильтрации на основе дробного исчисления.

Для качественного анализа влияния учета нелокальности по времени и пространству на решения задачи неизотермической фильтрации рассмотрим одномерный случай. Рассмотри задачу Коши для неограниченной области. Совершая преобразование Лапласа по времени и Фурье по координате, получим следующую систему связанных уравнений

$$(s^{\alpha}+A|k|^{\beta})\tilde{\tilde{P}}(k,s)=s^{\alpha-1}\tilde{P}(k,0)+Qs^{\alpha}\tilde{\tilde{T}}(k,s), \tag{13}$$

$$(s^{\alpha}+D|k|^{\beta})\tilde{\tilde{T}}(k,s)=s^{\alpha-1}\tilde{T}(k,0)-q|k|^{\beta}\tilde{\tilde{T}}(k,s)\tilde{\tilde{P}}(k,s). \tag{14}$$

Здесь $A = \tilde{k} t_0 / \rho_0 m \mu \tilde{\alpha} l_0^2$, $D = \chi t_0 / l_0^2$, $Q = \tilde{\beta} / \tilde{\alpha} \rho_0$, $m$ - пористость, $\tilde{\alpha}$ - изотермическая сжимаемость, $\tilde{\beta}$ - тепловое расширение, $\rho_0$ - равновесное значение плотности, $q = k / \mu l_0^2$. Ограничиваясь первыми членами возмущения, получим

$$\tilde{\tilde{P}}(k,s) = \frac{\tilde{P}(k,o)}{s^{1-\alpha}(s^\alpha + A|k^\beta|)} + Q\frac{s^\alpha \tilde{T}(k,0)}{s^{1-\alpha}(s^\alpha + A|k|^\beta)(s^\alpha + D|k|^\beta)},$$

$$\tilde{\tilde{T}}(k,s) = \frac{\tilde{T}(k,o)}{s^{1-\alpha}(s^\alpha + D|k^\beta|)} + q|k|^\beta \frac{\tilde{T}(k,0)\tilde{P}(k,o)}{s^{2(1-\alpha)}(s^\alpha + A|k|^\beta)(s^\alpha + D|k|^\beta)^2}.$$

Совершая обратные преобразования Лапласа и Фурье, получим следующие решения для распределения давления и температуры

$$P(\xi,\tau) = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' \cos(k(\xi-\xi'))P(\xi',0)E_{\alpha,1}(-Ak^\beta\tau^\alpha) -$$

$$-\frac{Q}{(D-A)\tau^\alpha}\int_0^\infty dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' \frac{\cos(k(\xi-\xi'))}{k^\beta} T(\xi',0)\left[E_{\alpha,1-\alpha}(-Ak^\beta\tau^\alpha) - E_{\alpha,1-\alpha}(-Dk^\beta\tau^\alpha)\right], \quad (15)$$

$$T(\xi,\tau) = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' \cos(k(\xi-\xi'))T(\xi',0)E_{\alpha,1}(-Ak^\beta\tau^\alpha) -$$

$$-\frac{q}{(D-A)\tau^\alpha}\int_0^\infty dk \int_{-\infty}^{\infty} d\xi' \int_{-\infty}^{\infty} d\xi'' \cos(k(\xi-\xi'-\xi''))T(\xi',0)P(\xi'',0)\cdot \quad (16)$$

$$\int_0^\tau d\tau'\left[E_{\alpha,1}(-Ak^\beta\tau'^\alpha) - E_{\alpha,1}(-Dk^\beta\tau'^\alpha)\right]E_{\alpha,1}(-Dk^\beta(\tau-\tau')^\alpha)$$

Первое слагаемое в (13) соответствует распределению давления при изотермической фильтрации с учетом эффектов памяти и пространственных корреляций. Общие свойства решений такого вида были подробно анализированы в работах [12,13] на примере нелокального уравнения теплопроводности в дробном исчислении. Качественное отличие распределения давления при учете нелокальных эффектов заключается в том, что асимптотическое поведение имеет степенной характер в отличие от экспоненциального поведения традиционного распределения давления.

Система уравнений (13,14) позволяет развить «улучшенную» теорию возмущений по аналогии с квантовой теорией поля. В уравнении (14) во втором слагаемом в правой части используем разложение $\tilde{\tilde{T}}(k,s) = \tilde{T}(k,0) + (\frac{\partial \tilde{\tilde{T}}(k,s)}{\partial s})_{s=0}\cdot s + ...$ и ограничимся первым членом разложения. В результате получим

$$(s^\alpha + D|k|^\beta)\tilde{\tilde{T}}(k,s) = s^{\alpha-1}\tilde{T}(k,0) - q|k|^\beta \tilde{T}(k,0)\tilde{\tilde{P}}(k,s).$$

Определяя отсюда $\tilde{\tilde{T}}(k,s)$ и подставляя в уравнение $\tilde{\tilde{P}}(k,s)$ получим, следующее выражение

$$\tilde{\tilde{P}}(k,s) = \frac{\tilde{P}(k,o)}{s^{1-\alpha}(s^\alpha + \tilde{A}|k^\beta|)} + Q\frac{s^\alpha \tilde{T}(k,0)}{s^{1-\alpha}(s^\alpha + \tilde{A}|k|^\beta)(s^\alpha + D|k|^\beta)},$$

где $\tilde{A} = A + qQT_0 = \tilde{k} t_0 / \rho_0 m \mu \tilde{\alpha} l_0 + \tilde{k}\tilde{\beta} T_0 / \tilde{\alpha}\rho_0 \mu l_0^2$ перенормированный коэффициент.

Совершая обратные преобразования Лапласа и Фурье, имеем

$$P(\xi,\tau)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}dk\int_{-\infty}^{\infty}d\xi'\cos(k(\xi-\xi'))P(\xi',0)E_{\alpha,1}(-\tilde{A}k^{\beta}\tau^{\alpha})-$$
$$+\frac{Q}{(D-\tilde{A})\tau^{\alpha}}\int_0^{\infty}dk\int_{-\infty}^{\infty}d\xi'\frac{\cos(k(\xi-\xi'))}{k^{\beta}}T(\xi',0)\left[E_{\alpha,1-\alpha}(-\tilde{A}k^{\beta}\tau^{\alpha})-E_{\alpha,1-\alpha}(-Dk^{\beta}\tau^{\alpha})\right] \quad (17)$$

Принципиальное отличие от решения (15) в замене $A\to\tilde{A}$. Такая замена характерного параметра, определяющего динамику распределения давления в пласте, приводит в отличие от изотермической фильтрации к дополнительной зависимости распределения давления в среде от изотермической сжимаемости, теплового расширения и температуры среды. Кроме того, решение (17) параметрически зависит от показателей производных дробного порядка по времени и координате. В отличие от других параметров системы изменение параметров нелокальности приводит к изменению функционального вида решения. Это позволяет получить дополнительную информацию о динамике процесса фильтрации.

**Литература:**

1. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. ОГИЗ, Гостехиздат. 1947. 244с.
2. *Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестоков В.М.* Основы гидрогеологических расчетов. Москва, «Недра», 1965г., 306с.
3. *Климентов П.П., Богданов Г.Я.* Общая гидрогеология. Москва. «Недра». 1977. 357с.
4. *Бондаренко И.Ф.* Физика движения поземных вод. Ленинград. Гидрометеоиздат. 1075. 216с.
5. *Чарный И.А.* Подземная гидрогазодинамика. Москва, ГНТИ. 1963, 396с.
6. *Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В.* Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений. Москва, « Недра»,1985, 271с.
7. *Швидлер М.И.* Статистическая гидродинамика пористых сред. М.: «Недра.1985. 287с.
8. *Мейланов Р.П., Джабраилов В.В.* Фильтрация в пористой среде с флуктуирующими параметрами// ИФЖ. 1996 г. Т.69, № 2. С.238-242.
9. *Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н.* Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелинейность, неравновесность, неоднородность. Уфа. Изд-во «Гилем». 1995. 462с.
10. *Мейланов Р.П.* К теории фильтрации в пористых средах с фрактальной структурой// Письма в ЖТФ.1996 г. Т.22, вып. 23. С.40-42.
11. *Мейланов Р.П.* Обобщенные уравнения одномерной фильтрации с дифференцированием дробного порядка// ИФЖ. 2001 г. Т.74, № 2. С.34-37.
12. *Алхасов А.Б., Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.* Уравнение теплопроводности в производных дробного порядка // ИФЖ.2011 г. Т.84, № 2. С.309-316.
13. *Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.* Особенности решения уравнения теплопроводности в производных дробного порядка // ЖТФ. 2011. Т.81, вып.7. С.1-6.

# ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА

Алишаев М.Г.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: alishaev@rambler.ru*

С позиций гидравлики и термодинамики рассматривается изменение давления, температуры и плотности по вертикальному вулканическому каналу от очага до жерла. Предполагается, что магма представляет собой смесь несжимаемой жидкости и идеального газа, объём которого равен сумме объёмов жидкости и газа, газ не растворён, а распределён равномерно по объёму магмы, капиллярные эффекты не учитываются. Найдены оценки для изменения температуры и плотности смеси вдоль канала.

**Очаги вулканизма.** Движение литосферных плит, обусловленное конвекцией в мантии Земли, порождает плавление опускающихся кромок тектонических плит и различного рода химические взаимодействия веществ. Они связаны с выделением энергии и фазовыми переходами в газообразное состояние, локальными повышениями давления и образованием вулканических очагов, постоянными поисками путей разгрузки давления. Подвижная расплавленная смесь мантийного вещества и растворенных газов пробивается через щели и поры на земную поверхность, с подъёмом по земной коре вверх происходят потери давления и температуры, из смеси выделяется газ и опережает лаву. В атмосферу или океанское дно выбрасывается не только лава, но и обломки горной породы, оторванные потоком смеси лавы и газа в жерле вулкана. Общепринятого физического механизма объяснения извержения не существует, есть немало попыток и предложений по объяснению периодичности извержения вязкой и газонасыщенной лавы [1-5]. Вулканические извержения и процессы выброса магмы можно уподобить нефтяному фонтану с высоким содержанием попутного, выделяемого в стволе скважины, газа. Лава и газы в магме находятся при высоких давлениях (около 600 МПа) и температурах не менее 1500°С. При таких параметрах породы расплавлены, и газы растворены, магму можно рассматривать как гомогенную жидкость, обладающую достаточно высокой сжимаемостью. Вязкость магмы достигает до нескольких сотен Па·с на внешней мантии. При таких температурах и давлениях плотность газа (водяного пара) превышает в тысячи раз их значения при атмосферных условиях. Жидкая и газовая фаза имеют плотности примерно одного порядка.

Подъём магмы по каналу вулкана сопровождается снижением давления, его статической и динамической составляющей. Снижается также и температура, ибо магма расширяется, стенки канала проницаемы и отводят частично массу и теплоту движущейся магмы в горную породу. Снижение термобарических параметров может вызвать изменение объёма магмы и скорости течения, при определённых условиях и выделение растворенного газа, выпадение кристаллов и изменение структуры течения. В какой-то форме изменение энергии потока магмы (тепловой, кинетической и потенциальной) может быть оценено вдоль канала вулкана вверх и связи параметров (давления, температуры и плотности) могут быть установлены.

**Канал и жерло вулкана. Их формы.** Очаги вулканов располагаются на разных глубинах, от 5 до 100 км и глубже. Наиболее часто указываемые глубины – около 60 км. Путь магмы от очага к кратеру не прямолинейный, и не всегда

вертикальный, возможны и боковые выходы вулканических струй. Для основного выхода в кратер характерно наличие жерла – расширения устья канала, из которого выброшена часть породы при выходе потока магмы в атмосферу.

Явление взрывообразного расширения пароводяной струи при выходе из устья скв. №1 в атмосферу сфотографировано в 1970 г в Тарумовке [6]. Радиус струи здесь возрос в 10 раз, площадь струи - в 100 раз, а давление в струе упало от сотен до 1 атм. Расстояние, на котором произошло расширение, равнялось примерно диаметру струи пароводяной смеси в атмосфере. Жерло вулкана по высоте также будет иметь порядок диаметра струи газов. Визуально можно определить фотографированием выходное сечение жерла вулкана. Что касается сечения канала вулкана по глубине, соединяющего жерло с очагом, то радиус канала должен быть на порядок меньше. При диаметре жерла в 200 м радиус канала может быть принят равным 10 м.

Установим режим течения магмы, оценив критерий Рейнольдса. В работах [1-5] рассматриваются случаи ползущих извержений, и режим течения магмы принимается ламинарный, нестационарный. Если же рассматривать извержения взрывного характера с параметрами $\rho$=1000 кг/м$^3$, $v$=500 м/с, $D$=20 м и $\mu$=100 Па·с, то для числа Рейнольдса будет получено значение $Re=10^5$, что явно относится к области развитого турбулентного режима. Если при ламинарном движении динамический перепад давления пропорционален расходу, то при турбулентном движении он пропорционален квадрату расхода. Поправки по сравнению со случаем медленных движений должны быть весьма существенными [1,2]. Ниже течения считаются установившимися и турбулентными.

**Об изменении давления и плотности вдоль канала, от очага до жерла.** Рассмотрим течение по каналу вверх, считая, что очаг вулканизма находится на глубине $H$ км. На этой глубине гидростатическое давление составит $10H$ МПа, горное давление $25H$ МПа ориентировочно. Давление в магматической камере $p$ должно быть между этими двумя значениями. Плотность, температура и давление смеси газа и расплава снижаются вверх по каналу. На глубине $H$ км температуру $T$ можно принять равной $(30H+273)$ К. Давление в жидкой магме $p$ не известно, плотность движущейся смеси газа и расплава обозначим $\rho$ (порядка 1000 кг/м$^3$ и более в очаге вулкана). На выходе из жерла вулкана известна лишь ориентировочно температура извергающейся лавы. Давление, плотность и температура смеси газа с расплавом неизвестны в устье вулканического канала. Однако после взрывного расширения в жерле вулкана и выхода струи можно полагать, что давление сравнивается с атмосферным давлением, лава полностью отделяется от растворённого газа и её выбросы в атмосфере движутся под влиянием силы тяжести, подобно фонтану. Температура в начале атмосферной части струи газа чуть ниже температуры лавы.

Примем некоторые предположения относительно течения, и правдоподобную гипотезу о структуре течения смеси, сравним характерные времена протекания процессов переноса массы и тепловой энергии. Обычно выделение газа жестко связывают с давлением и температуры, а течение для газовой фазы принимают адиабатическим. Связь давления и плотности с температурой для идеального газа можно было бы установить из термодинамических соотношений для адиабаты [7]

$$\frac{\rho}{\rho_0}=\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}},\quad \frac{T}{T_0}=\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},\quad \gamma=\frac{c_p}{c_v} \qquad (1)$$

Здесь индекс «0» относится к очагу вулкана, без индекса – те же

величины в любой точке канала, вплоть до входа в жерло. Значение γ для адиабатического процесса атмосферного воздуха принимают за 1,4. Однако магма и растворённые в ней газы от идеального газа отличаются значительно, магму можно рассматривать как сжимаемую жидкость со своим уравнением состояния. Потери температур по каналу вулкана связаны в основном с расширением объёма. Некоторую роль играют и теплообменные процессы, и изменение потенциальной и кинетической энергии потока. С подъёмом вверх давление снижается в основном из-за снижения её статической доли. Вместе с давлением будет снижаться плотность магмы, и её температура.

Изменение температуры в случае потока газа, как показывает формула (1), не должно быть велико. При γ=1,3 [8] показатель (γ-1)/γ составит 0,23. Если в очаге вулкана давление на глубине 100 км $p$=1000 МПа, а на устье канала, у входа в жерло вулкана, 20 МПа, т.е. если давление изменилось в 50 раз, то температура снизится только в $50^{0,23}$= 2,46 раза. Если температура в очаге была 3300 К, то на устье для газа с γ =1,3 она станет равной 1342 К. С учетом наличия лавы температура на устье окажется выше.

**Уравнение состояния гомогенной смеси жидкости и идеального газа.** Напишем уравнение состояния гомогенной жидкости, состоящей из сжатой смеси идеальных газов, которая содержит в себе и некоторую долю несжимаемой жидкости. Давление и температура для смеси газов и жидкости едина, плотности их отличны. Плотность смеси обозначим ρ, массовую долю газовой смеси через ψ. Тогда плотность смеси ρ выразится через плотности газовой фазы $\rho_г$ и жидкой фазы $\rho_ж$ формулой

$$\frac{1}{\rho}=\frac{\psi}{\rho_г}+\frac{1-\psi}{\rho_ж},\quad \rho_г=\frac{p}{RT},\quad \rho=\frac{p}{RT}\cdot\left[\psi+(1-\psi)\frac{p}{R\rho_ж T}\right]^{-1}. \qquad (2)$$

Последнее и можно принять за уравнение состояния магмы, движущейся по каналу при извержении вулкана. Значение массовой доли газа ψ можно принять постоянным, это та массовая доля всех выбросов, которая остается в земной атмосфере. Можно оспорить применение формулы (2) к движению магмы, ибо она написана без учета физики растворимости газа в расплаве и её выделения в свободную фазу со снижением давления. Формулу (2) можно рассматривать как некоторое приближение. Для изотермических процессов, например, получаем вместо пропорциональности плотности давлению для идеального газа выражение плотности в виде дробно-линейной функции от давления для смеси.

**Адиабатическое сжатие (расширение) гомогенной смеси.** Для идеального газа, удовлетворяющего уравнению Клапейрона, вывод уравнения адиабаты достаточно прост. Согласно первому закону термодинамики при отсутствии притока тепла извне имеет место соотношение

$$c_v dT+pd\left(\frac{1}{\rho}\right)=0,\quad c_v dT+pd\left(\frac{RT}{p}\right)=0,\quad (c_v+R)dT-RT\frac{dp}{p}=0 \qquad (3)$$

Теперь видно, что переменные разделяются и уравнение записывается в интегрируемом виде

$$\frac{dT}{T}=\frac{R}{c_v+R}\frac{dp}{p},\quad \gamma=\frac{c_p}{c_v},\quad R=c_p-c_v. \qquad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (4), от начальных значений ($p_0$,$T_0$) до конечных значений ($p$,$T$), получим зависимость температуры от давления в виде формулы (1). Такое же соотношение получим теперь для смеси лавы (жидкость) и газа, считая смесь нейтральной и массовое содержание газа равной некоторой

постоянной ψ. Если температура смеси повысилась на $dT$, то это будет означать, что тепло появилось за счет сжатия газа, газ отдал теплоту, равную $dQ=(1-\psi)\cdot c_{ж}dT$. Процесс для газа уже не будет адиабатическим, так как газ обменивается теплом с лавой. Первый закон термодинамики для газовой фазы можно написать в виде

$$-dQ = c_v dT + pd\left(\frac{RT}{p}\right), \quad -(1-\psi)c_{ж}dT = (c_v + R)dT - RT\frac{dp}{p}. \qquad (5)$$

Последнее уравнение отличается от (3) лишь слагаемым в левой части. Видно, что переменные разделяются и уравнение интегрируется. В разделенном виде имеем

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{c_v + R + (1-\psi)c_{ж}}\frac{dp}{p}. \qquad (6)$$

Проинтегрировав уравнение (6), от начальных значений ($p_0$,$T_0$) до конечных значений ($p$,$T$), получим зависимость температуры от давления в виде

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{c_p - c_v}{c_p + (1-\psi)c_{ж}}} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma + (1-\psi)\gamma_{ж}}}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad \gamma_{ж} = \frac{c_{ж}}{c_v} \qquad (7)$$

Формула (7) определяет адиабатическое изменение температуры смеси с изменением давления. Видно, что адиабату смеси нельзя получить поправками на показатель адиабаты. Здесь появляются новые параметры, влияющие на процесс: это массовая доля жидкой фазы и её теплоёмкость. Из уравнения Клапейрона для плотности газа имеем

$$\frac{\rho_г}{\rho_{г0}} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{c_v + (1-\psi)c_{ж}}{c_p + (1-\psi)c_{ж}}} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1 + (1-\psi)\gamma_{ж}}{\gamma + (1-\psi)\gamma_{ж}}} \qquad (8)$$

Формулы (7) и (8) решают задачу адиабатического расширения или сжатия смеси. Они показывают, что и при адиабатических процессах в гомогенной жидкости степенные зависимости для плотности и температуры сохраняются. Однако показатель адиабаты существенно меняется. Включается параметр, равный произведению массовой доли жидкости на отношение удельной теплоёмкости жидкости к удельной теплоёмкости газа при постоянном объёме. Показатели для температуры становятся меньше, показатели плотности – больше. Естественно показатель степенной зависимости для плотности газа обозначить одной буквой, например к. Показатель температурной зависимости составит 1-к. Если ещё ввести безразмерные величины температур и давлений с чёрточками сверху, то будем иметь удобный для запоминания вид

$$\bar{T} = \frac{T}{T_0}, \quad \bar{\rho}_г = \frac{\rho_г}{\rho_{г0}}, \quad \bar{p} = \frac{p}{p_0}, \quad \bar{T} = (\bar{p})^{1-\kappa}, \quad \bar{\rho}_г = (\bar{p})^{\kappa}, \quad \kappa = \frac{1 + (1-\psi)\gamma_{ж}}{\gamma + (1-\psi)\gamma_{ж}} \qquad (9)$$

Обсудим показатели к и (1-к) в полученных формулах (7-9), приняв за жидкость расплавленный кварц, а за газ – пары воды. В таблице 1 даны значения удельных теплоемкостей водяного пара при давлении 10 МПа для некоторых температур по Кельвину [11]. Отметим, что удельные теплоемкости расплавленного кварца и базальта составляют 0,75 и 0,84 кДж/кг·К соответственно, и значительно меньше удельной теплоемкости пара.

Из таблицы 1 видно, что показатель адиабаты водяного пара для 10 МПа убывает с ростом температуры. С ростом температуры на 100° убывание Δγ

составляет порядка менее 0,01 при температурах 1500 К и выше. Свыше 2000 К показатель адиабаты водяного пара заведомо станет менее 1,2.

Таблица 1. Показатели адиабаты для температуры смеси и плотности газовой фазы (для расплавленного кварца и водяного пара) для массовой доли пара ψ=0,5 в зависимости от температуры

| Температура | 1500 | 1200 | 1000 | 800 | 700 |
|---|---|---|---|---|---|
| $c_v$, кДж/кг·К | 2,166 | 1,993 | 1,885 | 1,836 | 1,934 |
| $c_p$, кДж/кг·К | 2,652 | 2,505 | 2,440 | 2,532 | 2,874 |
| γ | 1,224 | 1,257 | 1,294 | 1,378 | 1,486 |
| (γ-1)/γ | 0,183 | 0,204 | 0,227 | 0,274 | 0,327 |
| 1/γ | 0,817 | 0,796 | 0,773 | 0,726 | 0,673 |
| $\gamma_ж$ | 0,346 | 0,376 | 0,398 | 0,408 | 0,388 |
| 1-к | 0,160 | 0,178 | 0,197 | 0,239 | 0,289 |
| к | 0,840 | 0,822 | 0,803 | 0,761 | 0,711 |

Однако с ростом давления показатель адиабаты возрастает. В таблице 2 даны значения удельных теплоемкостей водяного пара при температуре 800ºС для значений давлений от 10 до 100 МПа [12]. Из таблицы видно, что рост давления на 10 МПа дает прирост показателя адиабаты ориентировочно на 0, 025-0,030. Углубление очага на 1 км вызывает повышение давления более чем на 10 МПа, а температуры на 30ºС. Это должно приводить к повышению показателя адиабаты на 0,028 и снижению его на 0,003. Очевидно, что основное влияние оказывает на показатель адиабаты изменение давления, оно на порядок примерно выше, чем влияние температуры. Если от устья канала до очага вулкана 10 км, приращение показателя адиабаты может составить примерно 0,25.

Таблица 2. Показатели адиабаты для расплавленного кварца и водяного пара при температуре 800ºС и массовой доле пара ψ=0,5 в зависимости от давления

| Давление, МПа | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $c_v$, кДж/кг·К | 1,921 | 1,961 | 2,002 | 2,042 | 2,083 | 2,122 | 2,157 | 2,194 | 2,218 | 2,241 |
| $c_p$, кДж/кг·К | 2,456 | 2,578 | 2,707 | 2,843 | 2,981 | 3,119 | 3,253 | 3,377 | 3,486 | 3,576 |
| γ | 1,278 | 1,315 | 1,352 | 1,392 | 1,431 | 1,470 | 1,508 | 1,539 | 1,572 | 1,596 |
| (γ-1)/γ | 0,218 | 0,240 | 0,260 | 0,282 | 0,301 | 0,320 | 0,337 | 0,350 | 0,364 | 0,373 |
| 1/γ | 0,782 | 0,761 | 0,740 | 0,718 | 0,699 | 0,680 | 0,663 | 0,650 | 0,636 | 0,627 |
| $\gamma_ж$ | 0,390 | 0,382 | 0,375 | 0,367 | 0,360 | 0,353 | 0,348 | 0,342 | 0,338 | 0,335 |
| 1-к | 0,189 | 0,209 | 0,229 | 0,249 | 0,268 | 0,285 | 0,302 | 0,315 | 0,328 | 0,338 |
| к | 0,811 | 0,791 | 0,771 | 0,751 | 0,732 | 0,715 | 0,698 | 0,685 | 0,672 | 0,662 |

В работе [12] даны значения удельных теплоемкостей водяного пара, по которым непосредственным делением получена таблица 3 для показателя адиабаты γ для высоких температур по Кельвину и ряда значений давлений в МПа. Она приведена для сведения.

**Плотность смеси при её адиабатическом расширении-сжатии.** Плотность зависит от давления и температуры, а также от содержания массовой доли газа ψ. Плотность смеси ρ выражается формулой (2), в которой отношение $p/T$ естественно заменить как

$$\frac{p}{T}=\frac{p_0}{T_0}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\kappa}, \quad \kappa=\frac{1+(1-\psi)\gamma_{ж}}{\gamma+(1-\psi)\gamma_{ж}}. \qquad (10)$$

Здесь к представляет собой показатель давления для газовой фазы при адиабатическом расширении смеси. Формула плотности смеси принимает вид

$$\rho = \rho_{г0}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\kappa}\left[\psi + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\kappa}\right]^{-1} \qquad (11)$$

Начальное значение плотности смеси в очаге вулкана есть

$$\rho_0 = \rho_{г0}\left[\psi + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\right]^{-1} = \frac{\rho_{г0}\rho_{ж}}{\psi\rho_{ж} + (1-\psi)\rho_{г0}} \qquad (12)$$

Поделив (12) на (13) , получаем выражение для безразмерного значения плотности смеси в адиабатическом процессе расширения смеси

$$\overline{\rho} = \frac{\psi + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}}{\psi + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}(\overline{p})^{\kappa}}(\overline{p})^{\kappa}, \quad \overline{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \overline{p} = \frac{p}{p_0}, \quad \kappa = \frac{1+(1-\psi)\gamma_{ж}}{\gamma + (1-\psi)\gamma_{ж}} \qquad (13)$$

Таблица 3. Показатели адиабаты γ водяного пара для высоких температур по Кельвину и давлений до 90 МПа. Пустые клетки - отсутствует достоверность

| P, МПа | 0,1 | 1 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *T*=800*K* | 1,275 | 1,283 | 1,320 | 1,378 | | | | | | | | |
| *T*=900*K* | 1,264 | 1,269 | 1,293 | 1,306 | 1,408 | | | | | | | |
| 1000*K* | 1,253 | 1,257 | 1,274 | 1,296 | 1,345 | 1,402 | | | | | | |
| 1100*K* | 1,243 | 1,246 | 1,259 | 1,274 | 1,307 | 1,343 | 1,381 | | | | | |
| 1200*K* | 1,235 | 1,237 | 1,246 | 1,257 | 1,281 | 1,306 | 1,331 | 1,360 | | | | |
| 1300*K* | 1,227 | 1,229 | 1,236 | 1,245 | 1,262 | 1,280 | 1,299 | 1,317 | 1,337 | | | |
| 1400*K* | 1,221 | 1,222 | 1,227 | 1,234 | 1,248 | 1,261 | 1,275 | 1,266 | 1,302 | 1,315 | | |
| 1500*K* | 1,215 | 1,216 | 1,220 | 1,225 | 1,236 | 1,247 | 1,258 | 1,268 | 1,278 | 1,288 | | |
| 1600*K* | 1,210 | 1,211 | 1,214 | 1,218 | 1,227 | 1,235 | 1,244 | 1,252 | 1,260 | 1,268 | 1,276 | |
| 1700*K* | 1,205 | 1,205 | 1,208 | 1,212 | 1,219 | 1,226 | 1,233 | 1,239 | 1,246 | 1,253 | 1,259 | 1,265 |
| 1800*K* | 1,200 | 1,200 | 1,202 | 1,207 | 1,213 | 1,219 | 1,224 | 1,230 | 1,235 | 1,240 | 1,246 | 1,250 |

На рис.1 представлены графики плотности смеси в адиабатическом процессе расширения для значений ψ=0,1; 0,4; 0,9 при $\rho_{ж}$=2400 и $\rho_{г0}$=1000 кг/м$^3$; γ=1,3 и $\gamma_{ж}$=0,35.

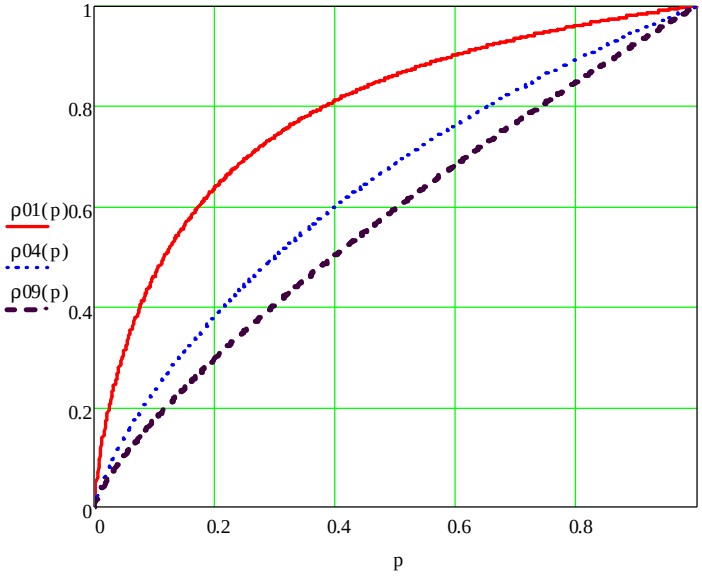



Рис.1. Плотность смеси в безразмерном виде в зависимости от безразмерного давления и массовой доли газа. Верхняя кривая для ψ=0,1, нижняя – для ψ=0,9

**Статическая доля давления при адиабатическом движении по каналу.** Давление в вулканическом канале складывается из статической и динамической составляющих. Если ось *Oz* направить от очага вулкана вертикально вверх, то снижение статической составляющей на малом участке *dz* определится формулой

$$dp = -\rho g dz, \qquad (14)$$

где ρ есть плотность смеси в рассматриваемой точке канала. Статическую долю перепада давления вычислим по (10) и (12). В самом деле, из (10) имеем после замены плотности смеси по (12)

$$\left[\psi\left(\frac{p}{p_0}\right)^{-\kappa} + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\right]dp = -\rho_{г0} g dz \qquad (15)$$

Проинтегрируем это уравнение вдоль всего канала, разделив на $p_0$ и задавшись давлением на устье $p_y$. Тогда для изменения давления вдоль канала, после подбора константы интегрирования, получим

$$\frac{\psi}{1-\kappa}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{1-\kappa} + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\cdot\frac{p}{p_0} = -\frac{\rho_{г0} g z}{p_0} + \frac{\psi}{1-\kappa}\left(\frac{p_{ст}}{p_0}\right)^{1-\kappa} + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\cdot\frac{p_{ст}}{p_0} \qquad (16)$$

Разрешив относительно переменной $z$ , получаем профиль статической части давления по каналу

$$z = \frac{p_0}{\rho_{г0} g}\left\{\frac{\psi}{1-\kappa}\left[\left(\frac{p_{ст}}{p_0}\right)^{1-\kappa} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1-\kappa}\right] + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\left(\frac{p_{ст}}{p_0} - \frac{p}{p_0}\right)\right\} \qquad (17)$$

Нетрудно проверить, что в очаге вулкана, при $p=p_{ст}$ и $z=0$. При $z=H$, т.е. на устье канала, оно равно атмосферному, $p=p_a << p_0$. Мы получаем возможность для адиабатического процесса оценить усредненное значение плотности смеси вдоль канала из соотношений

$$\frac{\rho_{г0} g H}{p_0} = \frac{\psi}{1-\kappa}\left(\frac{p_{ст}}{p_0}\right)^{1-\kappa} + (1-\psi)\frac{\rho_{г0}}{\rho_{ж}}\frac{p_{ст}}{p_0}, \quad \rho_{ср} = \frac{p_{ст}}{gH} \ . \qquad (18)$$

**Изменение температуры из-за расширения объёма при подъеме магмы.** Что касается изменения температуры при подъеме магмы по каналу вулкана, то здесь имеет место не только адиабатическое расширение. Надо применять полное уравнение энергии, с учетом изменения кинетической и потенциальной энергий потока. Оценим для начала эффект только от расширения объёма из-за снижения давления, пренебрегая изменением кинетической и потенциальной энергии, а также тепловыми потерями в горную породу и диссипацией энергии. То есть ограничимся урезанным уравнением энергии. Уподобим движущуюся смесь на малом участке канала турбулентному течению несжимаемой жидкости. Канал вулкана принимаем за круглую трубу с диаметром $d=2R$ м. Выбрасываемая магматическая масса газа, пепла и лавы сохраняется вдоль всего канала и от квадрата его значения зависит градиент динамического давления [10,11].

Подсчитаем снижение давления в канале вулкана согласно формуле Дарси-Вейсбаха, которую записываем в виде суммы статического и динамического градиентов для малого участка

$$-\frac{dp}{dz} = \rho g + \frac{\lambda M^2}{4\pi^2 \rho R^5} \qquad (19)$$

В этой формуле: $p$ и ρ – текущие значения давления и плотности смеси от

очага вулкана до его жерла; $z$ – вертикально вверх направленная координата; $M$ – общая масса лавы, газа и пепла; $R$ – радиус канала вулкана; $\lambda$ – так называемый коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от шероховатости стенок трубы ($\lambda \approx 0{,}05$). Извержение вулканов длятся от нескольких дней и до многих месяцев, поток магмы по каналу можно принять за стационарное течение и пользоваться формулой (19). В ней плотность смеси зависит от давления и перепад давления может быть увязан с высотой подъёма от очага вулкана. Естественно пользоваться безразмерными величинами (они с чёрточками сверху), относя вертикальную координату к глубине очага, а давление, температуру и плотность – к их значениям в очаге вулкана. Тогда безразмерная вертикальная координата $\bar{z}$ по каналу выразится через давление следующей квадратурой

$$-\frac{d\bar{p}}{d\bar{z}} = \alpha\bar{\rho} + \frac{\beta}{\bar{\rho}}, \quad \alpha = \frac{\rho_0 g H}{p_0}, \quad \beta = \frac{\lambda M^2 H}{4\pi^2 \rho_0 p_0 R^5}, \quad \bar{z} = -\int_1^{\bar{p}} \frac{d\bar{p}}{\alpha\bar{\rho} + \beta(\bar{\rho})^{-1}} \quad (20)$$

Все величины в формуле (20) ориентировочно известны, кроме массового расхода. Зависимость плотности от давления определяется формулой (11). Интегрируя (20) по всей длине канала от очага до устья, получим уравнение, связывающее параметры $\alpha$ и $\beta$ с безразмерным значением давления на устье канала

$$\int_{\bar{p}_y}^{1} \frac{d\bar{p}}{\alpha\bar{\rho} + \beta\bar{\rho}^{-1}} = 1. \quad (21)$$

Это уравнение дает возможность оценить выбрасываемую ежесекундно массу $M$ магмы по давлениям в очаге и на устье, а также другим, поддающимся оценке величинам. Ниже приводятся фрагменты программы в пакете Mathcad, с помощью которых проводились вычисления. Исходные данные:

$\psi := 0.75$ $g := 9.8$ $H := 50000$ $\rho l := 2400$ $Ta := 300$ $pa := 10^5$

$T0 := 0.03H + Ta$ $T0 = 1.8\times 10^3$ $\rho ga := 0.6$ $p0 := \rho l \cdot g \cdot H \cdot 0.75$ $p0 = 8.82\times 10^8$

$cv := 2200$ $cl := 750$ $\lambda := 0.05$ $\rho g0 := \rho ga \cdot \frac{p0}{pa} \cdot \frac{Ta}{T0}$ $\rho g0 = 882$

Программная часть:

$$\rho s(p) := \left[\psi + (1-\psi)\cdot\frac{\rho g0}{\rho l}\right]\cdot\left[\psi + (1-\psi)\cdot\frac{\rho g0}{\rho l}\cdot p^{\kappa}\right]^{-1}\cdot p^{\kappa}$$

$T(p) := p^{1-\kappa}$ $R := 5$ $c0 := cv\cdot\psi + cl\cdot(1-\psi)$ $pu := 0.1$

$$F(r) := \int_{pu}^{1} \frac{1}{\alpha\cdot\rho s(p) + \frac{r}{\rho s(p)}}\,dp - 1 \qquad \gamma := 1.3 \qquad \gamma k := 0.36 \qquad \kappa := \frac{[1+(1-\psi)\cdot\gamma k]}{\gamma + (1-\psi)\cdot\gamma k}$$

$\kappa = 0.784$ $beta := root(F(r), r, 0.01, 1)$ $beta = 0.291$ $M1 = 3.642\times 10^6$

$T(0.1) = 0.608$

$$\rho 0 := \frac{\rho g0\cdot\rho l}{\psi\cdot\rho l + (1-\psi)\rho g0} \qquad M1 := \sqrt{\frac{beta\cdot\left(4\cdot\pi^2\cdot\rho 0\cdot p0\cdot R^5\right)}{\lambda\cdot H}} \qquad \rho 0 = 1.048\times 10^3$$

$$\alpha := \frac{\rho 0\, g\cdot H}{p0} \qquad \alpha = 0.582 \qquad \beta := beta \qquad Tu := T(pu)\cdot T0 \quad Tu = 1.095\times 10^3$$

$$z(p) := \int_{p}^{1} \frac{1}{\alpha\cdot\rho s(p) + \frac{\beta}{\rho s(p)}}\,dp$$

Графическое представление результатов:

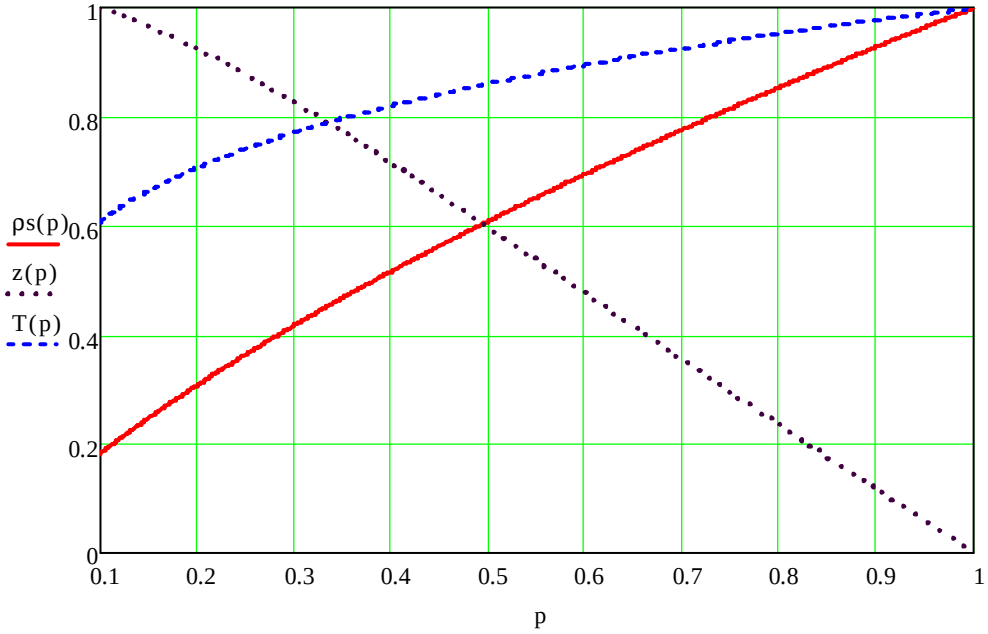



Рис.2. Графики безразмерных значений плотности смеси, температуры и расстояния от очага по вертикали от безразмерного давления, равног0 1 в очаге и 0,1 на устье.

**Температурные потери на приращение механической энергии.** Выше мы подсчитали охлаждение магмы из-за её расширения. Из-за объемного расширения температура магмы в просчитанном примере уменьшилась от 1800 до 1095*K*, т.е. на 705 градусов при длине канала 50 км. Но охлаждение магмы происходит не только из-за её расширения. При её подъёме на *H* км вверх на каждый кг массы магмы расходуется количество энергии *gH*. Поделив её на удельную массовую теплоемкость магмы $c_0$, получим снижение температуры, обусловленное ростом потенциальной энергии

$$\Delta T_n = \frac{gH}{c_0} \qquad (22)$$

Кинетическую энергию единицы массы можно представить в виде

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\cdot 1\cdot\left(\frac{M}{\pi R^2\rho}\right)^2 = \frac{M^2}{2\pi^2 R^4\rho}\ . \qquad (23)$$

Изменение кинетической энергии единицы массы от очага до устья канала в условиях адиабатичности процесса подъёма представится в виде

$$\Delta E_k = \frac{M^2}{2\pi^2 R^4\rho_0}\left[\left(\frac{p_0}{p_y}\right)^{2\kappa} - 1\right] \qquad (24)$$

Поделив её на удельную массовую теплоемкость магмы $c_0$, получим снижение температуры, обусловленное ростом кинетической энергии

$$\Delta T_k = \frac{M^2}{2\pi^2 R^4\rho_0 c_0}\left[\left(\frac{p_0}{p_y}\right)^{2\kappa} - 1\right] \qquad (25)$$

Формулы (22) и (25) решают вопрос об оценке влияния изменения механической энергии на снижение температуры при адиабатическом подъёме магмы. Ниже показан фрагмент их программного вычисления в приведённом выше примере.

$$\Delta Tad := T0\cdot\left(1 - pu^{1-\kappa}\right) = 704.922 \qquad \Delta Tp := \frac{g\cdot H}{c0} \qquad \Delta Tp = 266.667$$

$$\Delta Tk := \frac{M1^2}{2\cdot\pi^2\cdot R^4\cdot\rho0^2\cdot c0}\cdot\left[\left(\frac{1}{pu}\right)^{2\kappa} - 1\right] \qquad \Delta Tk = 19.197$$

Как видно из примера, наибольший вклад в снижение температуры вносит адиабатическое расширение, которое может достигать многих сотен градусов. Следующим по значимости влияния оказываются температурные потери из-за повышения потенциальной энергии, которые могут доходить до нескольких сотен градусов при глубине очага 50 км. Наименее значимы температурные потери, обусловленные ростом кинетической энергии. Они могут быть порядка нескольких десятков градусов. Такой расклад подтверждают многочисленные варианты, сосчитанные автором.

**Литература:**

1. *Бармин А.*А., *Мельник О.Э.* Об особенностях динамики извержения сильновязких газо-насыщенных магм// Известия РАН, МЖГ, 1993, №2. С.49-60.
2. *Мельник О.Э.* Гидродинамика вулканических извержений сильновязких газо-насыщенных магм// Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М.: НИИ Механики МГУ, 2002. 14с.
3. *Мельник О.Э.* Моделирование переходных процессов при вулканических извержениях сильновязких газо-насыщенных магм// Известия РАН, МЖГ, 1996, №4. С.78-85.
4. *Мельник О.*Э., *Бармин А.А., Спаркс С.* Беспокойная жизнь лавовых куполов// Природа, 2006, №3. С.46-55.
5. *Федотов С.*А. О подъёме основных магм в земной коре и механизме трещинных базальтовых извержений// Известия АН СССР, Сер. геол., 1976, №10. С.5-23.
6. *Курбанов М.К.* Развитие гидрогеологической и геотермической науки в Дагестане. Достижения, проблемы, перспективы// Сборник научных трудов «Ресурсы подземных вод Юга России и меры по их рациональному использованию, охране и воспроизводству». Труды Института геологии ДНЦ РАН. Выпуск №55. ИГ ДНЦ РАН. Махачкала, 2009. С.5-16.
7. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е.* Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1968. 472с.
8. *Сорохтин О.Г.* Жизнь Земли. М.: 2007, РХД, 452с.
9. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982, 224с.
10. *Алишаев М.Г., Азизов Г.А.* Термобарический расчет паро-термальной скважины// Теплоэнергетика. 2011, №7. С.50-55.
11. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168с.
12. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях. Справочник/*Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. 232с.

# КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ

Базаев А.Р.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: emilbazaev@mail.ru*

Экспериментальные $p,\rho,T$ - зависимости бинарных смесей вода–алифатический спирт (метанол, этанол, н-пропанол) в сверхкритическом состоянии, полученные на пьезометрической установке методом определения сжимаемости, обобщены широко применяемыми для инженерных расчетов уравнениями состояния. Показано, что полиномиальное уравнение состояния - двойное разложение фактора сжимаемости $Z = p/RT\rho_m$ в ряды по степеням плотности и температуры вида $Z = 1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j$, где $\omega = \rho/\rho_{кр}$, $\tau = T/T_{кр}$ адекватно описывает экспериментальные $p,\rho,T$-зависимости данных смесей, по сравнению с остальными уравнениями.

Все возрастающий интерес к знанию термодинамических свойств смесей технически важных веществ, в частности бинарных систем вода–спирт, при высоких температурах и давлениях обусловлен потребностями многих современных технологий типа сверхкритического водного окисления (СКВО) и сверхкритической флюидной экстракции (СКФЭ) [1,2].

Несмотря на то, что водно-спиртовые растворы являются эффективной средой в СКВО и СКФЭ технологиях, исследования объемных свойств их в основном ограничены температурой 573.15 К, а сверхкритическая область практически не исследована. Ниже приводится краткий анализ известных автору литературных источников [3-8].

В [3] вибрирующим денсиметром измерена плотность разбавленного раствора вода–н-пропанол состава *m=0.1199* моль/кг=*0.002* мол. доли н-пропанола при давлении р=28 МПа и для 4-х значений температуры Т (298.15 К, 373.15 К, 448.15 К, 523.15 К). Погрешность измерений: $\Delta p$ = ±*0.2* МПа; $\Delta T$ = ±*0.02* К.

В [4] вибрирующим денсиметром измерена плотность раствора вода–метанол для девяти значений концентрации метанола *x* (0.09879, 0.20398, 0.29674, 0.40888, 0.49641, 0.60172, 0.70229, 0.79623, 0.89350 мол. доли) в интервале температур 324.13 К – 573.66 К и давлений 7 МПа – 13.5 МПа. Погрешность измерений: $p$ <*0.05* МПа; $T$ <*0.1* К; ρ = 0.05 кг/м$^3$.

В [5] определены энтальпии растворов вода–метанол и вода–этанол для различных значений состава в интервале температур 348.15 К – 573.15 К и давлений 5 МПа – 20 МПа. Мольные объемы растворов определенны для температур Т (348.15 К, 423.15 К, 523.15 К ) и давлений р (5 МПа, 7 МПа, 13.5 МПа). Ошибка измерений меньше 5 %.

В [6] пьезометром постоянного объема измерена плотность растворов вода–метанол и вода–н-пропанол состава *x* (*0.25, 0.5, 0.75* мол. доли спирта), в интервале температур 298.15 К – 523.15 К и давлений до 60 МПа. Погрешность измерения: $\Delta p$ = ±*0.05* МПа; $\Delta T$ = ±*0.003* К; Δρ = ±0.03 кг/м$^3$.

В [7] определенна плотность раствора вода–метанол состава *x* (*0.2034, 0.4002, 0.8005, 1* мол. доли спирта) в интервале температур 320 К – 420 К и давлений до 200 МПа. Погрешность измерения: $\Delta p$ = ±*0.0005* МПа; $\Delta T$ = ±*0.005* К; Δρ = ±0.002 кг/м$^3$.

В [8] вибрирующим денсиметром измерена плотность бесконечно разбавленных растворов метанола, этанола и н-пропанола в интервале температур 298 K – 573 K и давлений до 30 МПа. Погрешность измерения: $\Delta p = \pm 0.01$ МПа; $\Delta T = \pm 0.001$ K; $\Delta\rho = \pm 0.001$ кг/м$^3$.

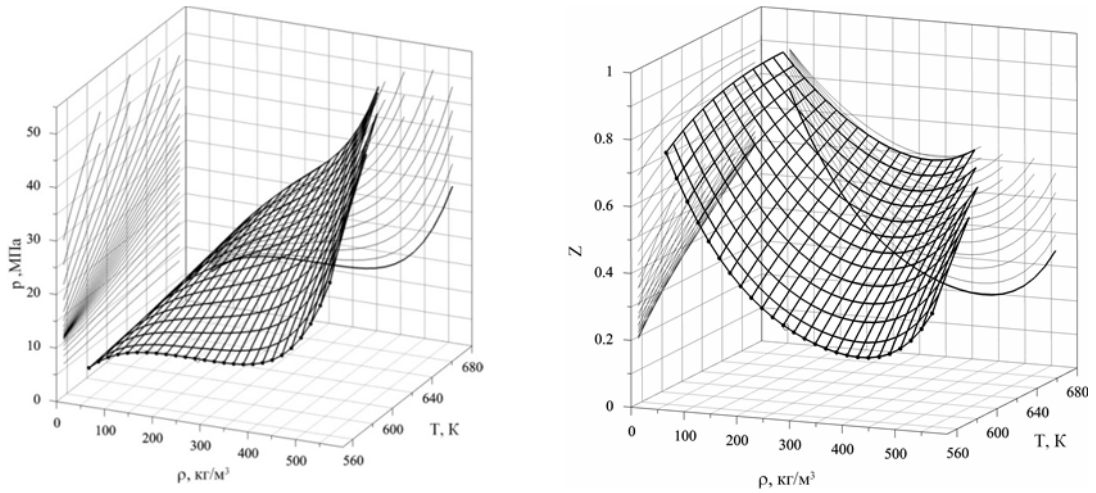
Сведения о литературных данных по критическим и сверхкритическим свойствам растворов вода–спирт можно найти в работах [9-13] и в диссертации [14].

Ограниченность $p,\rho,T$-измерений водных растворов алифатических спиртов при высоких параметрах объясняется их термической нестабильностью в этих условиях. Установлено, что степень термического разложения молекул спиртов в их водных растворах зависит от длительности воздействия температуры [15,16]. Как показала практика, в $p,\rho,T,x$-измерениях пьезометром постоянного объема оптимальной конструкции и при соответствующей методике удается минимизировать влияние процесса термического разложения молекул нестабильного вещества на точность результатов[11,16].

Часть полученных нами результатов $p,\rho,T,x$-измерений для водных растворов спиртов в широком диапазоне параметров состояния, в том числе в критической и сверхкритической областях опубликована [11,12,16-18], но весь массив экспериментальных данных пока содержится в малодоступном источнике - диссертации [14].

Цель работы - обобщение собственных экспериментальных $p,\rho,T,x$-данных бинарных смесей вода–алифатический спирт (метанол, этанол, н-пропанол) в сверхкритическом состоянии уравнениями состояния, позволяющими рассчитать термодинамические свойства этих растворов.

Описание экспериментальной установки и методики проведения $p,\rho,T,x$ – измерений дано в работе [16], подробные сведения в [19].

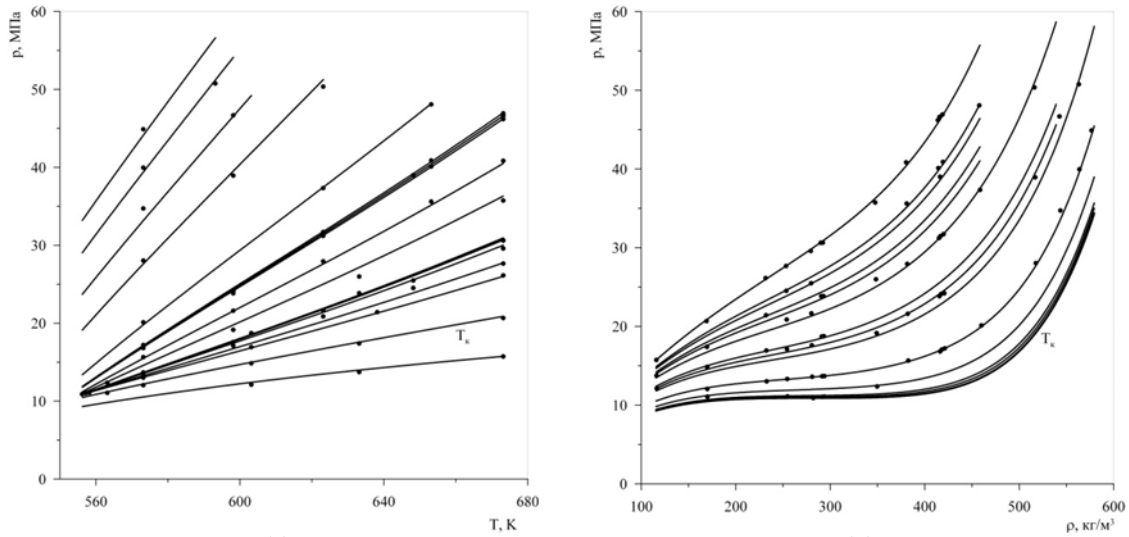



(а) (б)

Рис.1. Диаграммы состояния раствора вода – этанол состава $x=0.5$ в сверхкритической области: а – $(p,\rho,T)_x$ и б – $(Z,\rho,T)_x$

При наличии достоверных экспериментальных $p,\rho,T,x$-данных гомогенных растворов, какими являются водные растворы алифатических спиртов [14], аналитическое описание их свойств с помощью известных уравнений не представляет серьезных трудностей.

Как видно из рис.1 и 2, пространственные диаграммы состояния сверхкритических растворов и их проекции на координатные плоскости имеют гладкую форму взаимозависимостей во всем исследованном диапазоне параметров, что удобно для аналитического описания их свойств.




(а) (б)

Рис.2. Проекции диаграммы состояния $(p,\rho,T)_x$ раствора вода–этанол состава $x=0.5$ в сверхкритической области на координатной плоскости: а – $p,T$; б - $p,\rho$. Линии – расчет; точки – эксперимент

В таблице 1 приведены результаты описания экспериментальных $p,\rho,T,x$ - зависимостей [14] уравнениями состояния, широко используемыми для инженерных расчетов [21-26]. Коэффициенты этих уравнений определенны методом наименьших квадратов, подробно описанным ниже для уравнения (1).

Физически обоснованное вириальное уравнение состояния с шестью коэффициентами описывает экспериментальные данные лучше остальных. Однако, его практическое использование для расчета термодинамических свойств затрудненно из-за невозможности нахождения производной $(\partial p/\partial T)_\rho$, содержащейся в термодинамических соотношениях.

Как следовало ожидать [24,25], зависимость давления одновременно, как от температуры, так и от плотности, адекватно описывает уравнение состояния в виде разложения фактора сжимаемости $Z=p/RT\rho_m$ в ряды по степеням плотности и температуры:

$$Z = p/RT\rho_m = 1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j \text{, откуда} \quad p = RT\rho_m\left[1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right] \qquad (1)$$

В (1): $\rho_m$ – молярная плотность (моль/м$^3$); $\omega=\rho/\rho_{кр}$, $\tau=T/T_{кр}$ – приведенная плотность и приведенная температура соответственно; $\rho_{кр}$, $T_{кр}$ – критическая плотность и критическая температура; R=8.314 Дж/(моль·К) – универсальная (молярная) газовая постоянная.

Процедура определения коэффициентов уравнения (1) (таблица 2) методом наименьших квадратов [24,25] состоит в следующем.

Как известно, квадратичный функционал

$$S(\overline{A}) = \sum_{l=1}^{k}\left[Z_l - 1 - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right]^2, \qquad (2)$$

должен иметь минимальное значение. Из условия минимума функционала следует:

$$\frac{\partial S(\overline{A})}{\partial a_{fh}} = -2\sum_{l=1}^{k}\left[Z_l - 1 - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right]\omega_l^f/\tau_l^h, \qquad (3)$$

где $f=1..m,\ h=1..n_f$.

Таблица 1.

| Уравнения состояния [21,23-25] | Среднее относительное отклонение δ, % |
|---|---|
| Вириальное $Z = 1 + B(T)\rho + C(T)\rho^2 + ... + G(T)\rho^6$ | 0.47 |
| Полиномиальное $p(\omega,\tau) = RT\rho\left(1 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=0}^{S_i} b_{ij}\frac{\omega^i}{\tau^j}\right)$ | 0.87 |
| Бенедикта Вебба Рубина $p(\rho,T) = RT\rho + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right) + (bRT - a)\rho^3 + a\alpha\rho^6 + \frac{c}{T^2}\rho^3(1+\gamma\rho^2)exp(-\gamma\rho^2)$ | 1.87 |
| Пенга-Рубенсона $p(V,T) = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + 2bV - b^2}$ | 4.61 |
| Соава-Редлиха-Квонга $p(V,T) = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + bV}$ | 4.67 |
| Редлиха-Квонга $p(V,T) = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{T}(V^2 + bV)}$ | 4.78 |
| Дитеричи $p(V,T) = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^{5/3}}$ | 6.60 |
| Егера $p(V,T) = \frac{RTV^3}{\left(V - \frac{b}{4}\right)^4} - \frac{a}{V^2}$ | 7.25 |
| Бертло $p(V,T) = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{TV^2}$ | 14.51 |
| Лоренца $p(V,T) = \frac{RT(1+b/V)}{V} - \frac{a}{V^2}$ | 14.77 |
| Больцмана – Маха $p(V,T) = \frac{RT}{V-b+\frac{c}{V^2+d}} - \frac{a}{V^2}$ | 17.55 |
| Воля $p(V,T) = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T(V^2+bV)} - \frac{b}{T^2V^3}$ | 18.58 |
| Больцмана $p(V,T) = \frac{RT}{V-b+\frac{17b^2}{32V}} - \frac{a}{V^2}$ | 21.57 |
| Явери-Юнгрена $p(V,T) = \frac{RT}{V-c-b} - \frac{a}{(V-c)(V-c+b)+b(V-c-b)}$ | 27.82 |

Тогда получим систему $\sum_{i=1}^{m}(1+n_i)$ уравнений с $\sum_{i=1}^{m}(1+n_i)$ неизвестными

$$\sum_{l=1}^{k}\left[Z_l - 1 - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right]\omega_l^f/\tau_l^h = 0, \qquad (4)$$

или после преобразований

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\sum_{l=1}^{k}\omega_l^{i+f}/\tau_l^{j+h} = \sum_{l=1}^{k}(Z_l-1)\omega_l^f/\tau_l^h\,, \qquad (5)$$

где $f=1..m,\ h=1..n_f$, или же в матричном виде

$$A\cdot L=M, \qquad (6)$$

где $A=\{a_{ij}\},\ L=\left\{\sum_{l=1}^{k}\omega_l^{i+f}/\tau_l^{j+h}\right\}$ и $M=\left\{\sum_{l=1}^{k}(Z_l-1)\omega_l^f/\tau_l^h\right\}$.

Приведя уравнение (1) к критическим условиям

$$(\partial p/\partial\rho)_T^{\kappa}=0 \text{ и } (\partial^2 p/\partial\rho^2)_T^{\kappa}=0\,, \qquad (7)$$

имеем

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}(i+1)=-1 \text{ и } \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}(i+1)i=0. \qquad (8)$$

С учетом (8) из (6) получаем систему $\sum_{i=1}^{m}(1+n_i)+2$ уравнений с $\sum_{i=1}^{m}(1+n_i)$ неизвестными. Решив ее, находим коэффициенты уравнения (1) (таблица 3) и .

Из уравнения (1) для критических условий (7) получаем $(\partial p/\partial\rho)_T^{\kappa}=-2.3\cdot10^{-9}\approx0$ *и* $(\partial^2 p/\partial\rho^2)_T^{\kappa}=2.4\cdot10^{-9}\approx0$.

Величина относительного отклонения рассчитанных по уравнению (1) значений давления от экспериментальных составляет в среднем 0.87 % (рис. 3).

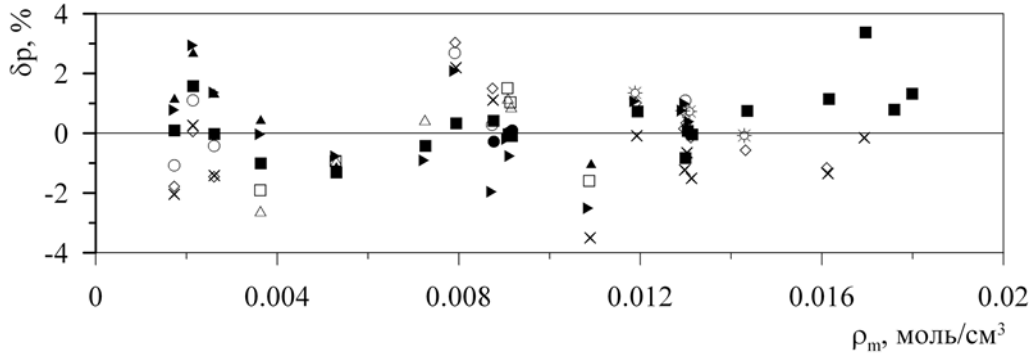



Рис.3. Относительное отклонение рассчитанных величин давления по уравнению (1) от экспериментальных для раствора вода-этанол состава x=0.5 при температурах, К: 557.15(●), 563.15(▲), 573.15(■), 598.15(×), 603.15(Δ), 623.15(◊), 633.15(□), 648.15(○), 653.15(☼),673.15(►).

Таблица 2.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Вода – метанол, *x=0.2* | | | |
| $a_{10}$= | 28.43725762277264 | $a_{11}$= | -30.797133882319507 |
| $a_{20}$= | -76.92765289981017 | $a_{21}$= | 80.4597713315314 |
| $a_{30}$= | 70.00295978493618 | $a_{31}$= | -72.7613222428677 |
| $a_{40}$= | -20.797674537382704 | $a_{41}$= | 21.629044101187997 |
| Вода – метанол, *x=0.5* | | | |
| $a_{10}$= | 12.425949753890844 | $a_{11}$= | -21.88426695248069 |
| $a_{12}$= | 7.7457145218870975 | $a_{20}$= | -16.046493173297808 |
| $a_{21}$= | 25.051581887193876 | $a_{22}$= | -7.415230211991994 |
| $a_{30}$= | 6.377276356201669 | $a_{31}$= | -7.193160062276177 |
| $a_{40}$= | -1.4259725316320448 | $a_{41}$= | 1.6098054723859399 |
| Вода – метанол, *x=0.8* | | | |
| $a_{10}$= | 8.68301041253087 | $a_{11}$= | -10.447442951167638 |
| $a_{20}$= | -20.829452492529562 | $a_{21}$= | 22.48247675877863 |
| $a_{30}$= | 21.05316076551562 | $a_{31}$= | -21.87017511469534 |
| $a_{40}$= | -9.394711546312676 | $a_{41}$= | 9.549392166639375 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a_{50}$= | 1.561119028240323 | $a_{51}$= | -1.5504062140371946 |
| Вода – этанол, *x=0.2* | | | |
| $a_{10}$= | 4.237719611197026 | $a_{11}$= | -9.179925119291012 |
| $a_{12}$= | 3.749332521422394 | $a_{20}$= | 7.1069686737379865 |
| $a_{21}$= | -4.812160113869621 | $a_{22}$= | -2.573570192473953 |
| $a_{30}$= | -24.792743171638303 | $a_{31}$= | 26.80846470927279 |
| $a_{40}$= | 24.701240877870998 | $a_{41}$= | -26.698870033091385 |
| $a_{50}$= | -10.899243770450958 | $a_{51}$= | 11.742827529494559 |
| $a_{60}$= | 1.7889121184107126 | $a_{61}$= | -1.9195138410194885 |
| Вода – этанол, *x=0.5* | | | |
| $a_{10}$= | -25.232796000985996 | $a_{11}$= | 49.69022513046192 |
| $a_{12}$= | -16.234825443056575 | $a_{13}$= | -9.603475441222482 |
| $a_{20}$= | 102.3926918752028 | $a_{21}$= | -227.1128935027806 |
| $a_{22}$= | 125.46273857772522 | $a_{30}$= | -108.08684643398581 |
| $a_{31}$= | 237.27693626356134 | $a_{32}$= | -129.11505037390367 |
| $a_{40}$= | 47.93382992052622 | $a_{41}$= | -104.26871361130974 |
| $a_{42}$= | 56.08764885634984 | $a_{50}$= | -7.59337288657052 |
| $a_{51}$= | 16.433653582350303 | $a_{52}$= | -8.761922528056433 |
| Вода – этанол, *x=0.8* | | | |
| $a_{10}$= | 8.591348842697194 | $a_{11}$= | -15.553627286669611 |
| $a_{12}$= | 8.479076126262527 | $a_{13}$= | -2.4555161230789153 |
| $a_{20}$= | -15.57652820126449 | $a_{21}$= | 15.527739970673187 |
| $a_{22}$= | -1.2589180937157511 | $a_{30}$= | 21.75102724604517 |
| $a_{31}$= | -18.12771718263961 | $a_{40}$= | -16.355502314376995 |
| $a_{41}$= | 13.15739327178962 | $a_{50}$= | 6.021276175170737 |
| $a_{51}$= | -4.757770631848126 | $a_{60}$= | -0.8490362250492852 |
| $a_{61}$= | 0.6657259548332304 | | |
| Вода – н-пропанол, *x=0.2* | | | |
| $a_{10}$= | 13.44749759728329 | $a_{11}$= | -14.761782191789086 |
| $a_{20}$= | -44.50119241473391 | $a_{21}$= | 44.78558310108575 |
| $a_{30}$= | 62.13811259071002 | $a_{31}$= | -61.06770652317352 |
| $a_{40}$= | -42.33022432619132 | $a_{41}$= | 41.09479390291166 |
| $a_{50}$= | 14.086300804082056 | $a_{51}$= | -13.546369283409506 |
| $a_{60}$= | -1.8338896148957067 | $a_{61}$= | 1.7526518756228835 |
| Вода – н-пропанол, *x=0.5* | | | |
| $a_{10}$= | 4.120283156458521 | $a_{11}$= | -3.9843574870311054 |
| $a_{12}$= | -1.4253098449946453 | $a_{20}$= | -8.748644108277908 |
| $a_{21}$= | 9.288901578104017 | $a_{30}$= | 5.934820146070117 |
| $a_{31}$= | -5.660602824554057 | $a_{40}$= | -1.37180294á03244396 |
| $a_{41}$= | 1.023604862457246 | $a_{50}$= | 0.06061150915228253 |
| $a_{51}$= | 0.0397410748876573 | | |
| Вода – н-пропанол, *x=0.8* | | | |
| $a_{10}$= | 7.17176174413602 | $a_{11}$= | -8.589623742802841 |
| $a_{20}$= | -16.84854830764755 | $a_{21}$= | 17.58623455194697 |
| $a_{30}$= | 17.682877234712876 | $a_{31}$= | -17.480500003675388 |
| $a_{40}$= | -8.117045434332757 | $a_{41}$= | 7.733992965387571 |
| $a_{50}$= | 1.4111563495955068 | $a_{51}$= | -1.2897521554657474 |

Из анализа приведенных в таблице 1 уравнений состояния можно сделать вывод о том, что уравнение (1) адекватно описывает экспериментальные данные о *p,ρ,T,x*-зависимостях сверхкритических водных растворов алифатических спиртов и может быть использовано в расчетах термодинамических свойств этих растворов.

**Литература:**

1. *Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н., Гумеров Г.И.* Суб - и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. Казань: Фэн. 2007. 336 с.
2. *Kalinichev A.G.* High Pressure Research. 1991. No.7. P.378.
3. Criss M.C., Wood H.R. Chem.Therm. 1996. Vol. 28. P. 723.
4. Xiao C., Bianchi H. Tremain R.P. Chem.Therm. 1997. Vol. 29. P. 261.
5. Hynek V. et al. Sol.Chem. 1999. Vol. 28. P. 631.
6. Shahverdiev A.N., Safarov J.T. PCCP. 2002. Vol. 4. P. 979.
7. Yokoyama H., Uematsu M. Chem.Therm. 2003. Vol. 35. P. 813.
8. Hyncica P. et al. Chem.Therm. 2004. Vol. 36. P. 1095.
9. *Абдулагатов А.И., Степанов Г.В., Абдулагатов И.М.* Теплофизика. 2008. №8. Часть 1. С.72.
10. *Абдулагатов А.И., Степанов Г.В., Абдулагатов И.М.* Теплофизика. 2008. №12. Часть III. С.66.
11. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А.* ТВТ. 2009. Т.47. №2. С. 215.
12. *Базаев А.Р., Базаев Э.А.* СКФ. 2010. Т.5. №3. С.15.
13. *Bazaev.A.R., Abdulagatov I.M., Bazaev E.A., Abdurashidova A.A.* Chem. Therm. 2007. V.39. P.385.
14. *Абдурашидова А.А. p,ρ,T,x* - измерения и термодинамические свойства водных растворов алифатических спиртов. Дис. … канд. техн. наук. Махачкала: Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН, 2010. 200 с.
15. *Джаппаров Т.А., Базаев А.Р.* Исследование термической стабильности водных растворов алифатических спиртов // Тез. докл. XIII российская конференция по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием). Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2011. С.102.
16. *Абдурашидова А.А., Базаев А.Р., Базаев Э.А., Абдулагатов И.М.* ТВТ. 2007. Т.45. №2. С.208.
17. *Bazaev A.R., Abdulagatov I.M., Magee J.M и др.* International Journal of Thermophysics. Vol.25. №3. P.805.
18. *Базаев А.Р., Базаев Э.**А**.* ТВТ. 2004. Т.42. №6. С.885.
19. *Базаев А.Р.* p,v,T,x - измерения и термодинамические свойства водных растворов углеводородов в сверхкритических условиях. Дис. … докт. техн. наук. Махачкала: Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН, 1997. 264 с.
20. *Шиманский Ю.И., Шиманская Е.Т.* ЖФХ. 1996. Т.70. №3. С.443.
21. *Новиков И.И.* Уравнения состояния газов и жидкостей. М.: Наука. 1975. 263.с.
22. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии / Пер. с англ. под ред. В.С.Бескова. В 2-х ч. Ч.1. М.: Мир. 1989. 304с.
23. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей / Пер. с англ. под. ред. Б.И.Соколова. Л.: Химия. 1982. 592 с.
24. *Сычев В.В., Вассерман А.А. и др.* Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов. 1977. 352 с.
25. *Вукалович М.П., Алтунин В.В., Спиридонов Г.А.* ТВТ. 1967. Т.5. №2. С.265.
26. *Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М.* Основы теории теплофизических свойств веществ. М.:Энергия. 1977. 248 с.

# СЛОВО О ДРУГЕ (Памяти А.М.Амадзиева)

Алхасов А.Б.

Сегодня в дни работы V Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени члена-корреспондента РАН Э.Э.Шпильрайна профессору Абдулле Магомедовичу Амадзиеву, возглавлявшему без малого 20 лет в г.Махачкале филиал Объединенного института высоких температур РАН и так рано ушедшему из жизни, исполнилось бы 77 лет. Трудно представить, что этого замечательного человека, оптимиста, всю свою жизнь посвятившего научно-исследовательской и педагогической деятельности, больше нет с нами…

Амадзиев А.М. родился 15 октября 1935 года в сел. Урахи Сергокалинского района Дагестанской АССР, откуда вышли многие знаменитые государственные деятели, ученые, деятели культуры и просвещения, широко известные далеко за пределами республики. В 1942 году начал учебу в Урахинской средней школе, которую окончил с медалью в 1952 году. В том же году поступил в Дагестанский государственный университет им. В.И.Ленина, где после окончания учебы в 1957 году получил квалификацию преподавателя физики по специальности физика. С 1957 по 1961 годы Амадзиев А.М. работал учителем физики в Сергокалинской средней школе.

В 1961-63 годы Амадзиев А.М. учился в аспирантуре Ленинградского кораблестроительного института (ЛКИ). После окончания аспирантуры работал инженером-конструктором, ассистентом, старшим преподавателем в ЛКИ.

В 1968 году в Ленинградском научно-исследовательском радиотехническом институте Амадзиевым А.М. защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. В том же году он возвращается в Дагестан, где становится одним из инициаторов организации высшего учебного заведения для подготовки квалифицированных специалистов технических специальностей, в которых так остро нуждались различные отрасли народного хозяйства Республики. С 1969г. по 1972 годы Амадзиев А.М. был деканом факультета, а затем директором филиала ЛКИ в г. Каспийске. Под его руководством создавался Дагестанский филиал ЛКИ, где в полной мере проявился талант руководителя и организатора.

В 1971 году А.М.Амадзиева назначают директором-организатором Дагестанского политехнического института (ныне Дагестанского государственного технического университета; ДГТУ), который был создан в 1972 году на базе филиала Ленинградского кораблестроительного института и инженерных факультетов Дагестанского государственного университета.

С открытием Дагестанского политехнического института Амадзиев А.М. работал заведующим кафедрой физики, а также деканом факультета автоматики и управления, успешно сочетая учебно-методическую работу с организаторской и научной деятельностью. Позже он возглавил межрегиональную зональную лабораторию «Физика и химия поверхности», организованную по его инициативе.

Вот что пишет в своих воспоминаниях первый ректор ДГТУ, профессор К.М.Магомедов о достаточно непростом организационном периоде становления Вуза, отмечая роль и опыт профессора Амадзиева А.М. в выработке подходов и стратегии подготовки квалифицированных инженерно-технических кадров широкого профиля – для науки и производства:

«…Трудно себе представить инженера без знаний основных физических закономерностей, тем более, намеривающегося заняться исследованиями в

области усовершенствования техники и технологии. Здесь я нашел единомышленника в лице заведующего кафедрой физики, представителя школы Ленинградского физтеха А.Амадзиева… Под руководством профессора А.Амадзиева в Каспийске велись интересные работы закрытого характера по оборонной тематике».

А вот, что вспоминает об организации и развитии кафедры физики ДГТУ ее нынешний руководитель д.т.н., профессор Вердиев М.Г.:

«Кафедра физики Дагестанского государственного технического университета (первоначально кафедра физики и электроники) создана в 1972 году на базе кафедры физики филиала Ленинградского кораблестроительного института. Первым заведующим кафедрой физики был к.т.н., доцент, Амадзиев Абдула Магомедович… В 1984 г. при кафедре по инициативе А.М.Амадзиева была открыта межрегиональная зональная лаборатория «Физика и химия поверхности», которая была оснащена современными уникальными приборами. Это способствовало повышению уровня выполняемых на кафедре госбюджетных и хоздоговорных НИР. …При кафедре был также открыт филиал кафедры ЮНЕСКО «Техника экологически чистых производств». В последующем филиал ЮНЕСКО был реорганизован в самостоятельную кафедру, которую возглавил Абдулла Магомедович…».

Основными направлениями деятельности этого филиала кафедры ЮНЕСКО Московского государственного университета инженерной экологии (МГУИЭ) стали подготовка кадров и исследование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Наверное, будет правильным отметить, что его талант как ученого и организатора науки, научного приборостроения и внедрения опытно-конструкторских разработок в производство в полной мере раскрылся в Объединенном научно-исследовательском и производственном центре (ОНИПЦ) – филиале Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН), который с приходом Абдуллы Магомедовича к руководству получает новый импульс развития.

ОНИПЦ - первоначально Научный полигон “Солнце” Института высоких температур АН СССР был создан для проведения исследований по разработке и испытанию оборудования и систем для освоения экологически чистых возобновляемых источников энергии для теплоснабжения, горячего водоснабжения и других народнохозяйственных задач.

У истоков создания полигона «Солнце» стояли: директор Института высоких температур АН СССР академик РАН Шейндлин А. Е., академик РАН Кирилин В. А., член корр. РАН Шпильрайн Э. Э. и Председатель Госплана Республики Дагестана Гаджиев А. Г. В их присутствии в 1983 г. был заложен первый камень в строительство объектов полигона, первая очередь которого была введена в эксплуатацию уже в 1987 году.

В 1993 году директор НО «ИВТАН» член–корр. РАН В.М. Батенин назначил Амадзиева А.М. директором-организатором ОНИПЦ, поручив ему подготовить конкретные предложения по реализации совместного Постановления Президиума РАН и Совета Министров РД в части определения программы, структуры и юридического статуса ОНИПЦ.

В 1998 г. ОНИПЦ ОИВТ РАН был преобразован в Филиал ИВТ РАН, а в 2005 г. - в Филиал ОИВТ РАН в г. Махачкале.

В период с 1993 по 2011 гг. по инициативе и при непосредственном руководстве профессора Амадзиева А.М. в филиале ОИВТ РАН проводятся

оригинальные исследования систем солнечного горячего водоснабжения и отопления в жилищном и гражданском строительстве, создаются технологии на основе комбинированных систем энергоснабжения с использованием солнечной и геотермальной энергии, комбинированных биогазовых установок и солнечной энергии, разрабатываются методы технико-экономической оценки и оптимизации энергосистем на основе солнечной, ветровой и геотермальной энергии, необходимые для прогнозирования использования различных видов ВИЭ. И сегодня без преувеличения можно констатировать, что Филиал ОИВТ РАН в г. Махачкале действительно является полигоном для создания, апробации и внедрения уникальных технологий освоения ВИЭ.

Начиная с 2003 г. научная деятельность Абдуллы Магомедовича неразрывно связана с Институтом проблем геотермии ДНЦ РАН, в Институте создается совместная с ОИВТ РАН лаборатория комплексного освоения возобновляемых источников энергии, которой он руководил до последних дней жизни.

В числе наиболее интересных разработок, созданных Амадзиевым А.М., его коллегами и учениками из филиала ОИВТ РАН и ИПГ ДНЦ РАН, необходимо отметить комбинированную технологию для отопления и горячего водоснабжения индивидуального жилого дома на основе использования солнечной, ветровой и геотермальной энергий, а также технологию теплоснабжения многоквартирного дома в г. Махачкале на основе теплонасостной системы с использованием насоса НТ-300 и низкопотенциальной геотермальной воды.

А.М. Амадзиев – автор более 160 научных работ в области физики полупроводников, технологий создания фотоэлементов, антикоррозионных покрытий, материалов для аккумулирования солнечной энергии, а также посвященных проблемам освоения возобновляемых энергоресурсов для решения важнейших народнохозяйственных задач республики и южного региона России. Многие из разработок профессора Амадзиева А.М. внедрены им и его учениками в народное хозяйство страны и республики со значительным экономическим эффектом.

Научно-исследовательская, педагогическая и общественная деятельность профессора Амадзиева А.М. получила широкое признание и высокую оценку общественности в Дагестане и за его пределами. За плодотворную научную деятельность ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Дагестан». Он являлся членом Научного совета по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии РАН и членом Координационного совета по науке при Правительстве РД. Был удостоен многих правительственных и ведомственных наград и знаков отличия, в числе которых «Отличник народного образования СССР», «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», «Почетный работник среднего профессионального образования Российской Федерации», лауреат Государственной премии Республики Дагестан в области естественных наук.

И эти воспоминания и размышления – дань памяти видному ученому – теплофизику, энергетику, талантливому организатору науки и образования в Дагестане, большому энтузиасту возобновляемой энергетики, инициатору и активному участнику целого ряда научных школ молодых ученых в области ВИЭ, организованных в 2002-2010 гг. в Дагестане при поддержке РАН, многих отечественных и зарубежных фондов и организаций, в том числе, ЮНЕСКО, прекрасному другу и семьянину.

# ДОКЛАДЫ ВЕДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

## РАСЧЕТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ [1]

Попель О.С.[1], Тарасенко А.Б.[1,2], Фрид С.Е.[1]

*[1] ФГУБН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Москва, Россия; 125412, ул. Ижорская 13, стр.2; e-mail: O_Popel@oivtran.ru*
*[2] ЗАО «Энергетические проекты»;*
*Москва, Россия; 117465, ул.Ген. Тюленева 29, корп.1.*

В связи с бурным развитием технологий энергетического использования возобновляемых источников энергии [1], прежде всего, повсеместно доступной солнечной энергии, в разных странах мира, в том числе расположенных в достаточно высоких широтах, расширяется применение автономных систем локального наружного освещения, электропитания светофоров, дорожных знаков, парковочных автоматов и т.п. на базе фотоэлектрических преобразователей, работающих совместно с электрохимическими аккумуляторами. Такие установки сегодня можно встретить на улицах, в парках и на автомобильных магистралях многих зарубежных городов. Растет число фирм, продвигающих на рынок, в том числе в России, различные модификации таких установок от простейших фотоэлектрических парковых фонарей мощностью в несколько Вт до дорожных осветительных столбов мощностью до нескольких сотен Вт (рис.1).

В последнее время интерес к использованию автономных фотоэлектрических светильников проявляется и в ряде российских городов, в том числе в Москве [2].

Рис.1. Различные типы фотоэлектрических осветительных устройств

Ключевой проблемой при разработке или выборе на рынке той или иной системы автономного освещения является определение оптимальной конфигурации и состава системы электропитания с учетом климатических условий региона ее предполагаемой эксплуатации и особенностей нагрузки. Система электропитания должна обеспечивать необходимый показатель

[1] Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-01090) и Минобрнауки РФ (госконтракт № 14.740.11.0096).

гарантированности удовлетворения требований по энергоснабжению рассматриваемого потребителя, иметь приемлемые размеры и стоимость, высокую надежность, продолжительный срок службы при минимальных затратах на обслуживание, что должно обеспечивать конкурентоспособность таких систем по сравнению с традиционными техническими решениями: с прокладкой протяженных кабельных линий или, в случае отсутствия электрических сетей, с автономным электропитанием от бензо- и дизель-генераторов.

В настоящем докладе представлены результаты моделирования работы автономных фотоэлектрических осветительных установок в различных климатических условиях и выполненных на их основе энергетических и технико-экономических оценок.

**Постановка задачи.** Рассматривается автономная фотоэлектрическая установка (рис.2), состоящая из батареи фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), электрохимического аккумулятора (АБ) и системы автоматического управления (САУ), обеспечивающей зарядку аккумулятора и электропитание от него осветительного прибора (ОП) в соответствии с заданным графиком. САУ контролирует также уровень заряда АБ и, если необходимо, ограничивает токи заряда и разряда. Панель ФЭП установлена неподвижно под фиксированным углом наклона к горизонту и ориентирована на юг. Предполагается, что затенение панели в течение светового дня какими-либо объектами отсутствует. ФЭП характеризуется КПД $\eta_{ФЭП}$ преобразования падающего на него потока солнечного излучения в электроэнергию. Потери энергии при разряде/заряде аккумулятора учитываются КПД $\eta_{АК}$. С помощью соответствующего коэффициента учитывается также саморазряд аккумулятора.

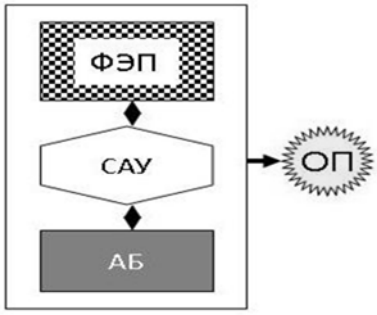



Рис.2. Принципиальная схема установки

Расчет поступления солнечного излучения на плоскость ФЭП ведется с использованием стандартных модулей программы TRNSYS [3]. Исходные данные по суммам прямого и рассеянного солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность, представлены в формате типичного метеогода – годовой последовательности часовых метеоданных [4]. Характерные особенности прихода солнечной радиации в климатических условиях Москвы демонстрирует рис.3, на котором представлено распределение средних дневных сумм суммарного солнечного излучения в различные месяцы года.

Видно, что использование типичного метеогода позволяет учесть сильно выраженную суточную изменчивость поступления солнечного излучения и значительное различие в приходе солнечной энергии в летние и в зимние месяцы.

В качестве электрической нагрузки рассматривается потребляющий постоянную во времени электрическую мощность осветительный прибор, включение которого осуществляется ежедневно в момент заката Солнца. Продолжительность работы светильника после заката изменяется параметрически от 1 до 18 часов. При этом учитывается, что она не может превышать

продолжительность темного времени суток, рассчитываемого для каждого дня с учетом времен восхода и заката Солнца. Предполагается использование высокоэффективных световых приборов на основе светодиодов, допускающих электропитание постоянным током низкого напряжения.

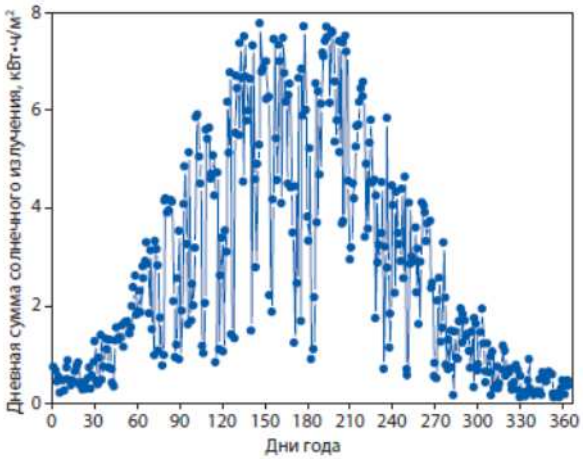



Рис.3. Дневные суммы поступающего солнечного излучения в соответствии с типичным метеогодом для г.Москвы

Перечень основных постоянных и переменных параметров рассматриваемой задачи приведен в таблице 1.

При использовании современных высокоэффективных светильников на светодиодах, имеющих показатель светоотдачи до 120 Лм/Вт, электрическая мощность дорожных и дворовых осветительных устройств, как правило, не превышает 100 Вт, что определило выбор этого параметра в качестве рассматриваемого в статье примера. Следует вместе с тем отметить, что учитывая линейную зависимость площади ФЭП, емкости АБ и стоимости установки от потребляемой мощности, они могут быть легко пересчитаны на другую мощность с использованием масштабного фактора. Приведенные в табл. 1 энергетические показатели $\eta_{ФЭП}$, $\eta_{АК}$ и $к$ соответствуют современным массово используемым кремниевым ФЭП и аккумуляторным батареям.

Таблица 1

| Параметр | Численное значение | Параметр | Численное значение |
|---|---|---|---|
| Потребляемая электрическая мощность | 100 Вт | Число часов электропитания | от 1 до 18 часов после заката |
| КПД ФЭП, $\eta_{ФЭП}$ | 14% | КПД аккумулирования энергии, $\eta_{АК}$ | 0,8 |
| Коэффициент саморазряда аккумуляторной батареи, $к$ | 0,001 $ч^{-1}$ | Угол наклона ФЭП к горизонту | от 35° до 75° |

Моделирование работы установки в течение года проводилось при различных значениях площади ФЭП и емкости АБ и параметрах, приведенных в табл. 1.

Месячные $\delta^{j}_{мес}$ и годовой $\delta_{год}$ коэффициенты покрытия заданной нагрузки рассчитываются по соотношениям:

$$\delta^{j}_{мес} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta t^{i}}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t^{i}_{н}}, \qquad (1)$$

$$\delta_{\text{год}} = \frac{\sum_{j=1}^{12} n_{мес}^{j} \delta_{мес}^{j}}{365}, \qquad (2)$$

где $\Delta t^{i}$ – реальная продолжительность работы ОП в *i*-е сутки *j*-ого месяца после заката Солнца, ч, $\Delta t_{\text{н}}^{\text{i}}$ – требуемая продолжительность работы ОП в *i*-е сутки *j*-ого месяца (соответственно в зависимости от рассматриваемого варианта от 1 до 18 часов после заката Солнца), $n^{j}_{мес}$ – количество дней в соответствующем месяце.

В предположении, что наиболее дорогими компонентами энергоустановки являются ФЭП и АБ, стоимость всей установки *C* можно оценить по соотношению:

$$C = c_{\text{ФЭП}} \cdot F_{\text{ФЭП}} + c_{АК} \cdot E_{АБ}, \text{ долл. США}, \qquad (3)$$

где $F_{\text{ФЭП}}$ – площадь ФЭП, м$^2$, а $E_{АБ}$ – полная емкость АБ, кВтч.

Математически задача об оптимальном составе установки, при котором электропитание осветительного прибора обеспечивается с требуемым показателем гарантированности энергоснабжения в заданных климатических условиях эксплуатации и при заданном графике работы в течение года с минимальными затратами на оборудование, сводится к поиску минимума стоимости $C_{min}$ при заданном значении $\delta_{\text{год}}$ и определению соответствующих минимальному значению стоимости установки площади ФЭП и емкости АБ. В число оптимизируемых параметров также включен угол наклона ФЭП к горизонту, хотя известно [3], что для максимального сбора в течение всего года солнечного излучения этот угол должен быть близок к широте местности, а для лучшего покрытия зимней нагрузки на 10…15° ее превышать.

Удельная стоимость ФЭП и АБ в расчетах варьировалась в диапазонах 200…500 \$/м$^2$ и 250…1500 \$/кВтч. Приведенные ниже результаты оптимизационных расчетов относятся к $c_{ФЭП}$= 500 \$/м$^2$ и $c_{АБ}$=250 \$/кВтч. Принятая удельная стоимость ФЭП, соответствующая примерно 3,5 \$/Вт$_{\text{пик}}$, несколько завышена по сравнению со стоимостью представленных в настоящее время на рынке фотоэлектрических панелей из моно- и поликристаллического кремния с учетом включения в нее затрат на дополнительные компоненты (система управления САУ и др.). Удельная стоимость аккумуляторов принята на уровне наиболее дешевых современных свинцовых аккумуляторных батарей. При этом влияние имеющихся ограничений на допустимую глубину разряда, приводящих к необходимости увеличения емкости батареи или к более частой замене аккумуляторов в связи с сокращением их срока службы, в данном варианте не учитывалось.

Компьютерная реализация оптимизационной задачи была осуществлена путем отработки соответствующего алгоритма оптимизации, обеспечивающего приемлемую точность при разумных затратах машинного времени. При этом, естественно, требовалось проведение многократных расчетов годовых показателей установки.

**Результаты расчетных исследований.** В качестве базового примера рассматривалось устройство уличного освещения со светодиодным светильником мощностью 100 Вт, снабженным автономной системой электропитания на основе фотоэлектрической панели площадью 2 м$^2$ и аккумулятора емкостью 2 кВтч. На рис. 4*а* представлены зависимости среднемесячного коэффициента покрытия нагрузки от продолжительности работы осветительного прибора после заката Солнца для этого случая в условиях г. Москвы. Близкая к единице доля покрытия

нагрузки наблюдается только в летние солнечные месяцы, а в течение всего года – при длительности работы ОП не более 1 часа. По мере роста длительности работы ОП доля покрытия нагрузки в зимние месяцы снижается, причем при работе ОП более 3 часов после заката в наименее солнечные месяцы (ноябрь-январь) осветительное устройство обеспечивается автономным электропитанием менее половины требуемой продолжительности.

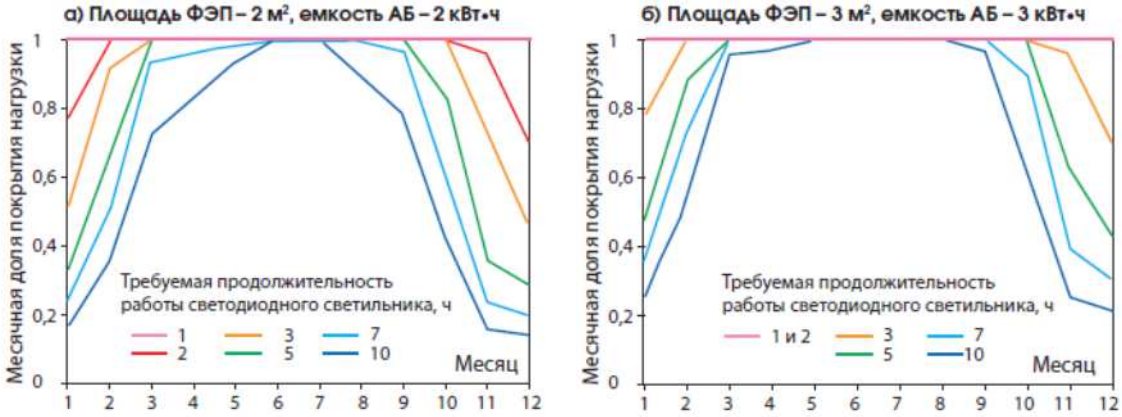



Рис.4. Месячная доля покрытия нагрузки в зависимости от месяца года при различной требуемой суточной продолжительности работы ОП мощностью 100 Вт (г.Москва)

Для повышения гарантированности электропитания (прежде всего в зимние месяцы) необходимо увеличивать либо площадь ФЭП, либо емкость АБ, либо одновременно и то, и другое. Увеличение площади ФЭП до 3 м$^2$ и емкости АБ до 3 кВтч (рис. 4б) приводит к расширению продолжительности гарантированного питания ОП с марта по сентябрь, а при 2 часовой работе ОП в сутки – на весь год. Вместе с тем, с ростом длительности работы ОП в зимние месяцы доля покрытия нагрузки опять же существенно снижается. Влияние увеличения $F_{\text{ФЭП}}$ и $E_{АБ}$ иллюстрирует рис. 5. Для рассмотренных вариантов повышение годовой доли покрытия нагрузки обусловлено в первую очередь увеличением площади ФЭП, в то время как увеличение емкости АБ на гарантированность энергопитания влияет слабо. Заметим, что рассмотренным ранее вариантам установки соответствуют кривые 2 и 5. Вместе с тем, ответить на вопрос о возможности гарантированного энергоснабжения ОП и необходимой для этого конфигурации энергоустановки позволяет лишь решение сформулированной ранее оптимизационной задачи. Результаты ее решения представлены на рис.6.

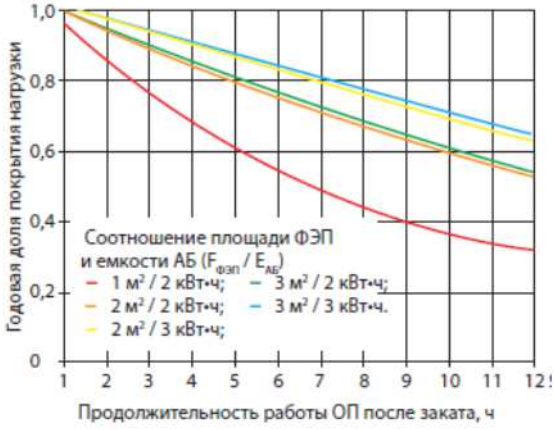



Рис.5. Годовая доля покрытия нагрузки в зависимости от требуемой продолжительности работы ОП при различных соотношениях площади ФЭП и емкости АБ (г.Москва)

Обеспечить работу устройства с гарантированным электропитанием в течение всего года ($\delta_{год} \approx 1$) в климатических условиях Москвы принципиально возможно даже при достаточно большой длительности освещения (10 часов после заката и более). Однако для этого требуются достаточно большие площади ФЭП и емкости АБ (рис. 6а и 6б). Так, при $\Delta t_н$ =5 ч $F_{ФЭП} \approx 7$ м$^2$ и $E_{АБ} \approx 5{,}5$ кВтч, а при $\Delta t_н$ =10 ч, соответственно, – около 14 м$^2$ и 11 кВтч. С ростом требуемой длительности освещения необходимые площадь ФЭП и емкость АБ возрастают, как это видно из рисунка, практически линейно. Ясно, что при этом размеры установки и ее стоимость также растут (рис. 6в). При заданной суточной длительности освещения 5 ч стоимость оптимально сконфигурированной энергоустановки, обеспечивающей гарантированное электропитание устройства мощностью 100 Вт, оценивается примерно в 5000 долларов, а для 10 ч непрерывной работы – около 10000 долларов. С учетом ранее приведенных данных нетрудно подсчитать, что в климатических условиях Москвы аккумулятор должен обеспечивать примерно 10 суток независимого от поступления солнечной энергии питания осветительного прибора.

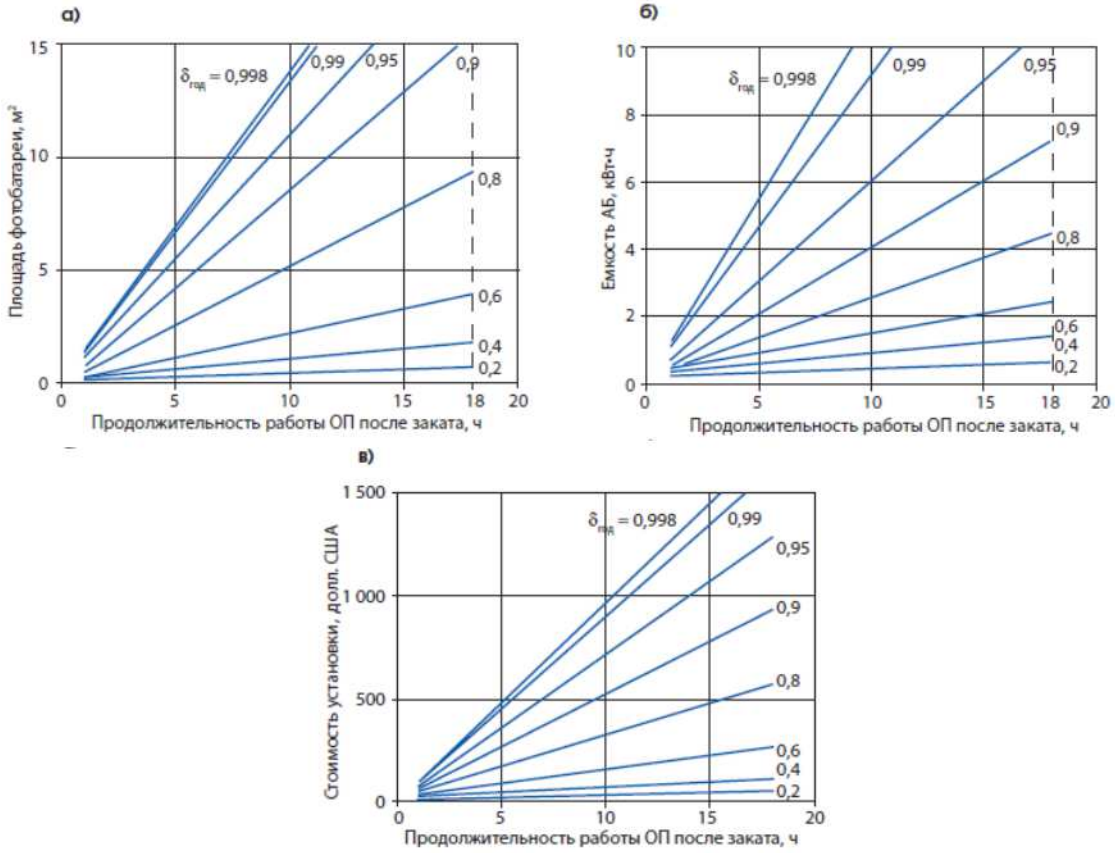



Рис.6. Оптимальные площадь ФЭП (а), емкость АБ (б) для обеспечения электропитания ОП мощностью 100 Вт и минимальная стоимость энергоустановки (в) в зависимости от требуемой суточной продолжительности работы ОП при различных значениях годовой доли покрытия нагрузки ($c_{ФЭП}$=*500* \$/м$^2$, $c_{АБ}$ = *250* \$/кВтч)

Следует отметить, что приведенные экономические оценки являются приближенными. С одной стороны, они базируются на реальных рыночных ценах на ФЭП и современные аккумуляторы, с другой,– не учитывают затраты на контейнеры для размещения оборудования, его монтаж и некоторые другие работы и материалы. При переходе на более эффективные, например, литий-ионные аккумуляторы, допускающие более глубокий разряд, чем свинцовые,

стоимость установки возрастет.

Показательным является рис. 7, на котором представлена полученная зависимость стоимости энергоустановки от годовой доли покрытия нагрузки при различных значениях требуемой продолжительности освещения. Эта зависимость близка к экспоненциальной, и стремление обеспечить бóльшую долю покрытия и, следовательно, достичь более высокого показателя гарантированности энергоснабжения обходится все более дорого. С наибольшими затратами связано достижение показателя гарантированности энергоснабжения, превышающего 0,8. Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости обоснованного подхода к формулированию требований по данному показателю.

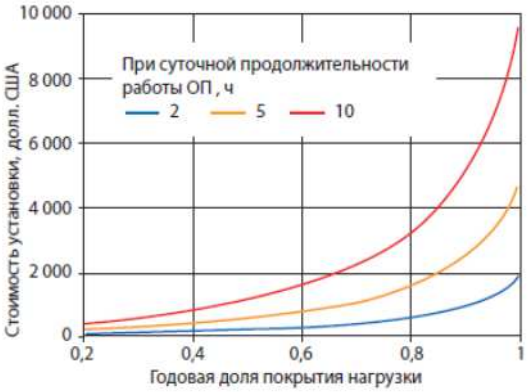



Рис.7. Минимальная стоимость энергоустановки в зависимости от годовой доли покрытия нагрузки при различной суточной продолжительности работы ОП ($c_{ФЭП}$=500\$/м$^2$, $c_{АБ}$=250\$/кВтч)

Аналогичные оптимизационные расчетные исследования, выполненные при тех же допущениях и заданных параметрах для климатических условий юга Европейской части России на примере г. Махачкалы, характеризующейся поступлением солнечной радиации, представленным на рис. 8, показали следующие результаты (рис.9).

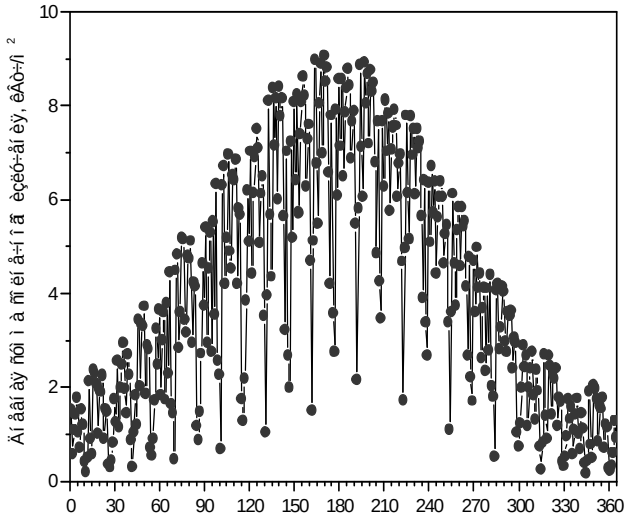
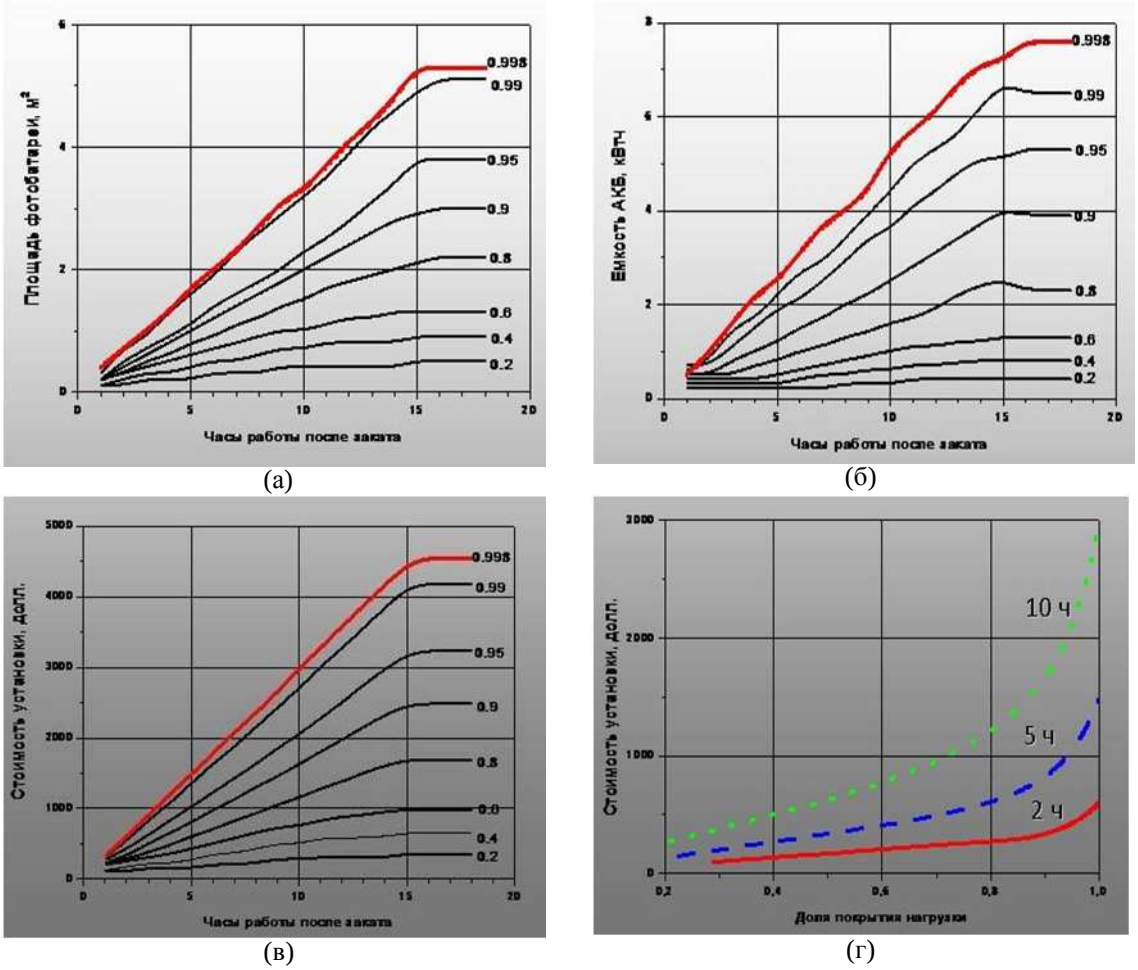



Рис.8. Дневные суммы поступающего солнечного излучения в соответствии с типичным метеогодом для г.Махачкалы

Махачкала отличается более стабильными и высокими по сравнению с Москвой поступлениями солнечной радиации в зимнее время, что существенно упрощает решение технической задачи автономного гарантированного электропитания потребителя. Здесь при пятичасовой ежесуточной продолжительности работы осветительного прибора мощностью 100 Вт

необходима площадь ФЭП всего около 2 м$^2$, а емкость АБ 2,5 кВтч. При этом минимальная стоимость системы электропитания снижается до 1500 $ или более чем в 3 раза по сравнению с московскими условиями. Заметим, что выход кривых на рис. 9 на плато объясняется тем, что максимальная продолжительность зимних ночей в Махачкале не превышает 15 часов (в Москве 17 ч).




(а) (б)

(в) (г)

Рис.9. Оптимальные площадь ФЭП (а), емкость АБ (б) и минимальная стоимость энергоустановки в зависимости от требуемой суточной продолжительности работы ОП при различных значениях годовой доли покрытия нагрузки (в) и от годовой доли покрытия нагрузки при различной требуемой суточной продолжительности работы ОП (г) для климатический условий г.Махачалы ($c_{ФЭП}$=*500* \$/м$^2$, $c_{АБ}$ = *250* \$/кВтч*)*

**Выводы.** Выполненные расчетные исследования возможности и эффективности практического использования фотоэлектрических установок для автономного электропитания систем освещения в климатических условиях г. Москвы и юга России на примере г. Махачкалы позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанные математическая модель и компьютерная программа для имитационного моделирования работы автономных фотоэлектрических установок с электрохимическими аккумуляторами позволяют оптимизировать состав основного оборудования и оценивать энергетические и технико-экономические показатели установок с учетом реальных климатических условий предполагаемой эксплуатации и графика электрической нагрузки.
2. Несмотря на значительное различие в поступлении солнечной энергии в летнее и в зимнее время создание полностью автономной системы гарантированного электропитания системы освещения на базе

фотоэлектрических преобразователей принципиально возможно как для юга России, так и для Москвы. Однако стоимость такой системы относительно высока и существенно зависит от графика работы осветительного прибора (продолжительности работы в течение суток, прежде всего, в зимнее время). В связи с бóльшим поступлением солнечного излучения в зимнее время на юге России стоимость системы автономного электропитания существенно снижается. В климатических условиях Махачкалы минимальная стоимость системы одинакового функционального назначения примерно в 3 раза ниже, чем для московских условий.

3. Зависимость стоимости оптимально сконфигурированной системы (соотношение между площадью ФЭП и емкостью аккумуляторной батареи) от требуемой продолжительности освещения близка к линейной. Показатель гарантированности круглогодичного электропитания близкий к единице может быть обеспечен при емкости аккумуляторной батареи рассчитанной в условиях Москвы примерно на 10, а в условиях Махачкалы на 5 суток независимой от поступления солнечной энергии работы на заданную осветительную нагрузку.
4. Хотя в данной работе рассмотрены автономные фотоэлектрические установки относительно малой мощности, ориентированные на системы уличного освещения, полученные результаты могут быть в определенной мере распространены и на более крупные системы энергоснабжения с использованием масштабного фактора.
5. При относительно высокой стоимости автономные фотоэлектрические системы освещения могут найти практическое применение в городском хозяйстве, прежде всего, в тех случаях, если прокладка кабеля для питания системы освещения от электрической сети затруднена или затраты на это соизмеримы с затратами на автономную установку. Создание фотоэлектрической системы освещения может быть целесообразным и в случае необходимости обеспечения автономной работы осветительных приборов без риска отключения при авариях в централизованной системе электроснабжения.

**Литература:**

1. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Энергетика в современном мире. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 168 с.
2. Московские парки могут начать освещать за счет солнечной энергии // 2012. http://energo-news.ru/archives/31060.
3. *Duffie J.A., Beckman W.A.* Solar Engineering of Thermal Processes (3d ed.) – New Jersey. John Wiley & Sons. 2006. 928 P.
4. *Хлебникова Е.И.* Численные стохастические модели временных метеорологических рядов и их прикладные возможности // Труды ГГО. Вып. 557. СС. 36-54.

# О КРИТЕРИИ ШВАРЦШИЛЬДА ОТСУТСТВИЯ КОНВЕКЦИИ В СЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ И ЕГО ОБОБЩЕНИИ

Рамазанов М.М.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; пр-т И.Шамиля 39а.*

Обсуждается критерий Шварцшильда отсутствия конвекции в сжимаемых жидкостях и газах. Этот критерий является локальным и поэтому в случае, когда число Шварцшильда переменно возникает вопрос о способе его применения в краевых задачах. Требование его выполнения в каждой точке области в общем случае может существенно занизить пороговый градиент температуры. В этой связи получены интегральные критерии, обобщающие критерий Шварцшильда с учетом граничных условий. Критерий Шварцшильда и его обобщения являются условиями абсолютной устойчивости механического равновесия. Получены необходимое, достаточное, а также необходимое и достаточное условия абсолютной конвективной устойчивости в общем случае переменных физических свойств жидкостей и газов.

Критерий наличия или отсутствия естественной конвекции является ее важнейшей характеристикой. Как известно, конвекция имеет место, если число Рэлея превосходит критическое значение, определяемое из решения спектральной задачи для линеаризованной системы уравнений гидродинамики [1]. Большинство исследований по конвекции проводится в приближении Буссинеска. Однако в последние время резко активизировались исследования конвекции в сжимаемых средах, что, прежде всего, связано с изучением гидродинамики жидкостей с параметрами вблизи критической точки фазового перехода жидкость - пар [2],[3]. Для сжимаемых жидкостей и газов имеет место еще один очень важный критерий – критерий Шварцшильда [4],[5]. Согласно этому критерию, если число Шварцшильда $K$ равное отношению адиабатического градиента температуры к заданному больше единицы, то конвекция отсутствует.

Для лучшего понимания критерия Шварцшильда отметим следующее обстоятельство. Для несжимаемой жидкости (приближение Буссинеска) все параметры, входящие в число Рэлея, в некотором смысле равноправны. Имеется в виду, что можно менять любой из этих параметров, например, толщину слоя или вязкость при фиксированных остальных; если при этом число Рэлея превысит критическое значение, возникнет конвекция. Для сжимаемой жидкости среди указанных параметров заданный градиент температуры играет исключительную роль. В самом деле, в этом случае если заданный градиент температуры выше адиабатического $(K<1)$ картина та же. Однако, если $(K>1)$ конвекция не возникнет ни при каких значениях остальных параметров, ни при каких числах Рэлея сколь бы большими они ни были. Таким образом, для сжимаемой жидкости (газа) возможны два различных случая отсутствия конвекции. В первом случае заданный градиент температуры меньше адиабатического, т.е. $(K>1)$, а число Рэлея произвольно. Во втором - $(K>1)$, но число Рэлея меньше критического. Если во втором случае можно меняя, какой либо параметр, например, толщину слоя вызвать конвекцию, то в первом случае это невозможно. Поскольку эти случаи качественно различны, целесообразно их отделить. С этой целью, первый случай, т.е. критерий независящий от числа Рэлея, будем называть абсолютным условием отсутствия конвекции или условием абсолютной устойчивости механического равновесия, а второй – просто условием отсутствия конвекции. В

этом смысле критерий Шварцшильда является абсолютным условием отсутствия конвекции.

В качестве дополнительного аргумента в пользу такого отделения отметим, одно кажущееся противоречие. Критерий Шварцшильда выводится как необходимое условие отсутствия конвекции [6]. Однако решение задачи для горизонтального слоя сжимаемого газа [5] показало, что напротив - критерий Шварцшильда является достаточным условием отсутствия конвекции, но не является необходимым. После указанного отделения противоречие снимается. Результаты в случае горизонтального слоя означают, что критерий Шварцшильда есть необходимое и достаточное условие абсолютной устойчивости механического равновесия; и в то же время является лишь достаточным условием отсутствия конвекции. Ниже показано, что этот вывод не зависит от геометрии области, если она совместима с равновесием.

Выше молчаливо предполагалось, что адиабатический градиент в жидкости можно всюду считать постоянным. Однако во многих случаях это предположение не приемлемо. Критерий Шварцшильда локальный и в общем случае, когда $K$ переменно, возникает вопрос как его применить к ограниченным или полуограниченным областям, где надо учитывать граничные условия. Возникает необходимость обобщения критерия Шварцшильда на случай, когда свойства жидкости (газа) существенно меняются в пространстве. Этим вопросам и посвящена настоящая работа. Сформулированы необходимое, достаточное, а так же необходимое и достаточное условия абсолютной устойчивости, т.е. невозможности возникновения конвекции ни при каких числах Рэлея.

**1. Локальное условие отсутствия конвекции.** Для более ясного изложения сути работы повторим предварительно вывод хорошо известного локального критерия отсутствия конвекции, следуя [6].

Пусть жидкость или газ находятся в механическом равновесии, но не в тепловом. Рассмотрим элемент жидкости, находящийся на высоте $z$ и обладающий удельным объемом $V(p,s)$, где $p, s$-равновесные давление и энтропия на этой высоте. Предположим, что этот элемент жидкости подвергается адиабатическому смещению на малый отрезок $\xi$ вверх; его удельный объем станет при этом равным $V(p',s)$, где $p'$- давление на высоте $z+\xi$. Для устойчивости равновесия необходимо (хотя, вообще говоря, и недостаточно), чтобы возникающая при этом сила стремилась вернуть элемент в исходное положение. Удельный объем элемента жидкости на высоте $z+\xi$ равен $V(p',s')$, где $s'$ - энтропия на этой высоте. Условие устойчивости имеет вид

$$V(p',s')-V(p',s)>0 \qquad (1.1)$$

или

$$\left(\frac{\partial V}{\partial s}\right)_p \frac{ds}{dz} = \frac{T}{C_p}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \frac{ds}{dz} > 0$$

Учитывая, что обычно $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p > 0$, имеем следующее условие устойчивости

$$\frac{ds}{dz} > 0$$

Отсюда, раскрывая энтропию, и учитывая, что

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

найдем условие, которому должен удовлетворять градиент температуры

$$-\frac{dT}{dz} < \frac{g\beta T}{C_p} \tag{1.2}$$

Здесь $\beta$-коэффициент теплового расширения, $C_p$- удельная изобарическая теплоемкость.

Правая часть (1.2) есть локальный адиабатический градиент температуры. Подчеркнем, что при выводе (1.2) по существу рассмотрены лишь изохорные возмущения механического равновесия, а сам критерий гарантирует возникновение возвращающей силы лишь в начальный момент времени. Поэтому критерий назван необходимым условием отсутствия конвекции.

Обобщим критерий (1.2) на случай ограниченной или полуограниченной области с учетом граничных условий, и в том же приближении получим необходимое условие абсолютной устойчивости механического равновесия. Задачу рассмотрим в ограниченном объеме $V$. В случае бесконечного горизонтального слоя, будем считать возмущения механического равновесия периодическими по горизонтали, и рассматривать область, охватывающую один период.

**2. Необходимое условие абсолютной устойчивости.** Рассмотрим систему уравнений Навье - Стокса для сжимаемой жидкости

$$\rho\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\nabla p + \nabla(\eta\nabla)\mathbf{v} + \nabla\left[(\xi + \frac{\eta}{3})\nabla\mathbf{v}\right] + \rho\mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}) = 0$$

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} - \beta_T T\frac{\partial p}{\partial t} + \rho C_p\mathbf{v}\nabla T - \beta_T T\mathbf{v}\nabla p = \nabla(\lambda\nabla T) + D \tag{2.1}$$

$$p = p(\rho, T)$$

$$D = \frac{\eta}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\nabla\mathbf{v}\right)^2 + \xi(\nabla\mathbf{v})^2$$

При механическом равновесии получим следующую систему уравнений

$$\frac{dp_0}{dz} = -\rho_0 g$$

$$\frac{dT_0}{dz} = \frac{conct}{\lambda(T_0, p_0)} \equiv -A(z) \tag{2.2}$$

$$p_0 = p(\rho_0, T_0)$$

Здесь $A(z)$- локальный градиент температуры, полученный с учетом граничных условий.

Положим

$$p = p_0 + p', \quad T = T_0 + T', \ \rho = \rho_0 + \rho', \ \mathbf{v} = \mathbf{v}' \tag{2.3}$$

Где величины со штрихом малые поправки к равновесным значениям.

Подставляя (2.3) в (2.1) после линеаризации, опуская штрихи и используя первое уравнение в (2.2), получим

$$\rho_0\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla(\eta\nabla)\mathbf{v} + \nabla\left[(\xi + \frac{\eta}{3})\nabla\mathbf{v}\right] + (\rho_0\chi p - \rho_0\beta_T T)\mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho_0\mathbf{v}) = 0$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \beta_T T_0 \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \rho_0 C_p v_z A\left(1 - \frac{g\beta_T T_0}{AC_p}\right) \qquad (2.4)$$

$$\chi = \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T, \quad \beta_T = -\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_\rho T$$

Далее, как и при выводе (1.2) положим $p \equiv 0$. Умножим третье уравнение в (2.4) на $T$ и проинтегрируем полученное уравнение по всему объему, используя интегрирование по частям и граничные условия на температуру. Получим

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho C_p T^2 dV = -\int_V \lambda(\nabla T)^2 dV + \int_V \rho_0 C_p A\left(1 - \frac{g\beta_T T_0}{AC_p}\right) v_z T dV \qquad (2.5)$$

Пусть, в начальный момент времени имеет место, произвольное возмущение температуры $\theta_0(x, y, z)$, удовлетворяющее граничным условиям. Тогда для достаточно малого промежутка времени справедливо уравнение

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho C_p T^2 dV = -\int_V \lambda(\nabla \theta_0)^2 dV + \int_V \rho_0 C_p A\left(1 - \frac{g\beta_T T_0}{AC_p}\right) v_z \theta_0 dV \qquad (2.6)$$

Проецируем первое уравнение в (2.4) на ось $z$, и проинтегрируем его в течении достаточно малого промежутка времени $\tau$. При этом учтем, что начальное распределение скоростей тождественно равно нулю и равенства

$p \equiv 0$, $\rho = -\rho_0 \beta_T T$

Тогда с точностью до квадратичных членов по $\tau$ получим

$$v_z = g\beta_T \theta_0 \tau \qquad (2.7)$$

Подставляя (2.7) в (2.6) имеем

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho C_p T^2 dV = -\int_V \lambda(\nabla \theta_0)^2 dV + \tau \int_V \rho_0 C_p g\beta_T A\left(1 - \frac{g\beta_T T_0}{AC_p}\right)\theta_0^2 dV \qquad (2.8)$$

Потребуем, чтобы при любых рассматриваемых возмущениях системы в ней возникала возвращающая сила. Это значит, что левая часть равенства (2.8), а вместе с ней и правая часть должны быть отрицательными величинами, т.е.

$$\max \frac{\int_V \rho_0 C_p g\beta_T A(1-K)\theta_0^2 dV}{\int_V (\nabla \theta_0)^2 dV} < 0 \qquad (2.9)$$

$K = \dfrac{g\beta_T T_0}{AC_p}$ - локальное число Шварцшильда

Максимум функционала (2.9) находится относительно произвольных допустимых, т.е. удовлетворяющих граничным условиям функций $\theta_0(x, y, z)$. Это и есть необходимое условие абсолютной устойчивости для ограниченной или полуограниченной области, в общем случае переменных теплофизических свойств жидкости. Абсолютность неравенства (2.9) заключается в том, что оно не зависит от коэффициентов теплопроводности и вязкости, т.е. от числа Рэлея.

**3. Достаточное условие абсолютной устойчивости.** В качестве достаточного условия абсолютной устойчивости естественно предположить условие справедливости неравенства Шварцшильда (1.2) в каждой точке области, т.е.

$$\min_V K > 1 \qquad (3.1)$$

Однако это предположение требует доказательства, поскольку локальное условие (1.2) выводилось как необходимое условие; при этом допускались к рассмотрению лишь изохорные возмущения.

Откажемся от любых ограничений на возмущения кроме их малости и построим доказательство на следующих соображениях. Рассматриваем стационарные граничные условия поэтому, если возмущения неустойчивы, то установится стационарное решение. Значит, для абсолютной устойчивости механического равновесия достаточно, что бы у системы (2.4) стационарное решение не существовало ни при каких числах Рэлея. Система (2.4) в стационарном случае примет вид

$$-\nabla p+\nabla(\eta\nabla)\mathbf{v}+\nabla\left[(\xi+\frac{\eta}{3})\nabla\mathbf{v}\right]+(\rho_0\chi p-\rho_0\beta_T T)\mathbf{g}=0$$

$$div(\rho_0\mathbf{v})=0$$

$$\nabla(\lambda\nabla T)+C_p A\rho_0 v_z(1-K)=0 \qquad (3.2)$$

$$\chi=\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T,\quad \beta_T=-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_\rho T$$

Ведем функцию

$$\Pi=pe^{-g\int_0^z\rho_0\chi dz} \qquad (3.3)$$

Подставляя в первое уравнение (3.2) получим

$$-\nabla\Pi+\left(\nabla(\eta\nabla)\mathbf{v}+\nabla\left[(\xi+\frac{\eta}{3})\nabla\mathbf{v}\right]-\rho_0\beta_T T\mathbf{g}\right)e^{g\int_0^z\rho_0\chi dz}=0 \qquad (3.4)$$

Введем массовую скорость $\mathbf{w}=\rho_0\mathbf{v}$. Умножим (3.4) на $\mathbf{w}$, уравнение энергии в системе (3.2) на $T$ и проинтегрируем полученные уравнения по всему объему. Используя интегрирование по частям, граничные условия и уравнение неразрывности, получим

$$-F_1[\mathbf{w}]+\int_V\beta_T\rho_0 g f_0 w_z T dV=0$$

$$-F_2[T]+\int_V(1-K)C_p A w_z T dV=0 \qquad (3.5)$$

$$F_1[\mathbf{w}]=\int_V\eta\nabla[f_0 w_i]\nabla[v_0 w_i]dV+\int_V w_z^2\left(\xi+\frac{\eta}{3}\right)(f_0)'(v_0)'dV$$

$$F_2[T]=\int_V\lambda(\nabla T)^2 dV,\qquad f_0=e^{g\int_0^z\rho_0\chi dz},\quad v_0=\frac{1}{\rho_0}$$

Умножая первое уравнение на параметр $\gamma>0$ имеющий размерность $T/\rho$, и складывая со вторым уравнением, получим

$$-(\gamma F_1[\mathbf{w}]+F_2[T])+\int_V\left(1-K+\gamma\frac{\beta_T g f_0}{C_p A}\right)C_p A w_z T dV=0 \qquad (3.6)$$

Как видно из (3.5) функционал $F_2[T]$ положительно определенный. По крайней мере, для слабо сжимаемой жидкости и функционал $F_1[\mathbf{w}]$ положительно определен. Потребуем, чтобы выполнялось неравенство

$$\min \frac{\gamma F_1[\mathbf{w}] + F_2[T]}{\gamma \nu_0 (\nabla w_z)^2 + \lambda_0 (\nabla T)^2} > 0 \qquad (3.7)$$

Здесь $\nu_0, \lambda_0$ - характерные постоянные величины кинематической вязкости и теплопроводности.

Для произвольных допустимых возмущений скорости и температуры, т.е. удовлетворяющих граничным условиям и уравнению неразрывности. По крайне мере для достаточно малых значений $\gamma$ (3.7) выполняется.

С учетом (3.7) достаточное условие отсутствия нетривиального решения (3.6) можно записать в виде

$$\max \frac{\int\limits_V \left(1 - K + \gamma \frac{\beta_T g f_0}{C_p A}\right) C_p A w_z T dV}{\gamma \nu_0 (\nabla w_z)^2 + \lambda_0 (\nabla T)^2} \le 0, \quad \gamma > 0 \qquad (3.8)$$

Решая задачу (3.8) относительно допустимых возмущений, которая сводится к спектральной задаче, можно подобрать $\gamma$ так, что бы улучшить критерий, однако для доказательства (3.1) достаточно ограничиться и оценками.

Используя неравенство Коши - Буняковского можно убедиться, что

$$\frac{\int\limits_V \left(1 - K + \gamma \frac{\beta_T g f_0}{C_p A}\right) C_p A w_z T dV}{\gamma \nu_0 (\nabla w_z)^2 + \lambda_0 (\nabla T)^2} \le \left(1 - \min K + \gamma \max \frac{\beta_T g f_0}{C_p A}\right) B$$

$$B = \max\left(C_p A\right) \left( \frac{0.5 L \|w_z\| \|T\|}{\gamma \nu_0 \|w\|^2 + \lambda_0 \|T\|^2} \right)$$

Здесь $\|f\| = \left( \int\limits_V f^2 dV \right)^{\frac{1}{2}}$ - норма функции $f$, $L$ - толщина слоя жидкости.

Тогда условие (3.8) будет выполнено, если

$$1 - \min K + \gamma \max \frac{\beta_T g f_0}{C_p A} \le 0, \quad \gamma > 0 \qquad (3.9)$$

Вбирая

$$\gamma = \frac{\min K - 1}{\max \frac{\beta_T g f_0}{C_p A}} \qquad (3.10)$$

Из (3.9) и (3.10) получим искомое достаточное условие.

$$\min_V K > 1 \qquad (3.11)$$

Таким образом, условие (3.1) действительно есть достаточное условие абсолютной конвективной устойчивости. Однако оно дает нижнюю оценку порогового градиента. Более точную оценку, как отмечалось выше, может дать критерий (3.8).

Если число Шварцшильда $K$ постоянно, то условие (3.11) есть необходимое и достаточное условие абсолютной устойчивости, а пороговый градиент температуры определяется равенством $K = 1$ независимо от области $V$.

Сформулируем условие позволяющее найти точное значение указанного порогового градиента в общем случае.

**4. Необходимое и достаточное условие абсолютной устойчивости.** Естественно предположить, что при приближении к пороговому градиенту (перепаду) температуры, ниже которого возникновение конвекции невозможно, со стороны больших его значений, критическое число Рэлея должно стремиться к бесконечности. Из (3.6) устремляя $\gamma$ к нулю, для точного значения порогового градиента получим уравнение

$$\int_V (1-K) C_p A w_z T dV = 0 \qquad (4.1)$$

Однако теперь в (4.1) поля скоростей и температуры есть не произвольные допустимые функции, а нетривиальные решения стационарных уравнений (3.2)-(3.4), отвечающие критическому числу Рэлея.

Покажем, что (4.1) эквивалентно условию

$$\frac{1}{Ra_c} = 0 \qquad (4.2)$$

Рассмотрим систему уравнений (3.5)

$$-F_1[\mathbf{w}] + \int_V \beta_T \rho_0 g f_0 w_z T dV = 0 \qquad (4.3)$$

$$-F_2[T] + \int_V (1-K) C_p A w_z T dV = 0$$

Запишем систему уравнений (4.3) в безразмерном виде, вводя следующие масштабы величин: $L$ - длины, $T^0$ - температуры, $\rho^0$ - плотности, $\lambda^0$ - теплопроводности, $\eta^0$ - вязкости, $\beta^0$ - коэффициента теплового расширения, $C^0$ - удельной теплоемкости, $\lambda^0 / \rho^0 C^0 L$ - скорости.

Сохраняя для безразмерных величин те же обозначения, что и для соответствующих размерных, имеем

$$-\frac{1}{Ra_c} F_1[\mathbf{w}] + \int_V \beta_T \rho_0 f_0 w_z T dV = 0 \qquad (4.4)$$

$$-F_2[T] + \int_V (1-K) C_p A w_z T dV = 0$$

$$Ra = \frac{(\rho^0)^2 g \beta^0 C^0 T^0 L^3}{\lambda^0 \eta^0}$$

Здесь $Ra$ , $Ra_c$ - число Рэлея и его критическое значение.

Ведем следующую нормировку полей

$$\|\mathbf{w}\| = 1, \quad T = a\theta, \ \|\theta\| = 1 \ \Rightarrow \ \|w_z\| = c, \quad 0 < c \le 1 \qquad (4.5)$$

Устремляя $Ra_c$ к бесконечности из первого уравнения (4.4) с учетом (4.5) получим, что $a \to 0$ . Тогда из второго уравнения, предварительно сокращая на $a$ , имеем равенство (4.1). Таким образом, равенство (4.2) позволяет найти пороговый градиент температуры, определяющий необходимое и достаточное условие абсолютной устойчивости равновесия.

В качестве примера отметим, что для горизонтального слоя сжимаемого газа при слабых изменениях свойств газа и адиабатического градиента, критическое число Рэлея приближенно можно представить в виде [5]

$$Ra_c = \frac{Ra^*}{f(1-K)} \qquad (4.6)$$

Здесь $f > 0$ поправочная функция, зависящая от конкретной задачи, $Ra^*$- критическое число Рэлея в приближении Буссинеска, $K < 1$- число Шварцшильда в центре области.

Из (4.6) видно, что при приближении к критическому градиенту, определяемому равенством $K = 1$, критическое число Рэлея приближается к бесконечности.

При получении (4.6) критерий $K$ априори берется в центре области, и этим заранее определяется пороговый градиент температуры. В общем случае это неверно и точный пороговый градиент должен вычисляться из условия (4.2), что требует предварительно решения спектральной задачи.

**Литература:**

1. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
2. *Полежаев В.И.* Методы моделирования конвективных, волновых процессов и теплообмена в околокритических средах (Обзор)// Изв. РАН.МЖГ, №1. 2011. С. 3-20.
3. *Полежаев В.И.* Моделирование конвективных, волновых процессов и теплообмена в около-сверхкритических средах (Обзор)// Изв. РАН.МЖГ, №2. 2011. С. 9-32.
4. *Schwarzschild K.* Uber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphere// Gott. Nach. 1906.Bd. 41. S. 1-24.
5. *Горбунов А.А., Никитин С.А., Полежаев В.И.* Об условиях возникновения конвекции Рэлея-Бенара и теплообмене в околокритической среде// Изв. РАН. МЖГ. 2007. №5. С 30-46.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика Т.6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
7. *Рамазанов М.М.* Аналитическое исследование стационарной конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса в пористом тонком кольцевом цилиндре в теплопроводном пространстве // Изв. РАН. МЖГ. 2012. №2. С 69-82.
8. *Рамазанов М.М.* Конвекция совершенного газа в пористой среде между двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами большой длины// Изв. РАН. МЖГ. 2010. №2. С. 84-96.

# ПРИМЕНЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Джаватов Д. К.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: djavatdk@mail.ru*

Рассматриваются вопросы эффективности эксплуатации горизонтальных скважин при разработке геотермальных месторождений. На основе проведенных численных расчетов для конкретных месторождений термальных вод Дагестана показано, что производительность горизонтальных скважин в разы выше производительности вертикальных.

Одной из главных задач большинства скважин является попадание в назначенную точку проектного пласта, при этом, иногда, необходимо обеспечить и требуемый угол входа в пласт и заданную траекторию в пласте. Для решения этой задачи нужно уметь управлять трассой скважины, избегать или сводить к минимуму осложнения, которые могут проявляться в процессе проводки скважины в силу влияния различных геологических и технических причин. Практикой бурения освоено большое количество технических и технологических средств качественного строительства наклонно направленных и горизонтальных скважин.

**Понятие о вертикальной, наклонно направленной и горизонтальной скважинах**. В практике бурения скважин существуют понятия «вертикальная скважина» и «наклонно направленная (горизонтальная) скважина». Вертикальными называются скважины, при бурении которых предпринимаются меры по ограничению естественного искривления и не используются методы искусственного искривления её оси. Обычно, в подавляющем большинстве случаев, все скважины искривлены. Поэтому, если максимальный зенитный угол скважины не превышает 5°, её принято считать условно вертикальной. Скважины с большим зенитным углом считаются естественно искривленными. В процессе бурения, скважины подверженные естественному искривлению, могут не попасть в заданную на кровле продуктивного пласта точку и, следовательно, не выполнить своего проектного назначения. Однако использование накопленных знаний о закономерностях искривления, результатов исследований влияния комплекса горно-геологических и технико-технологических факторов на характер искривления позволяют проводить скважины в заданном направлении. Такие скважины получили название наклонно - направленных. В последние десятилетия получили широкое распространение наклонно направленные скважины с горизонтальным окончанием – горизонтальные скважины (ГС), разветвлено-наклонные, разветвлено-горизонтальные многозабойные скважины.

**Цель и задачи направленного бурения скважин.** Целью направленного бурения является попадание конечного забоя скважины в предварительно заданную точку продуктивного пласта. Как правило, эта точка задаётся на кровле продуктивного пласта и является центром круга допуска. При попадании забоя в этот круг проектное задание считается выполненным. Для различных горно-геологических условий, назначения скважины, ёе глубины (по вертикали) величина радиуса круга допуска колеблется в пределах 15-60м. Для горизонтальных скважин проект считается выполненным, если горизонтальная

часть ствола не вышла за пределы проектных значений коридора, ограниченного двумя вертикальными и двумя горизонтальными плоскостями. Иногда направленное бурение производится с целью пересечения ствола аварийной, фонтанирующей нефтью или газом скважины для ее глушения.

Задачами, решаемыми с помощью направленного бурения, могут быть:

1) снижение затрат на разработку месторождения при бурении наклонно направленных скважин с кустовых площадок (кустовое бурение);
2) вскрытие продуктивного пласта под определенным углом для увеличения площади фильтрации;
3) проводка нескольких скважин с эстакад, платформ, расположенных в море или на озере;
4) проводка скважин до продуктивных пластов, расположенных под участками земли с сильно пересеченным рельефом (овраги, холмы, горы);
5) вскрытие продуктивных пластов под дном океанов, морей, озер, рек и болот;
6) уход в сторону из аварийной или малопродуктивной скважины путем забуривания бокового ствола;
7) вскрытие продуктивных пластов, залегающих под пологим сбросом или между двумя параллельными сбросами;
8) отклонение ствола от сбросовой зоны (зоны разрыва) в направлении продуктивного горизонта;
9) вскрытие продуктивных пластов под соляными куполами в связи со сложностью бурения через них.

**Краткий исторический обзор проблемы.**

*Около 600 лет до н.э.* - в Китае стало возможным вертикальное бурение на глубину 500м.

*Примерно в 1420 году* - первые свидетельства вертикального бурения в Европе.

*1495 год* - Леонардо да Винчи изобретает и конструирует первую переносную машину для горизонтального бурения. Она служит для рассверливания деревянных бревен при изготовлении деревянных водопроводных труб. Предположительно при жизни да Винчи были построены 10 машин для горизонтального бурения. Леонардо да Винчи также улучшил механику вертикального бурения.

*1780 год* - стало возможным пробурить буровую скважину глубиной 300м.

*1850 год* - кованые буровые штанги, паровые машины и алмазные буровые головки раскрывают для буровой техники новые возможности.

*1860-1890 годы* - благодаря значительным открытиям техники вертикального бурения, была достигнута глубина 2000м.

*1910 год* - первое шарошечное долото (зубчатое долото). *1920 год* - первая подземная горизонтальная машина для вытяжки газа из шахты (метан) пласта каменного угля в Руре (производители машин из Шпрекховеля, южный Рур).

*Первый этап* развития метода горизонтального бурения распространяется с 1950 по 1960 гг. (первый опыт бурения в СССР). Первые экспериментальные работы (по методу А. М. Григоряна) были успешно осуществлены в 1952 - 1953 гг. на Карташевском месторождении в Башкирии, когда была сооружена первая горизонтально - разветвленная скважина № 66/45. В этой скважине почти 80 % всей проходки было пройдено непосредственно по продуктивному пласту. Скважина имела 10 резко искривленных стволов. При ее вертикальной глубине

600 м общая протяженность скважины составила 1993 м, из которых 1768 м было пройдено непосредственно по продуктивному пласту. Максимальное расстояние между забоями составило 322 м, а наиболее протяженный горизонтальный ствол имел длину 168 м. Дебит нефти составил 120 т/сут, в том время как средний дебит по вертикальным скважинам на этом месторождении составил 7 т/сут. Правда, скорость бурения была ниже в 1,2 раза и бурение дороже в 1,5 раза, но при этом дебит был выше в 17 раз.

*1959 - 1960гг.* - начало развития теоретических воззрений на гидродинамические процессы, возникающие при бурении ГС. Во ВНИИнефть были проведены гидродинамические исследования по разработке нефтяных месторождений с помощью горизонтальных и многозабойных скважин. Были созданы теоретические основы фильтрации и нефтеотдачи пластов в таких скважинах, изложенные Ю. П. Борисовым, В. П. Пилатовским, В. П. Табаковым в их монографии "Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами" (М.: Недра, 1964 г.).

*Второй этап* развития бурения охватывает 1961 - 1978 гг. До 1970 г. во ВНИИБТ под руководством А. М. Григоряна группой специалистов была разработана теория бурения таких скважин и эффективная технология их проводки. А. М. Григорян подвел итог этим работам в своей монографии, которую выпустил в 1969 г. Во ВНИИБТ в это время был разработан и создан целый ряд технических средств, которые успешно были применены при бурении ГС и РГС в бывшей Куйбышевской области, на Западной Украине, Восточной Сибири (Марковская разведочная с отклонением горизонтального ствола, равным 632 м и одним разветвлением) и многие другие.

Семидесятые годы - начало промышленного бурения ГС за рубежом. Лидером бурения ГС стал Французский институт нефти (ФИН), специалисты которого взяли за основу исследования советских ученых - нефтяников в области бурения и разработки нефтяных месторождений с помощью горизонтальных скважин (ГС) и многозабойных скважин (МЗС), а также фирма "Эльф-Акитен".

В связи с определенной технической и технологической сложностью строительства ГС зарубежными фирмами были резко увеличены ассигнования на научно-исследовательские работы по горизонтальному бурению. За короткие сроки были сконструированы, прошли промышленные испытания и появились на рынке новые забойные двигатели, долота, телесистемы и другое оборудование, позволяющее достигнуть высоких технико-экономических показателей при бурении ГС. Была решена проблема проведения геофизических исследований в горизонтальных стволах.

К сожалению, у нас в стране из-за того, что резко увеличилась добыча нефти (относительно дешевой) в Западной Сибири, снизился также резко и интерес к бурению разветвленно-горизонтальных скважин (РГС) и ГС. Наша российская технология не внедрялась. Было упущено время.

С *1978 - 1979 гг.* начинается *третий этап*. В эти годы резко возрастает интерес к бурению ГС в США, так как этот вид бурения становится экономически выгодным с использованием даже обычного, традиционного оборудования. Опыт эксплуатации ГС на нескольких месторождениях уже к 1982 г. показал, что они обладают большими потенциальными возможностями для обеспечения наиболее полного извлечения из недр углеводородов особенно там, где традиционные методы не дают эффекта, т. е. мало применимы.

*Четвертый этап* начался в 1985 - 1986 гг. Центр бурения ГС уверенно переместился в США. Успехи фирмы "Эльф-Акитен" вызвали огромный интерес

многих нефтяных фирм США. Начинается активное разбуривание горизонтальными скважинами месторождения Прадхо Бей, сложенного низкопроницаемыми известняками. Резко возросли объемы бурения ГС в шельфовой зоне Северного моря (Дания, Норвегия, Англия).

Таблица 1.

| Показатели | Разветвленно-горизонтальная скважина № 66/45 | Обычная скважина |
|---|---|---|
| Общая проходка в продуктивном пласте, м. | 1768 | 320 |
| Дебит нефти, т/сут. | 120 | 7 |
| Скорость бурения, м/мес. | 600 | 705 |
| Стоимость бурения, тыс. р. | 75 | 50 |

К 1989 г. в США пробурено уже 51 ГС и 30 - в Европе. На 12-м Международном нефтяном конгрессе в Хьюстоне (1987 г.) значительное число докладов было посвящено бурению ГС и результатам их использования для разработки нефтяных и газовых месторождений.

В настоящее время бурение горизонтальных и разветвленно-горизонтальных скважин успешно применяется в большинстве нефтедобывающих стран, таких как США, Франция, Канада, Дания и др. В США в 1990 г. было уже пробурено 2000 скважин, а к 2000 г. уже до 20 тыс. таких скважин.

В нашей стране на территории бывшего Советского Союза пробурено 207 горизонтальных скважин. В России в 1990 г. было сооружено 12 ГС, в 1991 г. - 44 (в том числе в Западной Сибири 13). В 1992 г. пробурено 32 ГС.

По данным производственных нефтяных организаций дебит освоенных скважин в 3 - 10 раза превышает дебит соседних вертикальных и наклонных скважин. За последние годы в соответствии с программой "Горизонт" организовано бурение ГС в ПО Саратовнефтегаз, Башнефть, Татнефть, Нижневолжскнефть, Коминефть, Сахалинморнефтегаз, Нижневартовскнефтегаз, Томскнефть, Пермнефть и др.

В последние годы новые технологии, основанные на горизонтальном бурении, произвели настоящую революцию в практике и теории нефтедобычи. Дебиты скважин, имеющих горизонтальные окончания большой протяженности, значительно возросли. В результате разрядились сетки скважин, снизились, депрессии, значительно увеличилось время безводной эксплуатации, изменились категории запасов, считавшиеся ранее неизвлекаемыми, которые в настоящее время могут эффективно извлекаться в промышленных масштабах, повысилась эффективность многих старых методов воздействия на пласт при их реализации с помощью горизонтальных скважин. По многим показателям достигнуты впечатляющие результаты.

Следует заметить, что в случае разбуривания залежи горизонтальным, а еще лучше разветвленно-горизонтальными скважинами резко упрощается система разработки месторождения, поэтому становятся дешевле и работы по его эксплуатации.

Вследствие огромной конкуренции на нефтяном и газовом рынке в настоящее время требуется резко снизить себестоимость добываемых углеводородов путем коренного усовершенствования дренажных способностей коллекторов. Такому требованию удовлетворяет разветвленно-горизонтальное бурение (РГ). Основным направлением применения разветвленно-

горизонтального бурения у нас в стране должно стать возрождение старых нефтяных месторождений и извлечение из них оставшихся запасов нефти (которые составляют до 60 - 80 % от начальных запасов).

Проблема эта приобретает особую актуальность при разработке геотермальных месторождений, где интенсификация добычи термальной воды является одним из основных способов улучшения технико-экономических показателей геотермального производства и повышения конкурентоспособности геотермальной отрасли по сравнению с традиционными энергетическими отраслями.

Особенностью геотермальной отрасли является ее низкая конкурентоспособность по сравнению с традиционными энергетическими отраслями. Резкое улучшение технико-экономических показателей геотермального производства можно достичь при получении больших дебитов с единичных скважин. Одним из путей интенсификации добычи термальной воды является создание дополнительных каналов в пласте для значительного увеличения поверхности фильтрации и зоны дренирования. Это достигается созданием горизонтального ствола, который расходится на сотни метров по пласту. Такое вскрытие продуктивного пласта позволяет в десятки раз увеличить полезную протяженность ствола в пласте и многократно повысить производительность скважины.

В настоящее время накоплен большой опыт бурения ГС при добыче нефти. За счет продольного вскрытия пласта повышается гидродинамическое совершенство скважины. Практика эксплуатации ГС показывает, что производительность их в десятки раз выше производительности обычных вертикальных скважин. Проводка ГС характеризуется замедлением темпа углубления ствола и удорожанием буровых работ. Опыт бурения показывает, что стоимость 1 м проходки горизонтального ствола примерно на 20-40% выше стоимости бурения 1 м обычных скважин. Вследствие увеличения протяженности скважины за счет удлинения ствола в продуктивном пласте, роста накладываемых на технологию проводки скважин ограничений, а также усложнения буровых и геофизических работ стоимость и продолжительность бурения ГС выше, чем у обычных скважин. Однако ввиду более значительного увеличения производительности скважин, бурение горизонтальных скважин экономически выгодно с точки зрения конечной цели строительства скважин. Экономическая эффективность при горизонтальном вскрытии продуктивных пластов достигается в результате получения заданного уровня добычи при значительно меньшем числе скважин. Сопоставление динамики изменения стоимости скважин с динамикой роста их дебита показывает, что производительность горизонтальных скважин возрастает более интенсивно, чем их стоимость.

Основными параметрами, влияющими на стоимость горизонтальной скважины, являются ее диаметр и протяженность горизонтального ствола в продуктивном пласте. С увеличением длины горизонтального ствола увеличивается зона дренирования и дебит скважины, что приводит к необходимости увеличения диаметра скважины для пропуска такого дебита. Увеличение диаметра в свою очередь приводит к резкому возрастанию капитальных затрат на строительство скважины. В этих условиях возникает задача определения оптимальных значений диаметра скважины и длины горизонтального ствола. За критерий оптимальности примем минимум удельных капитальных затрат.

В научной литературе даются ряд формул для определения дебита одиночной горизонтальной скважины [1,2,3], которые конечными результатами мало отличаются друг от друга:
приближенная формула S.Joshi:

$$G = \frac{2\pi k h \rho \Delta P}{\mu B_0 \left[ \ln\left( \frac{\mathrm{L} + \sqrt{\mathrm{L}^2 - 0{,}25a^2}}{0{,}5a} \right) + \frac{\beta h}{a} \ln \frac{\beta h}{d} \right]};$$

точная формула Renard, Dupuy:

$$G = \frac{2\pi k h \rho \Delta P}{\mu B_0 \left[ \cosh^{-1}\left(\frac{2L}{a}\right) + \frac{\beta h}{a} \ln \frac{\beta h}{\pi d} \right]};$$

приближенная формула В.Григулецкого:

$$G = \frac{2\pi k h \rho \Delta P}{\mu B_0 \left( \ln \frac{4R}{a} + \frac{\beta h}{a} \ln \frac{\beta h}{\pi d} \right)},$$

где $G$ - массовый дебит горизонтальной скважины, кг/с; $k$ - горизонтальная проницаемость пласта, м$^2$; $h$ - мощность продуктивного пласта, м; $\rho$ - плотность термальной воды, кг/ м$^3$; $\Delta P$ - перепад давления между давлениями на границе кругового контура питания и на стенке скважины, Па; $\mu$ - вязкость флюида, Па·с; $B_0$ - пластовый объемный фактор флюида; $R$ - радиус кругового контура питания, м; $a$ - длина горизонтальной части скважины, м; $\beta = \sqrt{k / k_в}$; $k_в$ - вертикальная проницаемость пласта, м$^2$; $d$ - диаметр скважины, м;

$$L = 0{,}5a\sqrt{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + \left(\frac{R}{0{,}5a}\right)^4}}; \quad R_c' = \frac{1+\beta}{2\beta}.$$

В дальнейших расчетах будем пользоваться формулой В..Григулецкого [1]:

$$G = \frac{2\pi k h \rho \Delta P}{\mu B_0 \left( \ln \frac{4R}{a} + \frac{\beta h}{a} \ln \frac{\beta h}{\pi d} \right)} \qquad (1)$$

Проведем расчеты по полученным уравнениям для гипотетического анизотропного пласта, залегающего на глубине 4500 м.

В таблице 2 приведены дебиты, оптимальные длины горизонтального ствола и минимальные удельные капитальные затраты при различных диаметрах скважин [4]. Данные таблицы 1 получены при перепаде давления между давлениями на границе контура питания и на стенке скважины $\Delta P = 1 \cdot 10^6$ Па. Диаметры скважин соответствуют диаметрам обсадных колонн, выпускаемых отечественной промышленностью. Увеличение диаметра приводит к возрастанию оптимальной длины горизонтального участка. Уменьшение мощности и проницаемости продуктивного пласта также приводит к увеличению оптимальной длины горизонтального участка. Наиболее реальными являются длины горизонтальных стволов до 500 м, более протяженные стволы трудно обеспечить на практике из-за сложностей технико-технологического характера.

Таблица 2. Значения дебита, длины горизонтального ствола и удельных капитальных затрат в зависимости от диаметра скважины

| Диаметр скважины, d, м | Мощность пласта, h, м | Длина горизонтального ствола, a, м | Дебит горизонтальной скважины, $G_г$, кг/с | Дебит вертикальной скважины, $G_в$, кг/с | Отношение $G_г / G_в$ | Удельные капитальные затраты, F, руб/КВт |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $k = 1 \cdot 10^{-13}$ м$^2$; $k_в = 0{,}5 \cdot 10^{-13}$ м$^2$ | | | | | | |
| 0,154 | 100 | 207 | 65 | 60 | 1,1 | 713 |
| 0,166 | 100 | 230 | 77 | 70 | 1,1 | 665 |
| 0,177 | 100 | 251 | 89 | 78 | 1,15 | 635 |
| 0,199 | 100 | 296 | 116 | 96 | 1,2 | 602 |
| 0,2245 | 100 | 353 | 151 | 115 | 1,31 | 608 |
| **0,2527*** | **100** | **421** | **196** | **133** | **1,47** | **610** |
| 0,2763 | 100 | 483 | 239 | 147 | 1,63 | 628 |
| 0,302 | 100 | 557 | 290 | 158 | 1,83 | 660 |
| 0,320 | 100 | 613 | 329 | 165 | 2,0 | 691 |
| 0,357 | 100 | 743 | 420 | 175 | 2,4 | 776 |
| 0,154 | 50 | 221 | 63 | 49 | 1,3 | 776 |
| 0,166 | 50 | 248 | 74 | 55 | 1,35 | 735 |
| 0,177 | 50 | 274 | 86 | 60 | 1,43 | 707 |
| 0,199 | 50 | 332 | 110 | 68 | 1,61 | 674 |
| **0,2245** | **50** | **408** | **143** | **76** | **1,89** | **662** |
| 0,2527 | 50 | 505 | 185 | 82 | 2,26 | 675 |
| 0,2763 | 50 | 600 | 225 | 86 | 2,62 | 703 |
| 0,302 | 50 | 721 | 277 | 89 | 3,12 | 747 |
| 0,320 | 50 | 819 | 318 | 90 | 3,54 | 788 |
| 0,357 | 50 | 1071 | 426 | 93 | 4,58 | 883 |
| 0,154 | 15 | 236 | 39 | 19 | 2,1 | 954 |
| 0,166 | 15 | 276 | 41 | 20 | 2,1 | 924 |
| 0,177 | 15 | 315 | 47 | 21 | 2,2 | 904 |
| **0,199** | **15** | **410** | **60,2** | **22** | **2,7** | **894** |
| 0,2245 | 15 | 549 | 79 | 23 | 3,5 | 906 |
| 0,2527 | 15 | 759 | 105 | 23,7 | 4,4 | 918 |
| 0,2763 | 15 | 1008 | 137 | 24 | 5,7 | 953 |
| $k = 0{,}8 \cdot 10^{-13}$ м$^2$; $k_в = 0{,}4 \cdot 10^{-13}$ м$^2$ | | | | | | |
| 0,154 | 100 | 236 | 64 | 57 | 1,1 | 692 |
| 0,166 | 100 | 262 | 76 | 66 | 1,15 | 653 |
| 0,177 | 100 | 294 | 97 | 71 | 1,37 | 636 |
| 0,199 | 100 | 339 | 113 | 81 | 1,39 | 594 |
| **0,2245** | **100** | **405** | **148** | **103** | **1,43** | **579** |
| 0,2527 | 100 | 486 | 190 | 117 | 1,62 | 585 |
| 0,2763 | 100 | 561 | 231 | 126 | 1,83 | 605 |
| 0,302 | 100 | 651 | 281 | 133 | 2,11 | 635 |
| 0,320 | 100 | 721 | 320 | 137 | 2,3 | 673 |
| 0,357 | 100 | 883 | 412 | 144 | 2,9 | 678 |
| $k = 0{,}4 \cdot 10^{-13}$ м$^2$; $k_в = 0{,}2 \cdot 10^{-13}$ м$^2$ | | | | | | |
| 0,154 | 100 | 357 | 59 | 45 | 1,3 | 885 |
| 0,166 | 100 | 399 | 70 | 49 | 1,43 | 846 |
| 0,177 | 100 | 439 | 80 | 53 | 1,5 | 815 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,199 | 100 | 528 | 103 | 59 | 1,75 | 795 |
| **0,2245** | **100** | **644** | **135** | **64** | **2,1** | **794** |
| 0,2527 | 100 | 792 | 175 | 68 | 2,58 | 819 |
| 0,2763 | 100 | 939 | 216 | 70 | 3,08 | 857 |
| 0,302 | 100 | 1129 | 271 | 72 | 3,75 | 913 |
| 0,320 | 100 | 1288 | 319 | 73 | 4,35 | 957 |
| 0,357 | 100 | 1702 | 454 | 75 | 6,05 | 1063 |

*Жирным цветом выделены оптимальные значения параметров, соответствующие минимуму удельных капитальных затрат

Полученные расчетные значения таблицы 2 показывают, что с увеличением диаметра одиночной скважины при неизменной толщине анизотропного пласта увеличиваются и оптимальная длина горизонтального ствола, и величина отношения дебитов горизонтальной и вертикальной скважин. При этом величина отношения увеличивается с меньшим относительным увеличением дебита горизонтальной скважины, например, при h=100 м, для диаметров 0,154 м и 0,32 м относительное увеличение длины горизонтального ствола составляет 613/207≈3 раза, в то время как величина эффективности горизонтальной скважины увеличивается в 2/1,1≈1,8 раза. Таким образом, это также свидетельствует о существовании оптимального значения диаметра скважины, который определяется конкретными горно-геологическими условиями.

Уменьшение мощности продуктивного пласта приводит к уменьшению оптимальной длины горизонтального ствола и к увеличению значения удельных капитальных затрат, что связано с понижением дебита скважины, соответствующим мощности пласта.

Сравнительный анализ расчетных данных, таблицы показывает, что горизонтальные скважины целесообразно бурить при разработке анизотропных пластов малой толщины: при этом получается большое относительное увеличение дебита. Например, дебит вертикальной скважины при толщине пласта h=15 м и диаметре скважины 0,154 м и 0,2 м равен соответственно 19 и 22 кг/с. При h=15 м достаточно пробурить горизонтальный ствол длиной около 400м и диаметром 0,2 м, чтобы дебит увеличился в 2,7 раза. Для получения такого же эффекта в продуктивном пласте при h=100 м необходимо пробурить горизонтальный ствол длиной более чем 800 м, что трудно обеспечить на практике.

С уменьшением вертикальной проницаемости $k_в$ при неизменности величины $\beta = \sqrt{k / k_в}$ значение оптимального диаметра скважины – уменьшается, а величина горизонтального ствола – увеличивается. Поэтому для месторождений с невысокими значениями вертикальной проницаемости k целесообразнее увеличивать дебит скважины за счет длины горизонтального ствола.

Анализ результатов расчетов показывает, что для случая когда горизонтальная проницаемость выше вертикальной ( $k>k_в$ ) изменение мощности пласта не столь сильно влияет на определяемые оптимальные параметры $a_1$ , $a_2$ и d. Для случая, когда вертикальная проницаемость выше горизонтальной ( $k<k_в$ ) с уменьшением мощности продуктивного пласта уменьшается значение оптимального диаметра скважины как и длина горизонтального ствола нагнетательной скважины $a_2$, а длина $a_1$ – увеличивается ( при изменении мощности пласта h от 150 до 15 м $a_1$ увеличивается более чем в три раза, дебит при этом уменьшается на 50% ). Из сопоставления стоимостных оценок удельных капитальных затрат также следует, что при $k>k_в$ относительная стоимость удельных затрат значительно ниже (на 40-80%) чем при $k<k_в$.

Уменьшение мощности пласта при $k<k_в$ т. е. - когда в формировании потока флюида в скважине основную роль играет вертикальная проницаемость приводит к необходимости в увеличении длины горизонтального ствола для получения эффективных дебитов.

Основной вывод, который можно сделать отсюда – ГЦС с горизонтальными скважинами наиболее эффективны при разработке пластов, где горизонтальная проницаемость выше вертикальной.

В таблице 3, для некоторых геотермальных месторождений, приведены оптимальные значения диаметров скважин и длин горизонтальных стволов, которые зависят от многих факторов – горно-геологических условий (вертикальная и горизонтальная проницаемости пласта), мощности и глубины залегания пласта, свойств пластового флюида (вязкости жидкости) и т.д.

Таблица 3. Оптимальные значения диаметров и длин горизонтальных стволов скважин ГЦС

| Месторождение | *H, м* | *h, м* | *k, м²* | *d, м* | $a_1$, *м* | $a_2$, *м* | *G, кг/с* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кизлярское | 2890 | 28 | $0{,}54\cdot10^{-12}$ | 0,245 | 170 | 250 | 79 |
| Юбилейное | 4500 | 120 | $0{,}4\cdot10^{-12}$ | 0,264 | 186 | 316 | 103 |
| Тернаир | 2900 | 50 | $0{,}9\cdot10^{-12}$ | 0,26 | 150 | 206 | 96 |
| Мартовское | 3000 | 100 | $0{,}25\cdot10^{-12}$ | 0,238 | 195 | 357 | 72 |

Из данных таблицы 3 видно, что оптимальные длины горизонтальных стволов в нагнетательных скважинах больше чем в добычных скважинах. Это объясняется тем, что с увеличением горизонтального ствола увеличивается зона дренирования, способствующая уменьшению фильтрационных потерь давления в контуре ГЦС. Уменьшение потерь давления приводит к увеличению полезной мощности энергоустановки и снижению удельных капитальных затрат.

Таким образом, использование ГЦС с горизонтальными скважинами в технологической схеме двухконтурной ГеоЭС является одним из перспективных направлений использования геотермальной энергии, позволяющим получить экологически чистую и конкурентоспособную энергию.

**Литература:**

1. *Григулецкий В.Г.* Основные допущения и точность формул для расчета дебита горизонтальных скважин// Нефтяное хозяйство. 1992. № 12. С.5-6.
2. *Магомедов К.М., Алиев Р.М., Азизов Г.А.* Сравнительный анализ расчета производительности горизонтальной скважины// Геотермия. Геотермальная энергетика / Сб. науч.тр.ИПГ ДНЦ РАН. Махачкала. 1994. С.50-58.
3. Разработка нефтяных месторождений наклонно-направленными скважинами/ В.С. Евченко, Н.П. Захарченко, Я.М. Каган и др. М.: Недра, 1986. 278с.
4. *Джаватов Д.К.* Модели геотермальных систем с горизонтальными скважинами / Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы - Материалы международной конференции. Т.1.Махачкала: Даг.НЦ РАН, 2005. с.299-305.

# О ТУННЕЛЬНОЙ САМОДИФФУЗИИ ПРИ СИЛЬНОМ СЖАТИИ КРИСТАЛЛА

Магомедов М.Н.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: mahmag4@mail.ru*

Рассчитаны изотермические зависимости параметров образования вакансий и самодиффузии от величины сжатия различных элементарных кристаллов (Ne, Ar, Fe, алмаз, Si). Показано, что в области: $1 > V/V_0 > (V/V_0)_{min}$ происходит подавление активационных процессов при изотермическом сжатии, и их усиление при изохорическом нагреве кристалла. Здесь $V/V_0$ – отношение молярных объемов кристалла при давлении $P$ и температуре $T$, и при $P = 0$ и $T = 0$ K. Но при $V/V_0 = (V/V_0)_{min}$ вероятность образования вакансии и коэффициент самодиффузии достигают минимума, а при дальнейшем изотермическом сжатии происходит усиление активационных процессов, причем здесь активационные параметры слабо зависят от температуры. Показано, что это обусловлено квантовыми эффектами: подбарьерному туннельному переносу атомов по объему кристалла.

**Введение.** Известно, что с ростом давления ($P$) коэффициент самодиффузии ($D_f$) в объеме кристалла уменьшается. Это уменьшение характеризуется величиной объема самодиффузии ($v_d$), который экспериментально определяется по формуле [1]:

$$v_d = \left(\frac{\partial g_d}{\partial P}\right)_T \cong -k_b T\left[\frac{\partial \ln(D_f)}{\partial P}\right]_T = \frac{k_b T}{B_T}\left[\frac{\partial \ln(D_f)}{\partial \ln(V/V_0)}\right]_T, \qquad (1)$$

где $g_d$ – термодинамический потенциал (или свободная энергия Гиббса) самодиффузии атомов в объеме кристалла, $k_b$ – постоянная Больцмана, $T$ – температура, $B_T = -V(\partial P / \partial V)_T$ – модуль упругости, $V/V_0$ – отношение объемов при $T$ и $P$ и при $P = 0$ и $T = 0$ K.

Известные на сегодня величины $v_d$ определены при не высоких давлениях и температурах, ибо изучение самодиффузии при высоких $P$-$T$-параметрах очень сложно, как экспериментально, так и теоретически. Теоретическое изучение проблематично из-за того, что с ростом давления усиливается роль квантовых эффектов [2]. Те методы расчета, которые хорошо работают при низких давлениях, оказываются не пригодными при высоких: одни не могут корректно описать изменение энергии колебаний решетки с ростом давления [1], а другие содержат такие подгоночные константы, изменение которых с ростом $P$-$T$-параметров трудно предугадать. В подавляющем же большинстве работ (см. [3]) зависимостью $v_d$ от температуры вообще пренебрегают.

В данной работе использована аналитическая методика расчета активационных (образования вакансий и самодиффузии) параметров из [4 – 6], не содержащая никаких подгоночных констант и учитывающая квантовые эффекты. На основе данной методики рассчитаны зависимости активационных параметров, как от величины сжатия $V/V_0$, так и от температуры. Показано, что данный метод позволяет изучить особенности массопереноса при экстремально сильном сжатии кристаллов.

**Метод расчета образования вакансий и самодиффузии атомов.** Представим систему как виртуальную структуру из $N + N_v$ ячеек одинакового размера, в которой $N_v$ ячеек вакантны. При этом будем полагать, что структура из $N + N_v$ ячеек аналогична структуре кристаллической решетки данного вещества.

Кроме этого, аналогично тому, как это было сделано в [4 – 6], будем считать, что атомы в системе могут находиться в двух состояниях: в локализованном (Л-), и в делокализованном (Д-). В Л-состоянии атом локализован в ячейке виртуальной решетки и имеет только колебательные степени свободы. В Д-состоянии атому доступен весь объем системы, и он имеет только трансляционные степени свободы. Атом переходит из Л- в Д-состояние (т.е. начинается миграция), когда его скорость позволяет ему за полпериода колебания в Л-состоянии ($\tau/2$) пройти расстояние равное радиусу области доступности для Д-атома в безвакансионной, несрелаксировавшей решеточной структуре: $\lambda / 2 = c_o / (2\, k_p^{1/3})$, где $c_o$ – размер ячейки в безвакансионной системе:

$$c_o = \left( \frac{6k_p}{\pi\rho} \right)^{1/3}, \qquad (2)$$

$k_p$ – коэффициент упаковки виртуальной структуры из $N + N_v$ – ячеек, $\rho = N/V$ – плотность числа атомов. Релаксация системы в активированное вакансиями состояние приводит к уменьшению размеров ячейки до величины, определяемой соотношением:

$$c = \left[ \frac{6k_p V}{\pi(N + N_v)} \right]^{1/3} = c_o (1 - \phi_v)^{1/3}, \qquad (3)$$

где $\phi_v$ – вероятность обнаружить вакансию в виртуальной структуре из $N + N_v$ ячеек:

$$\phi_v = \frac{N_v}{N + N_v} = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_{(E_v/k_b T)^{1/2}}^{\infty} \exp(-t^2)\, \mathrm{d}t \ . \qquad (4)$$

Энергия создания вакансии в виртуальной решеточной структуре $E_v$ равна:

$$E_v = \frac{E_L}{1 + x_d[(C_D E_L / k_b T) - 1]}, \quad E_L = \left( \frac{m}{k_n^o} \right) \left( \frac{c_o k_b \Theta_{eo}}{2\hbar} \right)^2 f_w(y), \quad C_D = \frac{4k_n^o}{3k_p^{2/3}}, \qquad (5)$$

где $k_n^o$ – число всех ячеек (как занятых, так и вакантных) ближайших к данному атому, $\hbar$ – постоянная Планка, $m$ – масса атома, $\Theta_{eo}$ – температура Эйнштейна в безвакансионном (т.е. при $\phi_v = 0$, ибо $\lambda$ определяется для такой системы) кристалле,

$$f_w(y) = \frac{2[1 - \exp(-y)]}{y[1 + \exp(-y)]}, \qquad y = \frac{\Theta_{eo}}{T} = \frac{3\Theta_o}{4T} \ . \qquad (6)$$

где $\Theta$ – температура Дебая, которая связана с температурой Эйнштейна: $\Theta = (4/3)\,\Theta_e$ .

Доля атомов в Д-состоянии определяется, как доля атомов, имеющих кинетическую энергию выше порогового значения $E_d$ – энергии делокализации, т.е. энергии необходимой для перехода атома из Л- в Д-состояние:

$$x_d = \frac{N_d}{N} = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_{E_d / k_b T}^{\infty} t^{1/2} \exp(-t)\, \mathrm{d}t \ . \qquad (7)$$

Чтобы атом перешел из Л- в Д-состояние его скорость должна быть не менее чем: $v_m = \lambda / (\tau/2)$. Для эйнштейновской модели кристалла период колебания атома в безвакансионной (ибо $\lambda$ определяется для такой системы),

несрелаксировавшей решеточной структуре равен: $\tau = 2\pi\,\hbar / (k_b\,\Theta_{e0})$. Поэтому $E_d$ можно определить в виде:

$$E_d = \left(\frac{3}{2}\right) m\, v_m{}^2\, f_w(y) = \left(\frac{3}{2}\right) m \left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^2 f_w(y) = \left(\frac{3}{8\pi^2}\right) m \left(\frac{c_0 k_b \Theta_{e0}}{\hbar k_p{}^{1/3}}\right)^2 f_w(y) = C_{ld}\, E_L\,, \quad (8)$$

где введено обозначение: $C_{ld} = \dfrac{3k_n^{o}}{2\pi^2 k_p{}^{2/3}} = \left(\dfrac{9}{8\pi^2}\right) C_D\,.$

Выражение для коэффициента самодиффузии в объеме кристалла имеет вид [4-6]:

$$D_f(\rho, T) = D_d(\rho)\, x_d(\rho, T)\,, \quad (9)$$

где функция $x_d(\rho, T)$ определена в (7), а размерностный множитель $D_d(\rho)$ равен:

$$D_d(\rho) = f_{cor} \left(\frac{c_0}{\pi k_p{}^{1/3}}\right)^2 \frac{k_b \Theta_0}{2\hbar}\,. \quad (10)$$

Здесь $f_{cor}$ – «фактор корреляции», возникающий из-за того, что ушедший в вакансию атом может сразу же вернуться обратно, не внеся вклада в диффузию [7].

Физический смысл множителя $D_d(\rho)$ в том, что это такой коэффициент самодиффузии, который теоретически может иметь кристалл при изохорической ($\rho$ = const) делокализации всех его атомов (т.е. при $x_d(\rho, T\to\infty) = 1$):

$$D_d(\rho) = \lim_{\substack{T\to\infty \\ \rho=const}} \frac{D_f(\rho,T)}{x_d(\rho,T)} = \lim_{\substack{x_d=1 \\ \rho=const}} D_f(\rho,T)\,.$$

Как было показано в [4 – 6], данный метод позволяет хорошо описать функции $\phi_v(\rho,T)$ и $D_f(\rho,T)$ как в области плавления, так и при $T$ = 0 K. Но расчеты в [4 – 6] были выполнены при низком давлении, где и были получены экспериментальные параметры, по которым тестировалась методика. При этом уменьшение функции $\Theta_0$ при изобарическом ($P$ = 0) росте объема $V(T)$ рассчитывалось по формуле:

$$\Theta_0(c) = \Theta_0(r_0) \times \left(\frac{r_0}{c_0}\right)^{3\gamma_0} = \Theta_{00} \times \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma_{00}}\,, \quad (11)$$

где $r_0$ и $\Theta_{00}$ – расстояние между центрами ближайших атомов и температура Дебая при $T$ = 0 K и $P$ = 0, $\gamma_0$ – параметр Грюнайзена в безвакансионной системе, величину которого брали равной экспериментальному значению при $T$ = 0 K и $P$ = 0: $\gamma_{00}$. Здесь $V_0 = N_A(\pi / 6\, k_p)\, r_0{}^3$, где $N_A$ – число Авогадро. В данной работе формализм из (2) – (10) будет использован для изучения активационных параметров при высоких давлениях. Поэтому для расчета зависимостей $\Theta_0(c)$ и $\gamma_0(c)$ будет использовано более корректное выражение, полностью учитывающее «энергию нулевых колебаний».

**Метод расчета температуры Дебая.** Представим парное межатомное взаимодействие в виде потенциала Ми–Леннарда–Джонса [6, гл. 3]:

$$\varphi(r) = \frac{D}{(b-a)} \left[ a \left(\frac{r_0}{r}\right)^b - b \left(\frac{r_0}{r}\right)^a \right], \qquad b > a\,, \quad (12)$$

где $D$ и $r_0$ – глубина и координата минимума потенциальной ямы, $b$ и $a$ – параметры.

Тогда температуру Дебая и параметр Грюнайзена при $T$ = 0 K и при произвольной плотности можно определить в виде [6, гл. 2; 8]:

$$\Theta = A_w\,\xi\left[-1+\left(1+\frac{8D}{k_b A_w\,\xi^2}\right)^{1/2}\right], \qquad (13)$$

$$\gamma = -\left(\frac{\partial \ln\Theta}{\partial \ln V}\right)_T = \frac{b+2}{6\,[1+(A_w\xi/\Theta)]}\ . \qquad (14)$$

где функция $A_w$ возникает из-за учета энергии «нулевых колебаний»:

$$A_w = K_R\,\frac{5k_n ab(b+1)}{144\,(b-a)}\left(\frac{r_o}{c}\right)^{b+2},\ K_R=\frac{\hbar^2}{k_b r_o m},\ \xi=\frac{9}{k_n{}^o},\ k_n = k_n{}^o(1-\phi_v)\,. \qquad (15)$$

Выражения (13) и (14) показали хорошее согласие с экспериментальными оценками Θ и γ для многих элементарных кристаллов с различными структурами, характером химической связи и ролью квантовых эффектов [6, 8]. Поэтому при расчетах активационных параметров мы используем выражения (13) – (15), полагая, что температура Дебая не зависит от температуры: $\Theta_o(\rho, T) = \Theta_o(\rho) = \Theta(k_n{}^o, c_o)_{T=0\ K}$.

Из (13) следует, что при сверхсильном сжатии функция Θ не стремится к бесконечности (как это получается из (11)), а становится не зависимой от плотности константой, достигая при $V/V_0$ = 0 максимума, а функция γ достигает минимума:

$$\Theta(V/V_0=0)=\Theta_{max}=\frac{4D}{\xi\,k_b}=\frac{4k_n{}^o}{9\,k_b},\ \gamma(V/V_0=0)=\gamma_{min}=0. \qquad (16)$$

**Результаты расчетов.** Для проведения конкретных расчетов возьмем элементарные кристаллы с различными структурами и характером химической связи: гране центрированные кубические (ГЦК) кристаллы неона (Ne) и аргона (Ar), железо (Fe) с объемно центрированной кубической (ОЦК) структурой и кристаллы алмаза ($C_{dia}$) и кремния (Si). ОЦК структура для железа была выбрана потому, что при высоких $P$-$T$-условиях железо переходит в β-фазу, структура которой менее плотная, чем ГЦК структура γ-фазы или ГПУ структура ε-фазы [9]. Тройная (γ-ε-β) точка имеет параметры: $P$ = 37 GPa = 370 kbar и $T$ = 1550 K [9].

В таблице 1 представлены параметры межатомного потенциала (12) из [6]. Там же показаны и полученные на их основе значения: $k_bA_w(1)/D$ из (15), температуры Дебая из (13), параметра Грюнайзена из (14) при $V/V_0 = (c/r_o)^3 = 1$ (т.е. при $P \cong 0$), и $\Theta_{max}$ из (16).

В работе [5; 6, с. 88] было показано, что глубина потенциала $D$ для ковалентных кристаллов (в отличие от металлов) существенно зависит от вида деформации, которой подвергается кристалл (упругой или пластической). Это обусловлено тем, что ковалентная связь состоит из двух звеньев: сильного и слабого, причем энергия слабого звена приблизительно вдвое меньше, чем сильного. Энергия всей межатомной связи (которая работает при упругой деформации) равна:

$$D=\frac{18B_{00}V_0}{k_n{}^o ab\,N_A}=D_s+\Delta D\ ,\ \text{где}\ D_s=\frac{L_{00}}{(k_n^o/2)}\ . \qquad (17)$$

Здесь $L_{00}$ и $B_{00}$ и – энергия сублимации и изотермический модуль упругости при $T$ = 0 K и $P$ = 0, $D_s/2$ – это энергия связи электрона с «чужим» ионом, т.е. одним из двух звеньев слабой связи. Величина $\Delta D/2 = (D - D_s)/2 = D_s/2 + d$ – это энергия

связи электрона со «своим» ионом, или одно из двух звеньев сильной связи (см. рис. 3.15 в [6, с. 88]). При упругой (обратимой) деформации ковалентных кристаллов работают одновременно сильное и слабое звенья ковалентной связи и глубина потенциала равна $D$. Именно из значения $D$ и необходимо рассчитывать такие параметры, при измерении которых не происходит разрыва межатомных связей: скорость звука, температура Дебая, коэффициент теплового расширения. При пластической (необратимой) деформации структуры ковалентного кристалла рвутся только слабые звенья связи, и глубина потенциала определяется величиной $D_s$. Поэтому из $D_s$ определяются такие (связанные с разрывом межатомных связей) параметры, как энергия сублимации, поверхностная энергия и энергия активационных процессов (образования вакансий и самодиффузии). Поэтому в табл. 1 для $C_{dia}$ и Si приведены: $D$ – в первой строке, а $D_s$ – во второй строке.

Таблица 1.

| Крис-талл | $r_o$ $10^{-10}$ m | $D / k_b$ K | $b$ | $a$ | $k_b A_w(1)/D$ | Θ(1) K | γ(1) | $\Theta_{max}$ K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ne** | 3.1563 | 52.59 | 21.39 | 5.83 | 0.3430 | 74.635<br>***63-75*** | 3.30<br>***2.6-3.5*** | 280.48 |
| **Ar** | 3.7555 | 173.60 | 16.69 | 6.62 | 0.0401 | 93.25<br>***85-93.3*** | 2.95<br>***2.4-3.1*** | 925.87 |
| **α-Fe** | 2.4775 | 12576.7 | 8.26 | 3.58 | $1.8\times10^{-4}$ | 478.463<br>***420-478*** | 1.701<br>**1.4-2.5** | 44717.16 |
| **$C_{dia}$** | 1.545<br>-//- | 97821.72<br>42702.72 | 3.79<br>-//- | 2.21<br>-//- | $6.1\times10^{-5}$<br>$14\times10^{-5}$ | 2147.627<br>1414.440<br>***1860-2239*** | 0.959<br>0.956<br>***0.85-0.97*** | 173905.28<br>75915.95 |
| **Si** | 2.351<br>-//- | 64286.16<br>26921.28 | 4.00<br>-//- | 2.48<br>-//- | $2.2\times10^{-5}$<br>$5.3\times10^{-5}$ | 850.185<br>549.058<br>***638-645*** | 0.996<br>0.994<br>***1.0*** | 114286.52<br>47860.05 |

В нижних строках столбцов Θ(1) и γ(1) представлены экспериментальные значения для Θ и γ при $T$ = 0 K и $P$ = 0 из обзора [6]. Легко видеть, что согласие рассчитанных значений с экспериментальными вполне хорошее. Для ковалентных кристаллов алмаза и кремния, как и в [6, 8], лучшее согласие с экспериментальным значением Θ показали расчеты с использованием глубины потенциала (12) $D$ – для упругой (обратимой) деформации, которая указана в таблице 1 в первой строке.

В таблице 2 представлены результаты расчетов активационных параметров при $V/V_0$ = 1 (т.е. при $P \cong 0$) для указанных значений температуры. Звездочкой отмечена температура плавления данного кристалла при нулевом давлении [6]. Размерность $D_f$ в $cm^2/s$. Для ковалентных кристаллов алмаза и кремния расчеты проведены для двух значений глубины потенциала (12), указанных в таблице 1: в первой строке – для упругой (обратимой) деформации, а во второй строке – для пластической (необратимой) деформации кристалла. Для каждого кристалла в нижних строках указаны экспериментальные значения величины: – $\lg(D_f)$, из обзора в [6].

Значения термодинамических потенциалов для образования вакансий ($g_v$), самодиффузии ($g_d$) и миграции ($g_m$) определялись по известным формулам:

$$g_v = -k_b T \ln(\phi_v), \quad g_d = -k_b T \ln(x_d), \quad g_m = g_d - g_v . \qquad (18)$$

Из таблицы 2 видно, что согласие рассчитанных значений $\lg(D_f)$ с экспериментальными значениями вполне хорошее. При этом необходимо учесть, что изобарический (при $P \cong 0$) нагрев кристалла до предплавительных температур

(при которых обычно и определяются в эксперименте параметры самодиффузии) приведет к превышению аргументом $V/V_0$ единицы. Например, при температуре плавления $V/V_0$ = 1.05 – для неона, и $V/V_0$ = 1.092 – для аргона [6, с. 167]. Для ковалентных кристаллов алмаза и Si, как и в [5, 6], лучшее согласие с экспериментальным значением – $\lg(D_f)$ показали расчеты, выполненные с использованием глубины потенциала $D_s$ – для пластической (необратимой) деформации, которые указаны во вторых строках табл. 2.

Таблица 2.

| Крис-талл | $T$ K | $-\lg(\phi_v)$ | $g_v$ eV | $-\lg(x_d)$ | $g_d$ eV | $-\lg(D_f)$ | $g_m$ eV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ne** | 1 | 4.959 | 0.001 | 8.634 | 0.002 | 11.961 | 0.001 |
| | 24.57* | 4.138 | 0.034 | 6.940 | 0.020 | 10.267 | 0.014 |
| | 300 | 0.251 | 0.015 | 0.584 [1)] | 0.035 | 3.911 | 0.020 |
| | **Экспериментальное значение при 24.5 K: $-\lg(D_f)$ = 8.9 ÷ 9.2 [6, с. 305]** | | | | | | |
| **Ar** | 1 | 15.718 | 0.003 | 31.760 | 0.006 | 34.840 | 0.003 |
| | 83.78* | 12.139 | 0.110 | 6.628 | 0.202 | 15.218 | 0.092 |
| | 300 | 2.2185 | 0.132 | 3.254 | 0.194 | 6.333 | 0.062 |
| | **Экспериментальное значение при 83.7 K: $-\lg(D_f)$ = 6.3 ÷ 10.1 [6, с. 305]** | | | | | | |
| **Fe** | 300 | 38.083 | 2.267 | 56.842 | 3.383 | 59.579 | 1.117 |
| | 3000 | 4.867 | 2.897 | 5.807 | 3.457 | 8.545 | 0.560 |
| | **Экспериментальное значение для δ-Fe при 1700 K: $-\lg(D_f)$ = 7.1÷8.7 [6, с. 367]** | | | | | | |
| **$C_{dia}$** | 300 | 52.479<br>33.291 | 3.124<br>1.982 | 62.737<br>39.023 | 3.734<br>2.323 | 65.195<br>41.661 | 0.611<br>0.341 |
| | 3000 | 14.550<br>6.748 | 8.661<br>4.016 | 16.056<br>6.761 | 9.557<br>4.024 | 18.513<br>9.400 | 0.896<br>0.008 |
| | **Экспериментальное значение при 2200 K: $-\lg(D_f)$ = 11.9 ÷ 19.2 [6, с. 359]** | | | | | | |
| **Si** | 300 | 88.553<br>43.859 | 5.271<br>2.611 | 107.489<br>52.071 | 6.398<br>3.100 | 109.984<br>54.756 | 1.127<br>0.489 |
| | 3000 | 12.701<br>5.693 | 7.560<br>3.389 | 13.818<br>5.474 | 8.225<br>3.259 | 16.313<br>8.159 | 0.665<br>– 0.130 [2)] |
| | **Экспериментальное значение при 1600 K: $-\lg(D_f)$ = 12.1 ÷ 14.7 [6, с. 360]** | | | | | | |

Примечания:

[1)] Согласно локализационному критерию фазового перехода кристалл-жидкость [6, с. 476; 10]: $\lg(x_d(S\text{-}L)) = -2$, поэтому данное состояние соответствует жидкой фазе.

[2)] Отрицательное значение $g_m$ указывает на «вневакансионную» самодиффузию: $x_d > \phi_v$ [6, с. 289; 11], которая наблюдается в «рыхлой» алмазной структуре при высоких температурах.

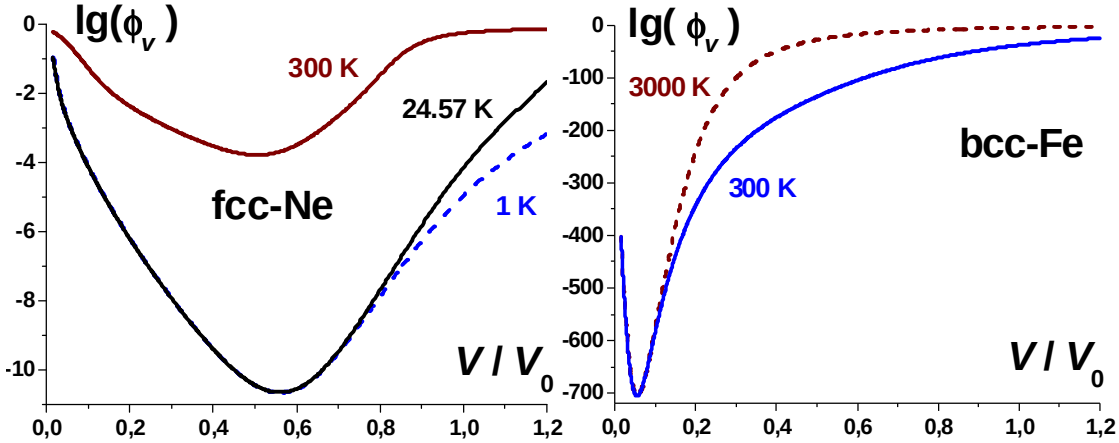



Рис.1. Изотермические зависимости логарифма вероятности образования вакансии от величины $V/V_0$ для ГЦК-Ne (слева) и ОЦК-Fe. Температура указана на рисунке.

Предполагая, что при сжатии параметры межатомного взаимодействия не меняются и кристаллы сохраняют свою структуру, были рассчитаны изотермические зависимости активационных параметров при всестороннем сжатии до $c_o/r_o = 0.1$, т.е. до $V/V_0 = (c_o/r_o)^3 = 0.001$. Расчеты были проведены как при низких ($T << \Theta(1)$), так и при высоких ($T >> \Theta(1)$) температурах. Результаты для Ne и Fe представлены на рис.1 – 3.

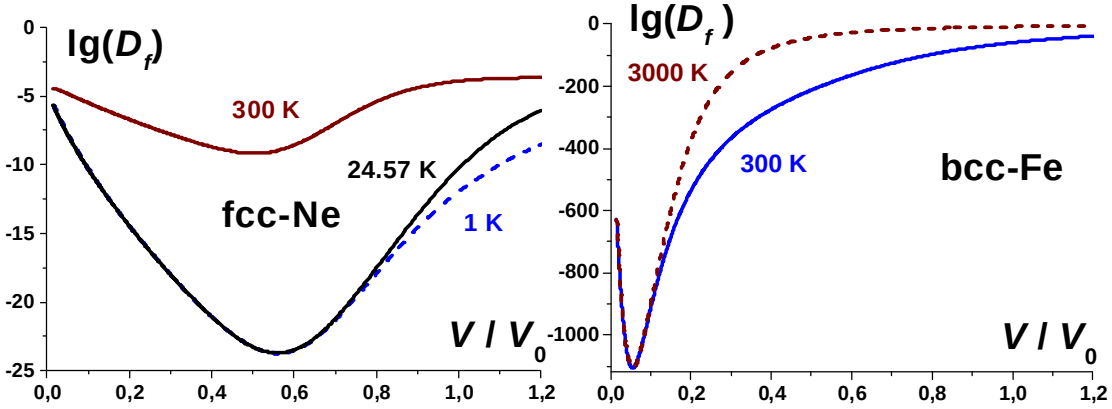



Рис.2. Изотермические зависимости логарифма коэффициента самодиффузии (в $cm^2/s$) от величины $V/V_0$ для ГЦК-Ne (слева) и ОЦК-Fe (справа).

На рис.1 и 2 показаны изотермические зависимости логарифмов функций: $\phi_v$ и $D_f$ в зависимости от степени сжатия $V/V_0$ для ГЦК-Ne (слева) и ОЦК-Fe (справа). Рядом с линией указана температура изотермы. Как видно из рис. 1 и 2 изотермические зависимости функций $\lg(\phi_v)$, $\lg(D_f)$ при определенных значениях $(V/V_0)_{min}$ образуют минимумы, после чего они растут при дальнейшем сжатии. Функции термодинамических потенциалов активационных процессов из (18) при $(V/V_0)_{min}$ образуют максимумы. Аналогичный вид имеют и изотермические зависимости как функций $\lg(\phi_v)$ и $\lg(D_f)$, так и термодинамических потенциалов активационных процессов от величины $V/V_0$ для других кристаллов, но параметры экстремумов, которые представлены в таблице 3, у изученных кристаллов различные.

Таблица 3.

| Крис-талл | $T$ K | $(V/V_0)_{min}$ | $-\lg(\phi_v)_{min}$ | $-\lg(x_d)_{min}$ | $-\lg(D_f)_{min}$ | $(V/V_0)_{max}$ | $D_d(V/V_0)_{max}$ $10^{-3}$ $cm^2/s$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ne** | 1 | 0.5615 | 10.655 | 20.762 | 23.724 | 0.5615 | 1.091 |
| | 24.57* | 0.5595 | 10.647 | 20.744 | 23.706 | | |
| | 300 | 0.5063 | 3.780 | 6.209 | 9.179 | | |
| **Ar** | 1 | 0.3609 | 66.438 | 143.742 | 146.175 | 0.3609 | 3.688 |
| | 83.78* | 0.3594 | 66.350 | 143.546 | 145.979 | | |
| | 300 | 0.3300 | 52.125 | 112.022 | 114.460 | | |
| **Fe** | 300 | 0.0549 | 705.686 | 1104.68 | 1106.41 | 0.0549 | 18.729 |
| | 3000 | 0.0549 | 705.391 | 1104.22 | 1105.94 | | |
| **$C_{dia}$** | 300 | 0.0166<br>0.0254 | 129.860<br>75.986 | 158.839<br>91.884 | 160.901<br>94.182 | 0.0166<br>0.0254 | 8.669<br>5.039 |
| | 3000 | 0.0166<br>0.0254 | 129.860<br>75.967 | 158.839<br>91.861 | 160.901<br>94.159 | | |
| **Si** | 300 | 0.0105<br>0.0164 | 360.093<br>202.184 | 445.603<br>248.861 | 447.588<br>251.099 | 0.0106<br>0.0164 | 10.347<br>5.792 |
| | 3000 | 0.0105<br>0.0154 | 360.093<br>201.283 | 445.602<br>247.739 | 447.588<br>249.977 | | |

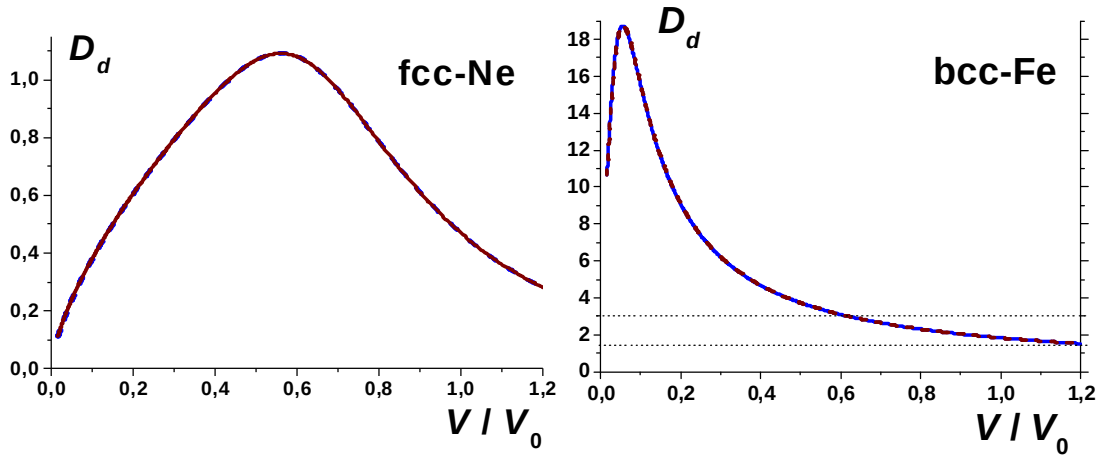



Рис.3. Изотермическая зависимость функции $D_d$ (в $10^{-3}$ cm$^2$/s) из (10) от аргумента $V/V_0$ для ГЦК-Ne (слева) и ОЦК-Fe. В данном масштабе все изотермы сливаются.

На рис.3 показаны зависимости функции $D_d$ от величины $V/V_0$ для ГЦК-Ne и ОЦК-Fe, рассчитанные по формуле (10). Как видно величина $D_d$ не зависит от температуры и в определенной точке $(V/V_0)_{max}$ достигает максимума. Аналогичный вид имеют и изотермические зависимости $D_d(V/V_0)$ для других кристаллов, но параметры экстремумов, которые представлены в табл. 3, у всех веществ различные. Из рис. 3 видно, что при $V/V_0$ = 0.6 ÷ 1.2 величина этого множителя практически постоянна:

$D_d = (1.1 \div 0.3)\times 10^{-3}$ cm$^2$/s – для Ne  и  $D_d = (3 \div 1.4)\times 10^{-3}$ cm$^2$/s – для Fe.

Аналогичное слабое изменение величины $D_d$ при $V/V_0$ = 0.6 ÷ 1.2, и близость ее к значению $D_d(V/V_0 = 1)$ наблюдается и для других кристаллов. Поэтому данный множитель из (10) с большим основанием можно считать константой, чем предэкспоненциальный множитель в зависимости Аррениуса, как на это и указывалось нами ранее в работах [4; 6, с. 375; 10].

**Обсуждение полученных результатов**. Как видно из (16), при $V/V_0$ = 0 величина температуры Дебая достигает максимума. Это обусловлено квантовыми эффектами: при сверхсильном сжатии (т.е. при $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$) растет роль энергии «нулевых колебаний». Поэтому при $P \to \infty$ возрастания характеристической температуры колебаний до бесконечности не происходит.

При $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$ межатомное расстояние становится сравнимым с амплитудой колебаний атомов, что приводит к подбарьерному туннельному переносу атомов по объему кристалла. Усиление туннельной миграции атомов приводит к росту и эффективного числа пустующих узлов решетки. Рост вероятности подбарьерного туннельного активационного процесса при $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$ приводит к усилению активационного процесса в кристалле при сжатии, и к слабой зависимости активационных параметров от температуры (при $T < T_m$), что и видно из рисунков 1 и 2.

Такой же эффект независимости активационных параметров от температуры наблюдается в квантовых кристаллах при $T \cong 0$ K [6, с. 287; 12]. В них самодиффузия обусловлена уже не тепловым возбуждением атомов, а уменьшением при $T \to 0$ K межатомного расстояния и соизмеримостью его с амплитудой «нулевых колебаний» атомов. При этом функция $E_d/k_bT$, определяющая изменение величины $x_d$, имеет вид:

$$\lim_{\frac{\Theta_{eo}}{T} \to \infty} \left( \frac{E_d}{k_b T} \right) = \frac{2E_{d1}}{k_b \Theta_{eo}} = \frac{3m\, c_o{}^2 k_b \Theta_{eo}}{(2\pi \hbar\, k_p{}^{1/3})^2} \quad .$$

Аналогичное сближение амплитуды тепловых колебаний атомов с величиной межатомного расстояния происходит и при сжатии кристалла в области $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$. Но здесь усиление квантовых эффектов происходит не за счет изобарического уменьшения температуры в отношении $\Theta_{eo} / T$, а за счет сильного роста величины $\Theta_{eo}$ при изотермическом сжатии кристалла. Но при барическом туннелировании функция $c_o^2\Theta_{eo}$ при сжатии в области $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$ уменьшается.

Таким образом, если при $V/V_0 > (V/V_0)_{min}$ происходит подавление активационных процессов при изотермическом сжатии и их усиление при изохорическом нагреве, то при $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$ происходит усиление активационных процессов в кристалле при изотермическом сжатии, и к независимости активационных параметров от температуры. Этот эффект «барической туннельной самодиффузии» обусловлен квантовыми эффектами: при сверхсильном сжатии межатомное расстояние становится сравнимым с амплитудой колебаний атомов, что приводит к подбарьерному туннелированию атома в соседние ячейки.

Доказательством того, что эффект «барической туннельной самодиффузии» обусловлен именно квантовыми свойствами вещества, является также и корреляция относительного объема в точке минимума коэффициента самодиффузии $(V/V_0)_{min}$ со значением $k_b A_w(1)/D$, которая изображена на рис. 4. Значение $(V/V_0)_{min}$ взято из табл. 3, а величина $k_b A_w(1)/D$ для указанных веществ – из табл. 1. Для ковалентных кристаллов алмаза и кремния были взяты величины соответствующие глубине потенциала $D_s$, которые указаны во вторых строках табл. 1 и 3. Такой выбор обусловлен тем, что именно с использованием параметра $D_s$ расчеты величины $\lg(D_f)$ показали лучшее согласие с экспериментальными значениями при $V/V_0 = 1$ (см. табл. 2 – вторые строки).

Как видно из рис.4, данная корреляции с коэффициентом достоверности $R_{cor} = 0.99465$ описывается полиномом второй степени вида:

$$(V/V_0)_{min} = 0.65422 + 0.10902 \times X + 0.00446 \times X^2, \text{ где } X = \ln[k_b A_w(1)/D]. \qquad (19)$$

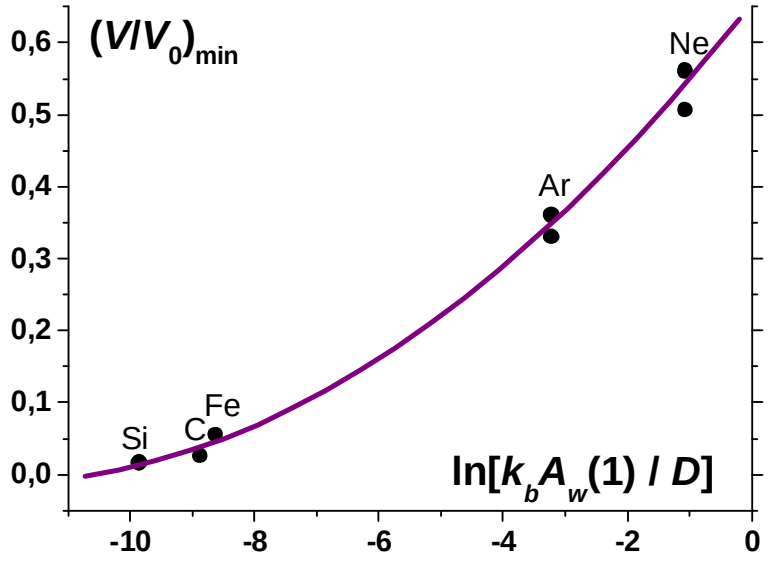



Рис.4. Корреляция относительного объема в точке минимума коэффициента самодиффузии $(V/V_0)_{min}$ из табл. 3 и величины $k_b A_w(1)/D$ из табл. 1. Линия представляет собой аппроксимацию данной корреляции квадратичным полиномом (19).

Заметим, что величина $k_bA_w(1)/D$ характеризует роль квантовых эффектов в кристалле при $V/V_0 = 1$ (т.е. при $P \cong 0$), ибо она равна отношению энергии «нулевых колебаний» при $V/V_0 = 1$ к глубине межатомного потенциала. Величина $k_bA_w(1)/D$ связана с параметром де Бура ($\Lambda_B$), определяющим роль «нулевых колебаний» [6, с. 40]:

$$\frac{k_bA_w(1)}{D} = 2\zeta_p(1)\Lambda_B{}^2,$$

где, в соответствии с (15), имеем:

$$\Lambda_B = \frac{\lambda_B}{r_o} = \frac{\hbar}{r_o(2mD)^{1/2}} = \left(\frac{k_bK_R}{2D}\right)^{1/2}, \qquad \zeta_p = \frac{A_w}{K_R} = \frac{5k_nab(b+1)}{144(b-a)}\left(\frac{r_o}{c}\right)^{b+2},$$

здесь $\lambda_B = \hbar / (2m\,D)^{1/2}$ – длина волны де Бройля для атома.

В заключение отметим, что на возможность перехода вещества в состояние квантовой жидкости при сверхсильном сжатии кристалла в области низких температур было указано также и в работе [13], где использовался другой метод расчета.

**Выводы:**

1. Разработана методика для изучения активационных параметров (образования вакансий и самодиффузии) в кристалле при любых (в том числе и экстремально высоких) *P-T*-параметрах, полностью учитывающая квантовые эффекты.
2. Рассчитаны изотермические зависимости активационных параметров от величины сжатия элементарных кристаллов неона, аргона, железа, алмаза и кремния. Расчеты проведены как при низких ($T << \Theta(1)$), так и при высоких ($T >> \Theta(1)$) температурах. Показано, что в области: $1 > V/V_0 > (V/V_0)_{min}$ происходит подавление активационных процессов при изотермическом сжатии, и их усиление при изохорическом нагреве кристалла, что согласуется с общепринятым мнением об этих процессах.
3. Расчеты показали, что при $(V/V_0)_{min}$ вероятность образования вакансии и коэффициент самодиффузии достигают минимума, а при дальнейшем изотермическом сжатии происходит усиление активационных процессов, причем здесь активационные параметры слабо зависят от температуры. Оценены значения $(V/V_0)_{min}$ и величины активационных параметров при $(V/V_0)_{min}$ для указанных веществ.
4. Показано, что это такое поведение активационных параметров при $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$ обусловлено квантовыми эффектами: подбарьерному туннельному переносу атомов по объему кристалла. Обнаружена корреляция величины $(V/V_0)_{min}$ с параметром де Бура.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН (проект № П-2.1) и РФФИ (гранты № 12–08–96500-р-юг-а и № 10–02–00085-а).

**Литература:**

1. *Лазарус Д., Нахтриб Н.* Влияние высокого давления на диффузию / Твердые тела под высоким давлением / Под ред. В. Пол и Д. Варшауэр. М.: Мир, 1966. 524 с.
2. *Стишов С.М.* Квантовые эффекты в конденсированных телах при высоких давлениях // Успехи Физических Наук. 2001. Т. 171. № 3. С. 229 – 305.
3. *Валикова И.В., Назаров А.В.* Моделирование характеристик, определяющих влияние давления на самодиффузию в ОЦК- и ГЦК-металлах // Физика Металлов и Металловедение. 2010. Т. 109. № 3. С. 237 – 244.

4. *Магомедов М.Н.* О термодинамических параметрах самодиффузии // Физика Металлов и Металловедение. 1995. Т. 80. № 4. С. 36 – 50.
5. *Магомедов М.Н.* О параметрах самодиффузии в кристаллах подгруппы углерода // Физика и Техника Полупроводников. 2010. Т. 44. № 3. С. 289 – 301.
6. *Магомедов М.Н.* Изучение межатомного взаимодействия, образования вакансий и самодиффузии в кристаллах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 544 с.
7. *Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б.* Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСИС, 2005. 362 с.
8. *Магомедов М.Н.* О термодинамически согласованном вычислении температуры Дебая из теплофизических данных // Теплофизика Высоких Температур. 2002. Т. 40. № 4. С. 586 – 589.
9. *Фунтиков А.И.* Фазовая диаграмма и кривая плавления железа, полученные по данным статических и ударно-волновых измерений // Теплофизика Высоких Температур. 2003. Т. 41. № 6. С. 954 – 969.
10. *Магомедов М.Н.* Об изменении коэффициента самодиффузии при фазовом переходе кристалл-жидкость // Письма в Журнал Технической Физики. 2009. Т. 35. № 14. С. 67 – 75.
11. *Магомедов М.Н.* О параметрах образования вакансий в кристаллах подгруппы углерода // Физика и Техника Полупроводников. 2008. Т. 42. № 10. С. 1153 – 1164.
12. *Магомедов М.Н.* О роли вакансий в процессе самодиффузии при низких температурах // Письма в Журнал Технической Физики. 2002. Т. 28. № 10. С. 64–71.
13. *Марченко В.И.* О фазах сжатого вещества // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2008. Т. 87. № 4. С. 245 – 246.

# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Магомедов У.Б.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39-а; e-mail: m_umahan@rambler.ru*

Представлена формула для получения значения теплопроводности обычной воды в интервалах температур 273–473 К и давлений 0,1–1000 МПа. Погрешность расчётных значений теплопроводности воды по формуле для давлений до 100 МПа составляет менее 1 %, а для давлений до 1000 МПа составляет 2,3 %. С помощью формулы получены значения теплопроводности воды до 1000 МПа.
Представлена обобщённая формула для получения значения теплопроводности водных растворов неорганических веществ в интервалах температур 273–473 К и давлений 0,1–100 МПа и концентрации 0–25 %(масс.). По обобщённой формуле получены значения водных растворов.солей. Погрешность расчётных значений формулы оценена 1,5 %.

Горячие подземные воды находят широкое применение в теплоснабжении жилых и не жилых помещений. Вода является лучшим средством для транспортировки тепла, т.к. обладает высокой теплоемкостью и является достаточно дешевым в экономическом плане. При одинаковых температурах и давлениях теплопроводность минерализованной воды ниже, чем у чистой воды в интервалах температур 273–473 К и давлений 0,1–100 МПа.

Для оптимизации технологических процессов по использовании тепла геотермальных вод необходимо иметь достоверные данные о теплофизических свойствах минерализованных вод.

Т. к. водные растворы неорганических веществ состоят из слабо поляризованных диполей молекул воды и гидратированных ионов растворённых неорганических веществ, то необходимо хорошо знать теплофизические свойства воды и, конечно, знать какое влияние оказывают различные растворённые вещества на теплопроводность раствора при различных параметрах состояния.

Представлена формула (1) для расчёта значений теплопроводности воды

$$\lambda(P,T) = \lambda(P_s,T)\left(1.700\ \frac{\rho(P,T)}{\rho(P_sT)} - 0.7000\ \right), \qquad (1)$$

где $\lambda(P,T)$, $\rho(P,T)$ – соответственно теплопроводность и плотность воды при давлении $P$, МПа и температуре $T$, К; и $\lambda(P_s,T)$, $\rho(P_s,T)$ – соответственно теплопроводность и плотность воды вблизи линии насыщения при $P_S$ и $T$.

Важное преимущество такого метода обобщения – то, что плотность исследуемого вещества находится с более высокой точностью и представляет собой менее трудоёмкую задачу, чем определение коэффициента теплопроводности.

Полученные по формуле (1) значения теплопроводности воды приведены в табл.1. Они согласуются с Международными данными [1] в пределах 0.6 %, а с рекомендуемыми справочными данными [2] – 1 %. Необходимые данные теплопроводности в состоянии насыщения воды использованы из [1], а данные плотности воды – [2].

Т. к. имеются справочные данные плотности воды { и данные плотности воды на линии насыщения [2] – (табл.2), то мы по представленной формуле (1) получили значения теплопроводности воды в интервалах температур 273–473 К и

давлений 0,1–1000 МПа – (табл.3).

Таблица 1. Значения теплопроводности воды по формуле (1)

| $T$ К | Теплопроводность воды $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м · К), при $P$, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_s$ | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| 273.15 | 565 | 574 | 584 | 592 | 601 | 609 |
| 293.15 | 601 | 610 | 619 | 627 | 636 | 644 |
| 313.15 | 631 | 640 | 649 | 658 | 666 | 674 |
| 333.15 | 652 | 662 | 670 | 679 | 688 | 696 |
| 353.15 | 669 | 679 | 689 | 698 | 707 | 716 |
| 373.15 | 679 | 690 | 701 | 710 | 720 | 729 |
| 393.15 | 685 | 697 | 708 | 719 | 729 | 738 |
| 413.15 | 686 | 699 | 711 | 723 | 734 | 744 |
| 433.15 | 682 | 696 | 710 | 722 | 735 | 745 |
| 453.15 | 674 | 690 | 705 | 718 | 731 | 743 |
| 473.15 | 663 | 680 | 697 | 713 | 727 | 740 |

Таблица 2. Плотность воды на линии насыщения [2]

| $t$, $^0$C | $T$, К | $P$, МПа | $\rho'$, кг/м$^3$ | $\rho''$, кг/м$^3$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 273.15 | 0.0006 | 999.800 | 0.005 |
| 20 | 293.15 | 0.0023 | 998.203 | 0.017 |
| 40 | 313.15 | 0.0074 | 992.162 | 0.051 |
| 60 | 333.15 | 0.0200 | 983.187 | 0.138 |
| 80 | 353.15 | 0.0474 | 971.817 | 0.294 |
| 100 | 373.15 | 0.1014 | 958.313 | 0.598 |
| 120 | 393.15 | 0.1987 | 943.129 | 1.122 |
| 140 | 413.15 | 0.3615 | 926.097 | 1.966 |
| 160 | 433.15 | 0.6181 | 907.441 | 3.259 |
| 180 | 453.15 | 1.0026 | 886.997 | 5.158 |
| 200 | 473.15 | 1.5547 | 864.678 | 7.860 |
| 220 | 493.15 | 2.3193 | 840.195 | 11.614 |
| 240 | 513.15 | 3.3467 | 813.339 | 16.748 |
| 260 | 533.15 | 4.6921 | 783.638 | 23.708 |
| 280 | 553.15 | 6.4165 | 750.300 | 33.167 |
| 300 | 573.15 | 8.5877 | 712.149 | 46.168 |
| 320 | 593.15 | 11.284 | 667.067 | 64.599 |
| 340 | 613.15 | 14.600 | 610.687 | 92.764 |
| 360 | 633.15 | 18.667 | 527.844 | 143.968 |
| 365 | 638.15 | 19.822 | 496.130 | 166.500 |
| 370 | 643.15 | 21.043 | 450.045 | 202.143 |
| **373.95** | **647.1** | **22.064** | **321.956** | **321.958** |

Оценочная погрешность расчётных данных табл.3 при температурах 273–473 К и давлениях 0.1–1000 МПа составляет 2.3 %, а при температурах 273–473 К и давлениях 0,1–100 МПа составляет менее 1 %.

Значения теплопроводности воды полученные по формуле (1) сопоставлялись с существующими экспериментальными данными различных авторов по теплопроводности воды при высоких давлениях и температурах, которые показали согласованность:

- со справочными данными Александрова А.А и Григорьева Б.А. [2] в интервалах температур 273–473 К и давлениях 0,1–100 МПа – 1 %;
- с данными Бриджмена [4] в интервалах температур 298–348 К и давлений
- 0.1–1200 МПа – 1,7 %;

- с данными Диетца и других [5] в интервалах температур 303–523 К и давлений 0.1–350 МПа – 1,7 %;
- с данными Григорьева Б. А.[7] и других в интервалах температур 273–493 К и давлений 0,1–210 МПа – 1,7 %;
- с рекомендуемыми справочными данными Магомедова У.Б.и Амирханова Х.И [8] в интервалах температур 298–473К и давлений 100–400 МПа – 2.3 %;
- с данными Лавсона и других [9] в интервалах температур 303–403 К и давлений 0,1–780 МПа – 2,4 %.

Таблица 3. Значения теплопроводности воды по формуле (1)

| $P$ | Теплопроводность воды, $\lambda\times10^3$, Вт/(м · К) при $T$, К | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| МПа | 273 | 298 | 323 | 348 | 373 | 398 | 423 | 448 | 473 |
| $P$s | 564 | 610 | 643 | 664 | 679 | 686 | 685 | 675 | 663 |
| 20 | 573 | 619 | 653 | 674 | 690 | 698 | 699 | 690 | 680 |
| 40 | 583 | 628 | 662 | 684 | 701 | 709 | 712 | 705 | 697 |
| 60 | 591 | 636 | 670 | 693 | 710 | 720 | 723 | 718 | 713 |
| 80 | 600 | 645 | 678 | 702 | 720 | 731 | 735 | 732 | 727 |
| 100 | 608 | 653 | 687 | 710 | 729 | 741 | 746 | 744 | 740 |
| 120 | 615 | 660 | 695 | 718 | 738 | 750 | 756 | 754 | 753 |
| 140 | 623 | 668 | 702 | 726 | 746 | 759 | 766 | 765 | 764 |
| 160 | 629 | 675 | 709 | 734 | 754 | 768 | 775 | 775 | 776 |
| 180 | 636 | 681 | 716 | 741 | 762 | 777 | 784 | 785 | 786 |
| 200 | 643 | 688 | 723 | 748 | 770 | 785 | 793 | 795 | 796 |
| 220 | 649 | 694 | 730 | 755 | 777 | 793 | 802 | 803 | 806 |
| 240 | 655 | 700 | 736 | 762 | 784 | 800 | 810 | 812 | 815 |
| 260 | 660 | 706 | 743 | 769 | 791 | 807 | 818 | 820 | 824 |
| 280 | 666 | 712 | 749 | 775 | 798 | 814 | 825 | 828 | 833 |
| 300 | 671 | 718 | 755 | 781 | 804 | 821 | 832 | 836 | 841 |
| 320 | 676 | 723 | 761 | 788 | 811 | 828 | 840 | 843 | 848 |
| 340 | 681 | 728 | 767 | 794 | 817 | 835 | 846 | 851 | 856 |
| 360 | 686 | 734 | 772 | 800 | 823 | 841 | 853 | 858 | 864 |
| 380 | 692 | 739 | 778 | 806 | 829 | 847 | 860 | 865 | 871 |
| 400 | 697 | 744 | 782 | 811 | 835 | 853 | 867 | 873 | 879 |
| 450 | 706 | 757 | 796 | 824 | 850 | 868 | 883 | 889 | 896 |
| 500 | 717 | 768 | 808 | 837 | 863 | 883 | 897 | 905 | 912 |
| 550 | 727 | 779 | 819 | 849 | 876 | 897 | 912 | 920 | 928 |
| 600 | 736 | 791 | 831 | 861 | 888 | 909 | 925 | 935 | 944 |
| 650 | 744 | 801 | 841 | 872 | 900 | 922 | 938 | 947 | 957 |
| 700 | | 812 | 852 | 882 | 911 | 934 | 950 | 961 | 971 |
| 750 | | 822 | 862 | 892 | 922 | 945 | 962 | 972 | 983 |
| 800 | | 832 | 871 | 903 | 934 | 957 | 974 | 985 | 996 |
| 850 | | 841 | 881 | 912 | 944 | 968 | 986 | 996 | 1007 |
| 900 | | 850 | 891 | 922 | 953 | 978 | 997 | 1008 | 1019 |
| 950 | | | 900 | 931 | 962 | 988 | 1008 | 1018 | 1031 |
| 1000 | | | 908 | 940 | 970 | 996 | 1016 | 1029 | 1041 |

Примечания: Представленные в таблице 3 расчётные данные теплопроводности воды по формуле (1) согласуются с рекомендуемыми Международными данными [1] в пределах 1 %, с экспериментальными данными [4 – 7] – 1.7 %, а с данными [8 –10] – 2.3 %.

Надо отметить, что авторы, проводившие исследования теплопроводности воды выше давления 200 МПа, оценивают погрешности своих данных от 1,7 до 2,3 %.

Вывод. Оценочная погрешность расчётных значений теплопроводности воды по формуле (1) в интервалах температур 273–473 К и давлений 0,1–1000 МПа составляет менее 2,3 %, а в интервалах температур 273–473 К и давлений 0.1–100 МПа – 1 %.

На основе анализа данных плотности [2, 3], теплопроводности чистой воды [1] и экспериментальных данных теплопроводности водных растворов солей различных авторов [11–18] представлена новая обобщенная формула, с помощью которой можно получить значения теплопроводности минерализованных вод в интервалах температур 273–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.)

$$\lambda(P,T,c)=\lambda(P_s,T,c)\left[\left(1{,}700\,\frac{\rho(P,T)}{\rho(P_s,T)}-0{,}7000\right)-2{,}500\times10^{-8}\,PTc\right], \qquad (2)$$

а для чистой воды ($c$ = 0) формула (2) примет вид

$$\lambda(P,T)=\lambda(P_s,T)\left[\left(1{,}700\,\frac{\rho(P,T)}{\rho(P_s,T)}-0{,}7000\right)\right], \qquad (1)$$

где $\lambda(P,T,c)$ – коэффициент теплопроводности раствора при давлении $P$ (МПа), температуре $T$ (К) и концентрации $c$ % (масс.); $\lambda(P_s,T,c)$ – теплопроводность раствора вблизи линии насыщения при $T$ и $c$; $\lambda(P,T)$, $\rho(P,T)$ – теплопроводность и плотность воды при $P$ и $T$; $\lambda(P_s,T)$, $\rho(P_s,T)$ – теплопроводность и плотность воды вблизи линии насыщения при $P_s$ и $T$; $P_s$ – давление на линии насыщения; $c_i$ – концентрация $i$-й системы.

Отклонение рассчитанных значений теплопроводности водно-солевых систем по формуле (1) от экспериментальных данных различных авторов [4–20] составило менее 1.5 %. Отметим, что многие экспериментальные исследования теплопроводности водно-солевых систем проведены при давлениях ниже 40 МПа.

По формуле (1) получены значения теплопроводности различных водно-солевых систем в интервалах температур 293–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.), частности в работах – [19–20]. Здесь же приведены значения теплопроводности для одной системы – $H_2O$+ NaCl.

Таблица 4. Теплопроводность системы H2O+NaCl по формуле (2)

| $T$, К | $\lambda\cdot10^3$, Вт/(м · К) системы NaCl + $H_2O$ при $P$, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $Ps$ | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | 2.5 % (масс.) | | | | | |
| 293.15 | 597 | 606 | 614 | 623 | 630 | 638 |
| 313.15 | 628 | 637 | 645 | 654 | 661 | 669 |
| 333.15 | 649 | 658 | 666 | 676 | 683 | 692 |
| 353.15 | 666 | 675 | 685 | 694 | 703 | 711 |
| 373.15 | 676 | 686 | 696 | 706 | 715 | 724 |
| 393.15 | 682 | 693 | 705 | 714 | 724 | 733 |
| 413.15 | 683 | 695 | 708 | 719 | 729 | 739 |
| 433.15 | 679 | 693 | 706 | 718 | 729 | 740 |
| 453.15 | 671 | 686 | 701 | 714 | 726 | 738 |
| 473.15 | 660 | 677 | 694 | 708 | 721 | 735 |
| | 5 % (масс.) | | | | | |
| 293.15 | 595 | 603 | 612 | 619 | 627 | 634 |
| 313.15 | 626 | 634 | 643 | 650 | 659 | 665 |
| 33315 | 646 | 654 | 663 | 671 | 680 | 687 |
| 353.15 | 663 | 672 | 682 | 690 | 698 | 706 |
| 373.15 | 673 | 682 | 693 | 702 | 711 | 719 |
| 393.15 | 679 | 690 | 701 | 710 | 720 | 728 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 413.15 | 680 | 692 | 704 | 714 | 725 | 734 |
| 433.15 | 676 | 690 | 702 | 713 | 725 | 735 |
| 453.15 | 668 | 683 | 697 | 709 | 721 | 732 |
| 473.15 | 657 | 673 | 689 | 704 | 716 | 729 |
| | | | 10 % (масс.) | | | |
| 293.15 | 590 | 598 | 605 | 614 | 620 | 627 |
| 313.15 | 620 | 627 | 636 | 643 | 650 | 657 |
| 333.15 | 641 | 649 | 656 | 664 | 672 | 678 |
| 353.15 | 657 | 665 | 673 | 681 | 689 | 696 |
| 373.15 | 667 | 676 | 684 | 693 | 701 | 709 |
| 393.15 | 673 | 682 | 693 | 701 | 710 | 717 |
| 413.15 | 674 | 685 | 696 | 706 | 714 | 723 |
| 433.15 | 670 | 682 | 694 | 704 | 714 | 724 |
| 453.15 | 662 | 675 | 689 | 700 | 710 | 721 |
| 473.15 | 652 | 667 | 682 | 695 | 707 | 719 |
| | | | 15 % (масс.) | | | |
| 293.15 | 584 | 591 | 599 | 606 | 612 | 618 |
| 313.15 | 614 | 621 | 628 | 635 | 642 | 648 |
| 333.15 | 635 | 641 | 649 | 657 | 662 | 669 |
| 353.15 | 651 | 658 | 666 | 673 | 680 | 686 |
| 373.15 | 661 | 668 | 677 | 684 | 691 | 699 |
| 393.15 | 667 | 675 | 684 | 692 | 700 | 708 |
| 413.15 | 668 | 677 | 687 | 696 | 704 | 713 |
| 433.15 | 664 | 675 | 685 | 695 | 704 | 713 |
| 453.15 | 656 | 668 | 681 | 691 | 701 | 710 |
| 473.15 | 645 | 659 | 673 | 685 | 697 | 707 |
| | | | 20 % (масс.) | | | |
| 293.15 | 578 | 585 | 592 | 598 | 605 | 610 |
| 313.15 | 608 | 615 | 622 | 628 | 634 | 640 |
| 333.15 | 628 | 635 | 642 | 648 | 654 | 660 |
| 353.15 | 645 | 652 | 660 | 666 | 673 | 679 |
| 373.15 | 654 | 662 | 670 | 677 | 683 | 690 |
| 393.15 | 660 | 669 | 677 | 684 | 692 | 699 |
| 413.15 | 661 | 671 | 680 | 688 | 696 | 703 |
| 433.15 | 657 | 668 | 678 | 687 | 696 | 704 |
| 453.15 | 649 | 661 | 673 | 683 | 692 | 701 |
| 473.15 | 639 | 652 | 666 | 678 | 688 | 698 |
| | | | 25 % (масс.) | | | |
| 293.15 | 571 | 578 | 584 | 590 | 596 | 601 |
| 313.15 | 601 | 607 | 614 | 620 | 625 | 630 |
| 333.15 | 621 | 627 | 634 | 640 | 645 | 650 |
| 353.15 | 637 | 643 | 650 | 657 | 662 | 668 |
| 373.15 | 647 | 654 | 662 | 668 | 674 | 679 |
| 393.15 | 652 | 660 | 668 | 674 | 681 | 687 |
| 413.15 | 653 | 661 | 671 | 678 | 685 | 692 |
| 433.15 | 650 | 660 | 670 | 678 | 686 | 693 |
| 453.15 | 642 | 653 | 664 | 673 | 682 | 690 |
| 473.15 | 632 | 645 | 657 | 668 | 678 | 686 |

**Литература:**

1. *Александров А.А.* Международные таблицы и уравнения для теплопроводности воды. Спр. материал // Теплоэнергетика. 1980. № 4. С.70.
2. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. М.: Издательство МЭИ. 1999. 168 с.
3. *Александров А.А.* Скелетная таблица удельного объема воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1987. № 3. С. 71–77.
4. *Bridgmen P.W.* The Thermal Conductivity of Liquids under Pressure / Proc. Am. Acad. Arts. Sciences. 1923. V. 49. No. 7. P. 141–144.

5. *Dietz F.J., de Groot J.J., and Franck E.U.* The Thermal Conductivity of Water to 250 $^0$C and 350 MPa // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1981. V. 85. No. 11. P. 1005.
6. Теплопроводность обычной и тяжелой воды и водных растворов неэлектролитов / Б.А. Григорьев, Ю. А. Ганиев, Г.А. Сафронов, А.М. Ишханов, Ю.Л. Расторгуев / Госстандарт, ВНИЦ МВ. М.: Изд-во стандартов. 1985. 64 с.
7. *Григорьев Б.А., Григорьев Е.Б., Ишханов А.М.* Теплопроводность воды в зависимости от температуры и плотности при высоких давлениях. Часть 1 // Оборонный комплекс–научно-техническому прогрессу России. 2001. № 3. С. 55–61.
8. *Магомедов У.Б., Амирханов Х.И., Адамов А.П.,*– Деп. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Вода. Теплопроводность воды в диапазоне температур 25–200 $^0$C и давлении 100–400 МПа / Всесоюзный научно-исследовательский центр по материалам и веществам Госстандарта СССР. М.: 1987. 10 с. – Деп. во ВНИИКИ 10.06.87, № 370-кк. 87.
9. *Lawson A.W., Lowell R., and Jain A.L.* Thermal Conductivity of Water at High Pressures // J. Chem. Phys. 1959. V. 30. No. 3. P. 643–647.
10. *Амирханов Х.И., Адамов А.П., Магомедов У.Б.* Экспериментальное исследование теплопроводности воды при температурах 30-200 $^0$C и давлениях 98,2-686.5 МПа // В сб. Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД. М.: Изд-во стандартов. 1984. Вып. 21. С. 35–39.
11. *Lala A. Akhmedova-Azizova*. Thermal Conductivity of Aqueous $Mg(NO_3)_2$, $Ca(NO_3)_2$, and $Ba(NO_3)_2$ Solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2006. 51, No. 2. Pp. 510–517.
12. *I.M. Abdulagatov, N.D. Azizov* Thermal conductivity and viscosity of the aqueous $K_2SO_4$ solutions at temperatures from 298 to 573 K and at pressures up to30 MPa // Int. J. Thermophys. 2005. 26. 593–635.
13. *I.M. Abdulagatov, L.A. Akmedova-Azizova and N.D. Azizov* Thermal Conductivity of Aqueous $Sr(NO_3)_2$ and $LiNO_3$ solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2004. 49. 688–703, American Chemical Society.
14. *L.A. Akmedova-Azizova* Thermal Conductivity and Viscosity of Aqueous $Mg(NO_3)_2$, $Ca(NO_3)_2$ and $Ba(NO_3)_2$ solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2006. 54. 510–517, American Chemical Society.
15. *Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Гафуров Д.С.* Теплопроводность трехкомпонентных водных растворов NaCl и $CaCl_2$ в широкой области параметров состояния // Теплоэнергетика. 1997. №5. С. 61–64.
16. *Эльдаров В.С.* Теплопроводность водных растворов натриевых солей // Журн. физ. химии. 1986. Т. 60. № 3. С. 603 – 605.
17. *Nagasaka Y, Okada H, Suzuki J, and Nagashima A.* Absolute Measurements of the Thermal Conductivity of Aqueous NaCl Solutions at Pressures up to 40 MPa // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1983. 87. P. 859 – 866.
18. *Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Зульфугаров Д.Ш.* Теплопроводность водных растворов электролитов // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 3 – 4. С. 61 – 63.
19. *Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.* Теплопроводность водных растворов солей вблизи линии насыщения // Естественные и технические науки. 2010. № 4(48). С. 29–32..
20. *Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.* Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния // Естественные и технические науки. 2011. № 1(51). С. 23–26.

# ВОПРОСЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аливердиев А.А.[1,2]

*[1] ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

*[2] ФГБУН Институт физики им.Х.Амирханова Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367003, ул. М. Ярагского 94; e-mail: aliverdi@mail.ru*

В нашей недавней работе рассматривалось современное положение энергетики, в том числе в вопросах и перспективах развития термоядерной энергетики [1]. В настоящем докладе приводится переработанный и дополненный обзор, посвященный данной тематике.

Едва ли стоит доказывать, что энергетика является основой жизнеобеспечения современного общества. По статистике энергопотребление на душу населения уже давно (с 60х годов прошлого столетия) составляет более 2 кВт (см. таб. 1 [2]).

Таблица 1. Мировое энергопотребление с середины XIX по начало XXI в

| **Год** | **Население, млрд. чел.** | **Потребляемая энергия, ГВт-год** | **Удельное энергопотребление, кВт/чел.** |
|---|---|---|---|
| 1850 | 1.13 | 680 | 0.60 |
| 1870 | 1.3 | 790 | 0.61 |
| 1890 | 1.49 | 1000 | 0.67 |
| 1910 | 1.7 | 1600 | 0.94 |
| 1930 | 2.02 | 2200 | 1.13 |
| 1950 | 2.51 | 3300 | 1.31 |
| 1970 | 3.62 | 8400 | 2.32 |
| 1990 | 5.32 | 13200 | 2.48 |
| 2000 | 6.22 | 13300 | 2.14 |
| 2001 | 6.29 | 13400 | 2.13 |
| 2002 | 6.37 | 13700 | 2.15 |
| 2003 | 6.45 | 14100 | 2.19 |

Причем распределено это самое энергопотребление крайне неравномерно (см. таб. 2 [3]).

Таблица 2. Удельное энергопотребление по странам на 1999 год

| **Страна** | **Удельное энергопотребление, кВт/чел** |
|---|---|
| Норвегия | 14.2 |
| Канада | 13.7 |
| США | 11.9 |
| Япония | 5.7 |
| Европа (Западная. и Восточная) | 4.7 |
| Бывший СССР | 4.5 |
| Китай | 0.84 |
| Индия | 0.41 |
| Развивающиеся страны | 0.1-1 |
| **Среднее в мире** | **2.1** |

По статистическим данным на 2004 год 4.3 миллиарда людей (2/3 населения планеты) проживало в регионах, где на 20 человек приходилось менее

1 автомобиля, в то время как в развитых странах один автомобиль уже приходился на 2 человека (включая детей) [4]. Если бы каждый человек на Земле начал потреблять энергоресурсы на среднеевропейском уровне, то и средний показатель, и общее энергопотребление выросли бы в разы. Таким образом, продолжающийся рост населения и стремительное развитие технической базы стран третьего мира по-новому ставят задачи выживания человечества.

Если выводы Томаса Роберта Мальтуса [5] были опровергнуты научно-техническим прогрессом и последующей научно-технической революцией, позволившими увеличивать в геометрической прогрессии не только население, но и «средства существования», то сейчас все более отчетливо начали проглядываться как «дно» наших основных источников процветания – нефти, угля и газа, так и невозможность естественной утилизации последствий расширенной жизнедеятельности человечества.

Кроме того, хотим мы этого или не хотим, но выброс $CO_2$ от форсированного сжигания накопленных за миллионы лет органических ископаемых вызывает парниковый эффект. Вместе с тем идет опустынивание земель, эрозия почв, загрязнение обширных территорий и водных ресурсов, etc. Другой проблемой, связанной с нефтью (основным на сегодняшний день источником энергии) является неравномерность распределения ее запасов. Более 60% суммарного объема освоенных месторождений приходится на Ближний Восток – крайне нестабильный в политическом отношении регион. Разработка же новых месторождений (морские шельфы и др.) является очень грязной индустрией. [6]

Что может стать альтернативой нефти? Рассмотрим возобновляемые источники энергии: ветряные, солнечные, приливные, геотермальные, биотопливо и, наконец, гидроэлектростанции. Их первой характерной чертой является низкая мощность на единицу покрываемой площади (см. таб. 3 [4]).

Таблица 3. Возобновляемые источники: мощность на единицу площади

| **Источник** | **Мощность на единицу площади (Вт/м$^2$)** |
|---|---|
| Ветряные | 2-3 |
| Биотопливо | 0.5 |
| Солнечные (на базе фотоэлементов) | 5-20 |
| Приливные | 3-6 |
| ГЭС | 11 |
| Геотермальные | 0.017 |

Для сравнения, большая тепловая электростанция дает 100 кВт/м$^2$. Таким образом, если один квадратный метр, приходящийся на тепловую электростанцию, обеспечивает жизнь десятков современных потребителей, то для полноценного обеспечения энергопотребления одного современного пользователя требуется задействовать тысячи квадратных метров поверхности, занятых фотоэлементами или ветряными «мельницами».

Другим неотъемлемым свойством как солнечных, так и ветряных станций является их нестабильность. Выходная мощность ветряной электростанции пропорциональна кубу скорости ветра, то есть, при уменьшении скорости ветра всего в два раза, выходная мощность падает почти на порядок. Солнечные электростанции также очень сильно зависят от погоды и совсем непригодны в темное время суток, в частности в часы, когда энергопотребление, связанное с освещением, особенно возрастает. Таким образом, если такие альтернативные средства становятся не вспомогательными, а основными энергетическими

источниками, то они автоматически начинают требовать масштабного аккумулирования произведенной энергии. А это, в свою очередь, еще сильнее снижает их эффективность.

Из сказанного выше не следует, что преобразователи солнечной или ветряной энергии бесперспективны. Ветряные мельницы испокон веков использовались и продолжают использоваться как, собственно, в качестве мельниц (автору настоящей статьи самому довелось наблюдать их работу на солевых заводах Сицилии), так и для перекачки воды при осушении земель (Нидерланды), иными словами, для автоматического выполнения рутинной работы, которая так или иначе должна быть выполнена, но может быть без особых проблем отложена и/или распределена на достаточно долгий период времени. Также и солнечные панели могут давать и дают ощутимый вклад в особых условиях. Но они даже в принципе не могут покрыть существенной части современного энергопотребления. Кроме того, не стоит забывать, что создание и утилизация отслуживших свой срок солнечных панелей является довольно грязным и недешевым производством. А шум и вибрация от множественных промышленных ветряных генераторов едва ли сделают их приятным соседством.

Относительно свободные от этих недостатков ГЭС являются наиболее освоенными на сегодняшний день возобновляемыми источниками электроэнергии и дают примерно 6,3% от общего энергопроизводства [2]. Принципиально ГЭС является практически идеальным источником энергии, если не учитывать далеко не всегда благоприятное экологическое воздействие на природу в процессе строительства. Однако постройка таких электростанций требует наличия подходящих рек, которые к настоящему времени уже в значительной мере освоены. Так что едва ли стоит ждать существенного увеличение этого сектора.

Примерно то же самое можно сказать о приливных и геотермальных станциях. Их количество будет увеличено, ими ни в коем случае нельзя пренебрегать, но они и в перспективе не могут обеспечить даже сегодняшний уровень энергопотребления при существенном сокращении доли органических ископаемых.

Относительно биотоплива, здесь, помимо низкой удельной мощности на единицу площади, большим ограничительным фактором является стоимость, по меньшей мере, в расчете на неизбежно затрачиваемые на его производство человеко-часы. Таким образом, биотопливо также хорошо в виде вспомогательного источника, но реально, мы никогда не сможем на этой основе достигнуть сегодняшнего уровня потребления в развитых странах.

Итак, при необходимости отказа от ископаемого топлива и поддержания потребления на сегодняшнем уровне из ныне существующих средств остается лишь атомная энергетика. На какой же срок нам хватит имеющихся ресурсов? Принимая во внимание ожидаемый рост населения и улучшение уровня жизни в развивающихся странах, аналитики дают следующий прогноз: нефть – 40-50 лет, природный газ – 60-70 лет, уголь – 270 лет, уран – 90 лет (при использовании бридерных реакторов (реакторов-размножителей) – 2-3 тыс. лет), возобновляемые – неограниченно, но их однозначно не хватит на поддержание даже современного потребления, термоядерный синтез – много тысячелетий при осуществлении реакции дейтерий-тритий и сотни миллионов лет, если удастся осуществить реакцию дейтерий-дейтерий. Цифры эти в какой-то степени примерные, но, по меньшей мере, они позволяют судить о порядке величин.

Таким образом, из освоенных технологий наиболее перспективными являются бридерные реакторы, но дальнейшее развитие видится только за

термоядерным синтезом. Вкратце рассмотрим его преимущества и недостатки. Преимущества: (1) практическая неисчерпаемость топлива, (2) низкая радиационная опасность, (3) стоимость энергии, соизмеримая с существующей (когда все заработает). Недостатки: (1) дороговизна старта (нельзя создать маленький работающий прототип), (2) радиационная опасность (хоть и относительно небольшая).

В отличие от ядерных реакторов деления, в ядерных реакторах синтеза не содержится ни значительного количества радиоактивного топлива, ни радиоактивных продуктов реакции. Даже в случае неожиданного разрушения реактора радиоактивное загрязнение среды будет незначительным. Некоторую опасность несет тритий, но в виду ничтожности его количества, опасность эта невысока. Вместе с тем в процессе работы реактора в результате интенсивной нейтронной бомбардировки радиоактивными становятся элементы конструкции. Тем не менее, согласно оцененным периодам полураспада образующихся радиоактивных изотопов, потребуется консервация частей отработанного реактора не более чем на тридцать лет, после чего реактор может быть демонтирован и утилизирован полностью.

Академик Лев Андреевич Арцимович (1909–1973) когда-то сказал: «Термоядерная энергия будет получена тогда, когда она станет необходима человечеству». Возможно, время уже настало?

Основные подходы к управляемому термоядерному синтезу на сегодняшний день следующие: (1) инерционное удержание, где всесторонним динамическим обжатием мишень доводится до сверхвысоких плотностей и температур (впервые идея была предложена академиками Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным в 1964), и (2) магнитное удержание, где относительно разряженная высокотемпературная плазма достаточно долгое время удерживается в магнитной ловушке. Первый токамак (аббревиатура «ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками» была предложена И.Н. Головиным и Н.А. Явлинским в начале 50х) был построен в нашей стране в 1955 году. Первые успехи по удержанию горячей плазмы также принадлежат отечественным ученым [7-9].

К сожалению, достижение условий термоядерного синтеза с достаточным коэффициентом усиления (представляющим собой отношение полученной и подводимой в систему энергий) оказалось существенно сложнее, чем это представлялось при первичных оценках. Так, из-за сильного влияния гидродинамических неустойчивостей, расхождение первоначальных предположений с действительностью оказалось более чем на два порядка. Тем не менее, последние достижения на пути как магнитного, так и инерционного удержания дают повод для оптимизма.

Прогресс в инерционном удержании связывается сегодня с несколькими проектами с мощными лазерными системами в качестве драйвера, обеспечивающего надлежащее сжатие и разогрев вещества. Остановимся на трех наиболее впечатляющих на сегодняшний день проектах. Это, во-первых, *NIF* (*National Ignition Facility*) [10] – достроенная в апреле 2009 года в лаборатории Лоуренс Ливермор (Калифорния, США) система, в которой 192 лазерных источника позволят достичь 1.8 Мегаджоуля. Чтобы существенно уменьшить нестабильности, сжатие предполагается производить опосредованно через вторичное рентгеновское излучение, возбужденное мощными лазерными пучками в так называемом хольрауме – полом цилиндре из металла с большим атомным номером. В 2011 на *NIF* были осуществлены испытания с криогенной мишенью, содержащей термоядерное топливо.[11] Аналогичная, но еще более мощная

система *LMJ* (*Laser MegaJoule*) строится в Бордо (Франция) [12,13].

Неотъемлемой чертой данных технологий является их двойное назначение. С одной стороны это дает дополнительное финансирование от военных ведомств, но с другой – создает закрытость и в целом не способствует развитию как науки, так и мирных технологий. Поэтому в отличие от магнитного удержания в физике инерционного удержания всегда было меньше международного сотрудничества. В этой связи большой интерес представляет проект *HiPER*, [14] в который, помимо стран Евросоюза, вовлечена и Россия. В проекте предполагается осуществить альтернативный сценарий синтеза с прямым сжатием (180 кДж при 10 нс), но реализацией, так называемого, быстрого поджига, проводимого коротким и сверхмощным лазерным импульсом (100 кДж при 500 пс) [15].

Продолжаются исследования и в использовании других (не лазерных) драйверов, в частности пучков тяжелых ионов [16] и *Z*-пинчей (сжатие разряда под действием собственного магнитного поля). [17,18]

Прогресс на пути магнитного удержания плазмы сегодня в первую очередь ассоциируется с аббревиатурой ИТЭР или *ITER*, что расшифровывается как *International Thermonuclear Experimental Reactor* (Международный Термоядерный Экспериментальный Реактор), и, с другой стороны, в переводе с латыни означает «путь». Проект зародился на рубеже 80х-90х годов XX столетия, когда силами российских, американских, японских и европейских учёных и инженеров была проведена успешная концептуальная проработка. Потом к проекту присоединились Канада, Южная Корея, Индия и Китай (сделав, таким образом, *ITER* уникальным проектом с вовлечением более половины человечества). 28 июня 2005 г. был подписан протокол, определивший место строительства на юге Франции в исследовательском центре Кадараш, с 2007 года строительство было начато. [4]

Исходя из скейлинговых законов (законов подобия в зависимости от размера), полученных на других токамаках и их экстраполяции на будущий *ITER*, предполагается достичь параметров коэффициента усиления (5-10) и времени удержания плазмы (сотни-тысячи секунд), достаточных для того, чтобы говорить о термоядерном реакторе. Возможно также создание условий, при которых температура горячей плазмы будет поддерживаться только за счет термоядерной реакции. Следующей ступенью к УТС (в случае успеха ИТЭР) станет проект *DEMO* – первая в мире настоящая термоядерная электростанция.

Проектом *ITER* не исчерпывается современное положение в исследованиях по осуществлению управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием. Продолжаются также исследования на стеллаторах (основных конкурентах токамака - тороидальных ловушках, где плазма удерживается магнитными полями сложной конфигурации, подавляющими тороидальный дрейф) и других магнитных ловушках. Весьма интересные результаты прогнозируются и уже получены на сферических токамаках (с малым отношением максимального и минимального радиусов тороида) [19-21].

Важным обстоятельством представляется то, что *ITER* является реально международным проектом и аккумулирует в себе все последние достижения науки и техники (наноструктурированные материалы, ВТСП, и т.д.), могущие внести свою лепту в его осуществление.

Сегодня мир стал куда более открытым и «маленьким», чем это было двадцать лет назад. Исследования, проводимые действительно международными командами, давно являются не исключением, а, скорее, правилом. Вхождение

ученых из самых разных институтов в крупные Международные проекты (*HiPER*, *ITER*, и др.) через сотрудничество с ведущими, в том числе, иностранными группами, давно стало нормой. Автору довелось работать в нескольких международных командах, и это дало большой жизненный и научный опыт. Какая деятельность возможна? Во-первых, командировки в ведущие центры и экспериментальная работа на лучшем оборудовании. Во-вторых, численные расчеты в рамках совместных программ, для чего уже освоены и успешно опробованы пакеты программного обеспечения *MULTI* [22-26], *MPQEOS* [27,28] и др. [29-32]. В-третьих, выполнение ряда экспериментальных вспомогательных исследований. Для всего этого нужна лишь добрая воля руководства. Вот она необходима. Чтобы темы не закрывались, не оказывались где-то на задворках, а, по меньшей мере, рассматривались на общих основаниях с финансированием в зависимости от полученных фундаментальных результатов.

Автор выражает глубокую признательность проф. Д.Д. Батани, а также сотрудникам группы лазерной плазмы физического факультета Миланского университета (Бикокка, Милан, Италия) и факультета инструментальной науки Джадавпурского университета (Джадавпур, Калькутта, Индия) за плодотворную совместную работу. Автор также благодарен ESF (SILMI, 3964), индийской программе научных визитов UGC и РФФИ (12-01-96500) за частичную поддержку его исследований.

**Литература:**

1. *Аливердиев А.* Проблемы и перспективы термоядерной энергетики // Мониторинг – наука и технологии, 3(4) 2010, С. 67-75.
2. *Орлов Ю.Н.* Состояние и тенденции развития энергетики в России и мире в XXI веке, в книге «Ядерный синтез с инерционным удержанием» / под ред. Шаркова Б.Ю., М.: Физматлит, 2005. С. 220-262.
3. *Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б.* Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза, Учеб. пособие. СПб, изд-во Политехнического ун-та, 2006. 348 с.
4. *Ongena J.* Preparations for ITER at JET// CD Proc. of 7th Kudowa Summer School “Fusion and Technology”, Kudowa Zdroj, 20-24 June 2008.
5. Malthus T.R. Principles of political economy considered with a view to their practical application, L., 1820.
6. *MacKay David J.C.* Sustainable Energy — without the hot air, Version 3.5.2. November 3, 2008, www.withouthotair.com.
7. *Тамм И.Е.* Теория магнитного термоядерного реактора, ч. 1, в сборнике: Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций / под ред. Леонтовича М.А., т. 1, М.: Издательство Академии Наук СССР, 1958
8. *Сахаров А.Д.* Теория магнитного термоядерного реактора, ч. 2, в сборнике: Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций / под ред. Леонтовича М.А., т. 1, М.: Издательство Академии Наук СССР, 1958.
9. *Смирнов В.П.* Исследования по термоядерному синтезу // Вестник Российской Академии Наук, том 73 № 4, 2003, С. 305-310.
10. *Hand E.* Laser facility flickers into life // Nature, 457, 2009, p. 517.
11. *Glenzer, S.H., Spears, B.K., Edwards, M.J., Alger, E.T., Berger, R.L., Bleuel, D.L., Bradley, D.K., (...), Moses, E.I.* First implosion experiments with cryogenic thermonuclear fuel on the national ignition facility // Plasma Physics and Controlled Fusion, 54 (4), 2012, 045013
12. *Tikhonchuk V.T.* Alternative schemes for inertial fusion energy // CD Proc. of 9th International Kudowa School “Towards Fusion Energy” Kudowa Zdroj, Poland,

June 8-12, 2010.

13. *Baggio J., Jacquet H.-P., Schneider P., Francois J.* Calculation of prompt doses induced by fusion experiments in Laser MegaJoule facility // Fusion Engineering and Design, 86, 2011, 2762–2765
14. *Batani D., Koenig M., Baton S ., Perez F., Gizzi L.A., Koester P., Labate L., Honrubia J., Antonelli L., Morace A., Volpe L., Santos J., Schurtz G., Hulin S., Ribeyre X., Fourment C., Nicolai P., Vauzour B., Gremillet L., Nazarov W., Pasley J., Richetta M., Lancaster K., Spindloe Ch., Tolley M., Neely D., Kozlova M., Nejdl J., Rus B., Wolowski J., Badziak J. and Dorchies F.* The HiPER project for inertial confinement fusion and some experimental results on advanced ignition schemes // Plasma Phys. Control. Fusion 53, 2011, 124041.
15. Summary Discussion // CD Proc. of 9th International Kudowa School “Towards Fusion Energy” Kudowa Zdroj, Poland, June 8-12, 2010.
16. *Фортов В.Е., Хоффманн Д.Х., Шарков Б.Ю.* Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества, УФН, № 2, 2008, С. 113-139.
17. *Велихов Е.П., Власов В.П., Волков В.Г., Колбасов Б.Н., Муравьев Е.В., Недосеев С.Л., Рудаков Л.И., Рыбаков Л.А., Рютов В.Д., Цыганков Е.А., Чернуха В.В.* Предварительный анализ схем импульсного термоядерного реактора на РЭП // Атомная энергия, 45, 1978, с.9-18.
18. *Rochau G.E., Morrow Ch.W., Pankuch P.J.* A concept for containing inertial fusion energy pulses in a z-pinch driven power plant // Fusion science and technology, 43, 2003, pp. 447-455.
19. *Peng Y.-K.M., Strickler D.J.* Features of spherical torus plasmas // Nucl. Fusion, 26, 1986. pp. 769–777.
20. *Sykes A.* Overview of recent spherical tokamak results // Plasma Phys. Control. Fusion, 43, 2001, pp. A124–A139.
21. *Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др.* Сферический токамак Глобус-М // ЖТФ, 69, 1999, С. 58-62.
22. *Ramis R., Schmattz R., and Meyer-ter-Vehn J.* MULTI – a computer code for one-dimension radiation hydrodynamics // Comput. Phys. Commun., 49, 1988, p. 475-505.
23. *Ramis R., and Meyer-ter-Vehn J.* MULTI2D – a computer code for two-dimension radiation hydrodynamics // Rep. MPQ174, Max-Plank-Institute für Quatenoptik, Garching, Germany, 1992.
24. *Ramis R.* 3D Lagrangian Hydrodynamic Simulations // Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany GSI Annual Report 2006, High Energy Density Physics with Intense Ion and Laser Beams.
25. *Ramis R, Meyer-ter-Vehn J, and Ramirez J,* MULTI2D-a computer code for two-dimensional radiation hydrodynamics // Computer Physics Communications, 180 (6), 2009, pp. 977-994
26. *Ramis R., Eidmann K., Meyer-ter-Vehn J., and Hüller S.,* MULTI-fs - a Computer Code for Laser-Plasma Interaction in the Femtosecond Regime // Computer Physics Communications, 2012 (*Article in Press*).
27. *Kemp A., and Meyer-ter-Vehn J* An equation of state code for hot dense matter, based on the QEOS description // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 415, 1998, p. 674-676.
28. *More R., Warren K.H., Young D.A., Zimmerman G.B.* A new quotidian equation of state (QEOS) for hot dense matter // Phys. Fluids, 31, 1988, p. 3059-3078.
29. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R., Vinci T., Benuzzi-Mounaix A., Koenig M., and Malka V.,* Coronal hydrodynamics of laser-produced plasmas // Phys. Rev. E,

78, 2008, 046404.

30. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R. and Vinci T.* Porous carbon EOS: numerical analysis // Radiation Effects and Defects in Solids, 165, 2010, p. 566-572.
31. *Aliverdiev A., Amirova A., Batani D., Dezulian R., Khan M., and Pant H.C.*, Some Features of Intense Laser Shock Propagation in Multi-Layers Structured Target // CD Proc. of PLASMA-2011, International Conference on Research and Applications of Plasmas Warsaw, Poland, September 12 – 16, 2011, P-4.1
32. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R. and Vinci T.* Carbon equation of state at high pressure: the role of the radiative transport in the impedance mismatch diagnostics // Nukleonika 2011, 56(2), pp. 165-169.

# ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Ахмедов Г.Я.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: ganapi@mail.ru*

Образование твердых отложений при эксплуатации геотермальных скважин представляет одну из самых сложных технических проблем. По этой проблеме в 1988 году в Исландии проводился семинар, на котором были выделены основные направления исследований. Как показала практика, в состав твердых отложений в скважинах и теплооборудовании геотермальных систем чаще всего входят минералы: карбонат кальция, аморфный кремнезем, оксиды и сульфиды металлов. На большей части территории России, стран СНГ и ряда зарубежных стран отложения из растворов геотермальных вод представлены, главным образом, твердой фазой карбоната кальция.

Методы предотвращения отложения солей в практике использования геотермальных вод, заимствованные в традиционной теплоэнергетике, не всегда эффективны. Это связано с тем, что геотермальные воды многообразны по своей природе и сильно отличаются от пресных вод. Скорости солеотложения в геотермальных системах могут быть в десятки и сотни раз больше, чем при применении пресных вод. Поэтому поиск эффективных и экономичных методов защиты геотермальных систем от солеотложения является одной из важнейших проблем в геотермальной энергетике.

Образование твердой фазы карбоната кальция в геотермальных системах обусловлено нарушением карбонатно-кальциевого равновесия в растворе геотермальной воды при выходе его на поверхность Земли.

В наземном оборудовании не всегда удается поддерживать давление, при котором отсутствует выделение твердой фазы карбоната кальция. С другой стороны, поддержание высокого давления в оборудовании геотермальных систем снижает дебит скважины и усиливает коррозионные явления вследствие увеличения кислотности раствора воды.

При использовании среднепотенциальных вод с температурой около 100 $^{o}$C, как правило, используют двухконтурную схему, в первом контуре которой проходит геотермальная вода при параметрах давления и температуры воды, не нарушающих карбонатно-кальциевое равновесие. В Дагестане такие схемы в настоящее время используют на месторождениях Кизляр и Махачкала-Тернаир. В зимний период при большом дебите давление в устье скважин снижается ниже равновесного значения (0,35 – 0,4 МПа), что приводит к отложениям карбоната кальция не только в теплообменниках (скв. 27Т, Махачкала-Тернаир), но также и в самой скважине (3Т, Кизляр) [1]. При температуре геотермальной воды более 100 $^{o}$C равновесное значение давления становится значительным. На площади Каясула (Ставропольский край) для воды скважины 3Т сохранить углекислотное равновесие при оптимальном давлении $CO_2$ можно только при низких дебитах скважин. Так, при температуре $151^{o}C$ и дебите скважины 3000 м$^3$/сут давление на устье скважины составляет 2,8 МПа, что совершенно недостаточно для поддержания углекислотного равновесия. Чтобы избежать выпадения солей, дебит скважины при этих же условиях должен поддерживаться на уровне 2200 – 2300 м$^3$/сут [2].

В начале 80-х годов на Тарумовской площади (Дагестан) получены мощные притоки минеральных вод с температурой до 200 $^{o}$C. В 1985 году с целью получения данных о продуктивности и физико-геологических свойствах термального водоносного горизонта на скважине № 6 проводились выпуски термальной воды. Вскрытие трубопроводов, по которым проходила вода при температуре 171 $^{o}$C в течение 10 дней, показало, что при давлении менее 10 МПа в них образовались отложения $CaCO_3$ различной толщины.

Аналогичная ситуация сложилась также и на высокотемпературных скважинах месторождений Дикси Вилли в штате Невада в США. В Вайотапу (Новая Зеландия) зарастание скважин карбонатом кальция помешало использовать это месторождение. Такие же месторождения известны и в Калифорнии, Исландии (Хайдеренди), Мексике (Сьерро-Приетто), Коста-Рика (Миравеллас), Венгрии, на Камчатке (Больше-Банные источники), Грузии (месторождение Охурей) и т.д. [3-9].

На скважинах Дикси Вилли (США), Миравеллас (Коста-Рика), Сьерро-Приетто (Мексика), Рейкъянес (Исландия) был опробован метод выбуривания отложений карбоната кальция при работающей скважине. При этом было установлено, что экономически оправдано удаление только рыхлых отложений. В Венгрии испытан способ предотвращения твердых отложений карбоната кальция, заключающийся в периодическом пропускании через канал скважин растворов кислот. Данный способ имел отрицательные последствия из-за коррозии оборудования и больших расходов на его реализацию.

Многообещающим является предотвращение отложений, в том числе и карбоната кальция, путем использования различных ингибиторов. На сегодняшний день опробован ряд химических соединений – полифосфаты, органические кислоты (полиакриловая, полималеиновая, этилидендифосфоновая и т.д.) для предотвращения отложения солей как на нефтяных, так и на геотермальных скважинах. Особенность ингибиторов в том, что при малых концентрациях их в воде (3-15 мг/л) уже наблюдается процесс замедления процессов кристаллизации.

Несмотря на подтвержденную многолетней практикой эффективность различных ингибиторов применение их нередко приводит к отрицательным последствиям. Положительные результаты, полученные при испытании определенного ингибитора для конкретного объекта, не могут быть перенесены на установки, использующие воду другого химического состава и при других гидродинамических и температурных режимах.

Область применения фосфонатов ограничена как свойствами самой воды, так и теплотехническими характеристиками оборудования. При этом эффективное действие фосфонатов возможно только при отсутствии кипения. В настоящее время существует ряд проблем, ограничивающих применение ингибиторов отложений для защиты геотермальных систем от солеотложения, связанных, главным образом, с высокой температурой и высоким содержанием различных солей в растворах геотермальных вод. Необходимо учесть, что до сих пор отсутствует техника выбора нужного ингибитора для геотермальной воды конкретного состава. Для определения эффективности применения того или иного ингибитора отложений в геотермальной воде определённой скважины необходимо проводить специальные исследования. Некоторые ингибиторы могут даже образовывать псевдоотложения, которые более вредны, чем обычные [10]. Отсутствие регламентированного расхода ингибиторов отложений, во многих случаях, может привести к дополнительным вредным последствиям. Так,

например, в результате ввода в геотермальную воду скважин 3Т и 5Т /г. Кизляр, 1978г./ ГМФН в трубопроводах прекратились отложения карбоната кальция, однако появилась усиленная коррозия.

Немаловажное значение имеет еще, неизученный на сегодняшний день, вопрос влияния ингибированной воды на процессы массообмена в пласте при закачке ее обратно в пласт.

Проведенный автором комплекс исследований, практика наблюдений на скважинах Дагестана, а также исследования различных авторов на сегодняшний день позволяют сделать следующие выводы [11].

1. На основе проведенных исследований установлено, что при нарушении карбонатно-кальциевого равновесия в растворе геотермальной воды образуются частицы твердой фазы $CaCO_3$, основная масса которых представляют собой кристаллы размером менее 3 мкм. Использование их в качестве центров кристаллизации недостаточно для стабилизации воды в течение 15÷18 минут. Ввод извне в нестабильную геотермальную воду затравочных кристаллов в качестве центров кристаллизации существенно интенсифицирует процесс стабилизации. Получены экспериментальные данные по кинетике кристаллизации $CaCO_3$ из растворов геотермальных вод г. Кизляра и Махачкалы при использовании затравочных кристаллов. Показано, что скорость снижения концентрации ионов $Ca^{+2}$ в воде существенно зависит от активной поверхности кристаллизации и подчиняется параболическому закону относительно общего пересыщения.

2. Разработаны номограммы по оптимизации технологических режимов стабилизационной обработки геотермальных вод, сходных по составу с исследованными. Использование результатов настоящего исследования для других геотермальных теплоносителей с существенно отличным химическим составом возможно согласно разработанной методике оценки кинетических процессов.

3. Установлено, что твердые отложения $CaCO_3$ из растворов исследованных вод представлены в виде модификаций арагонит или кальцит. При этом кальцит формируется, преимущественно, при низких пересыщениях и высоких температурах, а арагонит - при высоких пересыщениях и низких температурах. Данный вывод подтверждается проведенными исследованиями и многолетними наблюдениями за отложениями на разных скважинах, а также соответствует научным данным по свойствам кальцита и арагонита.

4. Показано, что формирование отложений $CaCO_3$ на поверхности геотермального оборудования существенным образом зависит от концентрации, дисперсности частиц взвеси, а также от гидродинамики потока раствора. При этом, чем выше концентрация взвеси и меньше число Рейнольдса, тем ниже плотность отложений. Получено эмпирическое уравнение, описывающее формирование отложений $CaCO_3$ на поверхности оборудования как за счет осаждения частиц взвеси, так и за счет осаждения молекул (ионов) $CaCO_3$.

5. Установлено, что стабилизационную обработку геотермальной воды в кристаллизаторах, дегазаторах, расширителях и отстойниках целесообразно проводить при рециркуляции в них кристаллической затравки. Оптимальное время контакта затравки с геотермальной водой составляет 3-5 минут. На основе проведенных исследований разработаны номограммы и новые конструкции установок по стабилизационной обработке геотермальных вод.

6. Разработаны новые устройства и способы по умягчению геотермальной воды путем замены части парциального давления $CO_2$ на другой газ или пар.

Перед дегазацией карбонатно-кальциевое равновесие в воде не должно нарушаться. При этом, чем больше составляющая перепада давления от равновесного до конечного значения, тем выше масса образующейся в воде взвеси.

7. Одним из перспективных вариантов эксплуатации геотермальных систем представляется эксплуатация их в режиме равновесных параметров давления и температуры геотермальной воды, при которых отсутствует отложение $CaCO_3$ и, в то же время, коррозия оборудования будет минимальной. Для решения этой задачи разработаны номограммы подбора режимных параметров воды для геотермальных устройств. Разработанные номограммы можно использовать и для установки внутрискважинных теплообменников (ВСТ) типа «труба в трубе» в геотермальной энергетике. Отбирая тепло внутри скважины с помощью ВСТ при давлениях, больших, чем равновесное, можно эксплуатировать как скважину, так и наземное оборудование в режиме без солеотложения.

8. Кристаллизация $CaCO_3$ на теплообменной поверхности в инкубационный период и его адгезия существенным образом зависят от температуры поверхности. Учет температуры стенок теплообмена позволяет предотвратить отложение путем регулирования парциального давления $CO_2$ внутри теплообменника. На основе исследований разработана методика расчета температуры стенок теплообмена, при которой отсутствуют отложения $CaCO_3$. Исследования показали, что разработанные устройства по охлаждению поверхности оборудования или обогащения пристенного слоя геотермальной воды углекислым газом обеспечивают безнакипный режим работы геотермальных систем.

9. Установлено, что очистку оборудования от отложений $CaCO_3$ целесообразно проводить геотермальной водой, проходящей в данном оборудовании при повышенной концентрации $CO_2$. Согласно исследованиям по растворению ранее образовавшихся отложений $CaCO_3$ разработана методика, при которой очищаемое оборудование подключается последовательно к эксплуатируемому оборудованию при более низкой температуре геотермальной воды.

10. Разработаны и исследованы новые способы неразрушающего контроля солеотложения, основанные на определении электрического сопротивления раствора геотермальной воды и отложений $CaCO_3$ на внутренних поверхностях оборудования, а также на измерении градиента температуры на исследуемом объекте. Использование разработанных автором номограмм эксплуатации теплообменников в режиме без солеотложения и чувствительных датчиков солеотложения разработанной конструкции позволяют внедрить автоматизированные системы управления тепловыми процессами в геотермальной энергетике. Внедрение такой системы на одной скважине со средним дебитом 1000 $м^3$/сут и температурой воды 100÷104 $^oC$ позволяет сэкономить около 300000 руб. в год.

11. Установлено, что очистку отработанных геотермальных вод от грубодисперсной твердой фазы перед закачкой обратно в водоносный горизонт технологически целесообразно проводить либо в радиальных отстойниках, либо в гидроциклонах разработанной конструкции, а очистку ее от взвешенных частиц $CaCO_3$ эффективно производить в фильтре разработанной конструкции и далее растворением их при увеличении кислотности закачиваемой воды под действием $CO_2$. Получено уравнение по расчету времени растворения взвешенных частиц

$CaCO_3$ при нагнетании в водоносный горизонт.

**Литература:**

1. *Ахмедов Г.Я.* К вопросу об использовании внутрискважинных теплообменников в геотермальной энергетике//Промышленная энергетика. 2011. № 9. С. 13-17.
2. *Магомедов К.М., Данюшевский В.С., Алиев Р.М.* Геотермальная скважина. М.: Недра, 1982. С. 114.
3. *Дворов И.М.* Геотермальная энергетика. М.: Наука. 1976. 190 с.
4. *Берман Э.* Геотермальная энергия. М.: Мир, 1978.- 416 с.
5. *Свейнбьорн Бьорнссон* Развитие геотермальной энергетики и исследования в Исландии. Orkugardur, Grensasvegur 9, 108 Reykjavik Arnarhvall, 150 Reykjavik, ISBN 978-9979-880-31-8, Iceland.Печать: Гудьон О, 2006
6. *Mercado S., Bermejo F., Hurtado R., Terrazas B., Hernandez L.* Scale incidence on production pipes of Cerro Prieto geothermal wells// Geothermics, 1989, v. 18, № $'/_2$, pp. 225-232.
7. *Vaca L., Alvarado A., Corrales R.* Calcite deposition at Miravalles geothermal field Costa Rico// Geothermics, 1989, v. 18, № $'/_2$, pp. 305-312.
8. *Абдуллаев А.Н., Беламерзаев Н.М.* Расчет оптимального режима дегазации геотермальной воды Ставропольской ГеоТЭС //Исследование геотермальных месторождений Прикаспийского региона. Сб. науч. трудов. Ин-т проблем геотермии Дагестанского Филиала АН СССР, 1985, вып. 5.
9. *Беляев Е.И.* Стабилизация геотермальных вод повышенной минерализации: Дис. канд. техн. наук.- Ставрополь, 1989.-209 с.
10. *Vetter O.J., Kandarpa V.* Handling of scale in geothermal operations.- Int. Conf. Geothermal Energy, Florence, May, 1982.- Grandfield.- 1982. Vol.1. - P. 355 – 372.
11. *Ахмедов Г.Я.* Защита геотермальных систем от карбонатных отложений. М.: Новый мир, 2012.- 330 с.

# ВЯЗКОСТЬ ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ

Алиев М.М., Магомедов У.Б.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru*

На основе анализа данных плотности чистой воды и экспериментальных данных динамической вязкости водных растворов солей различных авторов представлена новая обобщенная формула, с помощью которой можно получить значения вязкости водных растворов солей в интервалах температур 333–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.) – при наличии данных вязкости вблизи линии насыщения.

Вязкость минерализованных вод изучена недостаточно при высоких давлениях. Крайне ограничен материал о динамической вязкости водно-солевых систем при давлениях выше 40 МПа. Отсутствует справочный материал о динамической вязкости водно-солевых систем при давлениях 40–100 МПа.

На основе анализа данных плотности [1, 3], вязкости [2] чистой воды и экспериментальных данных о динамической вязкости водных растворов солей различных авторов [4–14] представлена новая обобщенная формула, с помощью которой можно получить значения вязкости (мкПа · с) водных растворов солей в интервалах температур 333–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 масс. % – при наличии данных вязкости вблизи линии насыщения. Формула имеет вид

$$\eta(P,T,c)=\eta(P_s,T,c)\left[\left(1{,}700\frac{\rho(P,T)}{\rho(P_s,T)}-0{,}7000\right)-2{,}500\times10^{-8}PT\sum_{i=1}c_i\right]+1{,}600\times10^{-4}\frac{PT}{P_1T_1}, \qquad (1)$$

а для чистой воды ($c$ = 0) формула (1) примет вид

$$\eta(P,T)=\eta(P_s,T)\left(1{,}700\frac{\rho(P,T)}{\rho(P_s,T)}-0{,}7000\right)+1{,}600\times10^{-4}\frac{PT}{P_1T_1}, \qquad (2)$$

где $\eta(P,T,c)$ – коэффициент динамической вязкости раствора (мкПа · с) при давлении $P$ (МПа), температуре $T$ (К) и концентрации $c$ % (масс.); $\eta(P_s,T,c)$ – вязкость раствора вблизи линии насыщения при $P$s, $T$ и $c$; $\rho(P,T)$ – плотность чистой воды при $P$ и $T$; $\rho(P_s,T)$ – плотность воды вблизи линии насыщения при $P$s, $T$; $\eta(P,T)$ – коэффициент динамической вязкости воды при $P$ и $T$; $\eta(P_s,T)$ – вязкость воды вблизи линии насыщения при $P$s,$T$; $P_1$= 1 МПа; $T_1$ = 1 К.

По обобщенной формуле (1) получены значения динамической вязкости различных водно-солевых систем в интервалах температур 333–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 % (масс.). Отклонение рассчитанных значений вязкости водно-солевых систем по формуле (1) от экспериментальных данных авторов [4–13] составило менее 1,5 % для интервалов температур 333–473 К, давлений 0,1–40 МПа и концентраций 0–25 % (масс.). Отметим, что экспериментальные исследования вязкости водно-солевых систем проведены при давлениях ниже 40 МПа.

По представленной новой формуле (2) получены значения динамической вязкости воды в интервалах температур 348–473 К, давлений 0,1–400 МПа, которые согласуются со стандартными справочными данными [2] в интервалах температур 348–473 К, давлений $P_s$–300 МПа в пределах 1,5 %, а при температурах 348–473 К и давлениях 0,1–100 МПа – в пределах 1 %.

Значения динамической вязкости воды, полученные по формуле (2), представлены в табл. 1.

Таблица 1. Рассчитанные по формуле (2) значения динамической вязкости (мкПа · с) воды при высоких температурах и давлениях

| *P*, МПа | *T*, К | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 333,15 | 348,15 | 373,15 | 398,15 | 423,15 | 448,15 | 473,15 |
| $P_s$ | 465,0 | 377,9 | 281,8 | 221,0 | 182,5 | 156,1 | 134,3 |
| 20 | 473,1 | 384,7 | 287,5 | 226,6 | 187,6 | 161,0 | 139,4 |
| 40 | 480,1 | 391,4 | 293,2 | 231,0 | 192,3 | 165,9 | 144,3 |
| 60 | 487,7 | 397,4 | 298,4 | 235,9 | 196,8 | 170,4 | 148,9 |
| 80 | 495,3 | 403,8 | 303,5 | 240,5 | 201,2 | 174,9 | 153,3 |
| 100 | 501,0 | 409,6 | 308,6 | 245,1 | 205,5 | 178,9 | 157,5 |
| 120 | | 415,6 | 313,2 | 249,4 | 209,6 | 183,1 | 161,5 |
| 140 | | 421,2 | 318,1 | 253,5 | 213,5 | 186,9 | 165,4 |
| 160 | | 426,5 | 322,7 | 257,5 | 217,4 | 190,7 | 169,2 |
| 180 | | 431,7 | 326,9 | 261,7 | 221,3 | 194,4 | 172,7 |
| 200 | | 437,0 | 331,2 | 265,3 | 224,8 | 197,9 | 176,4 |
| 220 | | 442,0 | 335,5 | 269,3 | 228,4 | 201,6 | 180,0 |
| 240 | | 447,2 | 339,8 | 273,0 | 231,9 | 205,0 | 183,4 |
| 260 | | 452,1 | 343,8 | 276,7 | 235,5 | 208,3 | 186,6 |
| 280 | | 456,6 | 347,8 | 280,1 | 238,9 | 211,6 | 189,9 |
| 300 | | 461,5 | 351,8 | 283,6 | 242,2 | 214,8 | 193,0 |
| 320 | | 466,4 | 355,8 | 287,4 | 245,4 | 217,9 | 196,1 |
| 340 | | 470,9 | 359,3 | 290,7 | 248,4 | 221,1 | 199,1 |
| 360 | | 475,3 | 363,0 | 293,8 | 251,8 | 224,4 | 202,3 |
| 380 | | 479,8 | 366,8 | 297,1 | 254,9 | 227,2 | 205,1 |
| 400 | | 484,1 | 370,5 | 300,4 | 258,0 | 230,5 | 208,2 |

Примечание. Расчетные значения динамической вязкости чистой воды по формуле (2) согласуются с промышленным стандартом 1999 г. [1] и рекомендуемыми справочными данными [2] в интервалах температур 348–473 К и давлений 0,1–100 МПа в пределах 1 %, а в интервалах температур 348–473 К и давлений 100–300 МПа в пределах 1,5 %.

Таблица 2. Расчётные по формуле (1) значения динамической вязкости (мкПа· с) системы $H_2O$ + $Na_2SO_4$ при высоких температурах, давлениях и концентрациях

| *T*, К | *P*, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_s$ | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| | *c* = 1,5 масс. % | | | | | |
| 348,2 | 395,0 | 402,8 | 410,2 | 416,9 | 423,8 | 430,8 |
| 373,8 | 292,0 | 297,9 | 303,7 | 308,7 | 314,0 | 319,3 |
| 398,0 | 229,5 | 234,9 | 239,8 | 244,5 | 249,3 | 254,0 |
| 422,6 | 190,4 | 195,6 | 200,6 | 204,9 | 209,5 | 213,7 |
| 447,6 | 160,9 | 165,7 | 170,5 | 175,1 | 179,6 | 183,5 |
| 470,7 | 140,9 | 145,6 | 149,7 | 155,8 | 160,4 | 164,6 |
| | *c* = 5 масс. % | | | | | |
| 347,2 | 443,4 | 450,9 | 458,0 | 464,4 | 471,7 | 477,8 |
| 372,0 | 329,0 | 335,1 | 341,3 | 346,7 | 352,2 | 357,7 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 395,6 | 259,9 | 265,6 | 270,7 | 275,9 | 280,9 | 285,8 |
| 424,7 | 205,4 | 210,7 | 215,7 | 220,4 | 225,6 | 229,4 |
| 446,2 | 176,9 | 182,1 | 187,2 | 192,0 | 196,7 | 200,2 |
| 470,2 | 153,9 | 159,3 | 164,6 | 170,9 | 174,0 | 178,4 |
| | $c$ = 10 масс. % | | | | | |
| 348,4 | 523,2 | 531,1 | 539,1 | 546,4 | 553,8 | 560,2 |
| 372,4 | 391,6 | 398,3 | 404,5 | 410,9 | 417,1 | 423,0 |
| 398,7 | 302,4 | 308,5 | 314,0 | 319,5 | 324,7 | 330,0 |
| 421,4 | 250,7 | 256,6 | 262,2 | 267,3 | 272,4 | 277,0 |
| 447,2 | 209,5 | 215,2 | 220,8 | 225,7 | 230,9 | 235,3 |
| 471,3 | 181,9 | 187,9 | 193,4 | 198,8 | 203,8 | 208,4 |
| | $c$ = 15 масс. % | | | | | |
| 348,7 | 629,2 | 637,9 | 647,1 | 654,5 | 663,2 | 670,0 |
| 372,8 | 466,7 | 474,0 | 481,2 | 487,0 | 494,4 | 500,7 |
| 395,4 | 369,7 | 376,5 | 382,6 | 388,6 | 394,4 | 400,1 |
| 421,3 | 296,5 | 302,9 | 309,0 | 314,2 | 319,7 | 324,9 |
| 447,8 | 246,1 | 252,3 | 257,9 | 263,7 | 269,3 | 273,7 |
| 473,9 | 210,1 | 216,3 | 222,6 | 228,0 | 233,4 | 238,3 |
| | $c$ = 20 масс. % | | | | | |
| 347,9 | 789,2 | 799,8 | 809,6 | 818,5 | 827,5 | 835,8 |
| 374,5 | 565,3 | 573,3 | 581,8 | 588,7 | 595,5 | 602,4 |
| 397,2 | 446,4 | 453,9 | 460,5 | 467,2 | 473,4 | 479,6 |
| 472,3 | 256,9 | 263,9 | 270,9 | 277,1 | 282,8 | 288,1 |
| | $c$ = 26 масс. % | | | | | |
| 348,6 | 1010,0 | 1022,0 | 1034,0 | 1044,0 | 1055,0 | 1064,0 |
| 375,2 | 725,8 | 735,4 | 745,3 | 753,4 | 761,1 | 769,5 |
| 399,4 | 564,4 | 573,6 | 581,6 | 588,0 | 595,5 | 602,4 |
| 423,8 | 457,5 | 465,8 | 474,0 | 481,0 | 487,7 | 494,1 |
| 447,6 | 385,7 | 393,8 | 401,7 | 408,1 | 415,7 | 421,1 |
| 473,9 | 325,9 | 334,3 | 342,4 | 349,3 | 355,8 | 362,2 |

Примечание. Расчетные значения динамической вязкости системы $H_2O+Na_2SO_4$ по формуле (1) табл. 2 согласуются с экспериментальными данными [11, 12] в пределах 1,3 %. В 2009 г. по этой системы были представлены значения теплопроводности [14], которые согласовались с экспериментальными данными [11, 12] в пределах 1,3 % при давлениях до 40 МПа.

Таблица 3. Рассчитанные по формуле (1) значения динамической вязкости системы $H_2O+LiCl$ при высоких температурах, давлениях и концентрациях. $\eta$, мкПа · с

| $T$, К | $P$, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_s$ | 10 | 30 | 60 | 80 | 100 |
| | $c$ = 5 масс. % | | | | | |
| 348,15 | 454 | 461 | 469 | 476 | 483 | 489 |
| 420,25 | 264 | 270 | 275 | 280 | 285 | 290 |
| 470,42 | 166 | 172 | 177 | 182 | 187 | 192 |
| | $c$ = 10 масс. % | | | | | |
| 399,72 | 326 | 333 | 339 | 344 | 350 | 355 |
| 452,54 | 226 | 232 | 238 | 244 | 249 | 254 |
| | $c$ = 20 масс. % | | | | | |
| 348,15 | 842 | 854 | 864 | 873 | 883 | 891 |
| 397,20 | 514 | 522 | 530 | 537 | 544 | 551 |
| 447,18 | 363 | 371 | 379 | 386 | 392 | 398 |
| 471,50 | 317 | 326 | 335 | 342 | 348 | 354 |

Примечание. Расчётные значения динамической вязкости по формуле (1) табл.3 согласуются с экспериментальными данными [13] в пределах 1,5 %.

**Литература:**

1. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Государственной Службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. М.: Издательство МЭИ. 1999. 168 с.
2. *ВНИЦ МВ.* Свойства материалов и веществ. Вода и водяной пар. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во МЭИ. 1999. Вып. 1
3. *Скелетная таблица* удельного объема и энтальпии воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1987. № 3. С.71–77.
4. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of Electrolyte Solutions at Aqueous at High Temperatures and High Pressures. Viscosity B-coefficient. Sodium Iodide // Journal of Chemical & Engineering Data. 2006. 51, No. 5. Pp. 1645–1659.
5. *Abdulagatov I.M., Azizov N.D.* Viscosity of aqueous calcium chloride solutions at high temperatures and high pressures // Fluid Phase Equilibria. 2006. 240.204–219.
6. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of aqueous $Ni(NO_3)_2$ solutions at temperatures from (297 to 475) K and at pressures up to 30 MPa and concentration between (0.050 and 2.246) mol $kg^{-1}$ // Journal of Chemical Thermodynamics. 2006. 38. 179–189.
7. *Azizov N.D.* Bulk Properties of the Aqueous Solutions of Barium Chloride // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003. 76, No. 2. Pp. 450–455.
8. *Abdulagatov I.M., Azizov N.D.* Viscosity of aqueous LiI solutions at 293–523 K and 0.1–40 MPa // Thermochim. Asta. 2005. 439. 8–20.
9. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of the aqueous $Ca(NO_3)_2$ solutions at temperatures 298 to 573 K and at pressures up to 40 MPa // J. Chem. Eng. Data. 2004. 49. 1444–1450.
10. *Akmedova-Azizova L.A.* Thermal Conductivity and Viscosity of Aqueous $Mg(NO_3)_2$, $Ca(NO_3)_2$ and $Ba(NO_3)_2$ solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2006. 54. 510–517, American Chemical Society.
11. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of aqueous $Na_2SO_4$ solutions at temperatures from (298 to 573) K and at pressures up to 40 MPa // Fluid Phase Equilibria. 2005. 227. 57–70.
12. *Correla R.J. and Kestin J.* Viscosity and Density of Aqueous $Na_2SO_4$ and $K_2SO_4$ Solutions in the Temperature Range 20 – 90 $^0$C and the Pressure Range 0 – 30 MPa // J. Chem. Eng. Data. 1981. Vol. 26, No. 1. P. 43.
13. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Experimental viscosity B-coefficients of aqueous LiCl solutions. Jornal of Molecular Liquids. 2006.126. 75-88.
14. *Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.* Вязкость воды и водных растворов солей // Естественные и технические науки. 2009. № 6. С.59-63.

# ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ И ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ СОСТАВЫ В СИСТЕМЕ Ca//F,Cl,$SO_4$,$MoO_4$

Дибиров Я.А.

*Филиал ФГБУН Объединенного института высоких температур РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: jakhya@yandex.ru*

Развитие методов изучения фазовых равновесий, физико-химических свойств многокомпонентных систем (МКС) и направленный синтез новых энергоемких теплоаккумулирующих материалов являются актуальной проблемой развития возобновляемой энергетики. В решении этих проблем особое место отводится композиционным материалам на основе МКС. Научные основы разработки новых композиционных материалов формируют результаты фундаментальных исследований диаграмм фазовых состояний МКС, их термодинамического моделирования, методы определения и расчета термодинамических и теплофизических характеристик образующихся эвтектических смесей.

Без поисков новых источников энергии, совершенствования технологий ее производства трудно создать условия для нормальной цивилизованной жизни. Стратегией развития энергетики является использование возобновляемых источников энергии, главным недостатком которых является непостоянство поступления энергии во времени (сезонное, суточное). Одним из решений данной проблемы (особенно для солнечной энергии) является использование накопителей тепла.

В настоящее время практическое применение нашли в основном аккумуляторы тепла двух видов: за счет теплоемкости материала и тепла обратимых фазовых превращений. Эти виды различаются по качеству запасаемого тепла в единице объема и объему аккумулирующего материала, по времени накопления тепла в среде и ее температуре.

Теплоемкостное аккумулирование сопровождается изменением температуры аккумулирующего материала, технология его достаточно успешно отработана. Их основной недостаток – это воспроизводство тепла на более низком температурном уровне и низкая плотность запасенного тепла. Кроме того, это наименее эффективный способ в тепловом отношении, т. к. затрачивается минимальное количество тепловой энергии для повышения температуры теплоаккумулирующего материала и, как следствие этого, требуются значительные емкости для складирования тепла, чем при плавлении или разрыве химических связей вещества. Достоинство их – низкая стоимость и простота.

Теплота, запасаемая аккумулятором в интервале $T_1 \div T_2$ для твердотельного теплоаккумулирующего материала, определяется по формуле [1]:

$$\Delta H = C_p \int_{T_1}^{T_2} dT$$

где $C_p$ – теплоемкость материала при постоянном давлении.

Наиболее перспективным и интенсивно разрабатываемым способом аккумулирования энергии является тепловое аккумулирование с использованием скрытой теплоты фазового перехода «твердое тело - жидкость» неорганических, органических соединений и их эвтектических композиций. Эффективность этого способа обусловлена тем, что аккумуляторы тепла на основе фазового перехода

по сравнению с традиционными теплоемкостными аккумуляторами обладают высокой плотностью аккумулируемой энергии и постоянной температурой зарядки (разрядки). Это существенно в случае аккумулирования энергии, когда рабочий диапазон температур не очень широк и когда требуется изотермический теплообмен при решении ряда технологических задач. Одним из путей решения этой проблемы является использование теплоты фазовых переходов I рода.

В прикладном отношении эффективны фазопереходно-теплоемкостные аккумуляторы, в которых учитываются и тепло фазового перехода ($\lambda_{ф.п.}$), и тепло за счет теплоемкости материала при переходе его к стандартной температуре (298,15 К) от данной температуры по высокотемпературным составляющим энтальпий индивидуальных веществ ($H^o_T - H^o_{298}$). Значения $H^o_T - H^o_{298}$ приводятся в справочных таблицах термодинамических функций индивидуальных веществ. Тогда, теплота, запасаемая аккумулятором в интервале температур $298 \div T$, определяется формулой [1]:

$$\Delta H = (H^o_{Тф.п.} - H^o_{298}) + \lambda_{ф.п.} + (H^o_T - H^o_{Тф.п.}),$$

где $T_{ф.п.}$ – температура фазового перехода.

С целью получения энергоемких нонвариантных составов для различных теплонакопителей в данной работе методами физико-химического анализа исследован тетраэдр $Ca//F,Cl,SO_4,MoO_4$, являющийся единичной составляющей древа фаз пятикомпонентной взаимной системы $Li,Ca//F,Cl,SO_4,MoO_4$ (рис. 2). Выбор данного объекта обусловлен тем, что в его состав входят три природных минерала: повеллит ($CaMoO_4$), ангидрит ($CaSO_4$) и флюорит ($CaF_2$), а также хлорид кальция. Все соли выбранной системы обладают достаточными значениями теплот плавления. Включение в состав исследуемой системы тугоплавкого молибдата кальция ($T_{пл.}$ = 1449 $^oC$) обосновано тем, что агрессивность на конструктивные материалы в расплавах анионов галогенидов и сульфатов значительно снижается в присутствии анионов молибдатов.

Исследования проводили дифференциально-термическим (ДТА) [2] и рентгенофазовым (РФА) [3] методами физико-химического анализа. Для записи кривых охлаждения (нагревания) применяли установку ДТА на базе автоматического электронного потенциометра КСП-4 с усилением сигнала дифференциальной термопары фотоусилителем Ф-116/1. Термоаналитические исследования проводились в стандартных платиновых микротиглях с использованием платина-платинородиевых термопар. Эталонным веществом служил свежепрокаленный оксид алюминия квалификации «ч.д.а.».

Рентгенограммы снимали с помощью дифрактометра ДРОН-2.0 ($Cu\ K_\alpha$ - излучение, никелевый β-фильтр). Составы для РФА отжигали в течении 18 ÷ 20 часов на 10 ÷ 15 °С ниже температур кристаллизаций образцов, а затем закаливали при 0 °С. Идентификация фазовых составов проводилась по картотеке ASTM [4]. Энтальпии фазовых переходов нонвариантных составов ($\Delta H_{пл.}$) определяли количественным ДТА. Относительная точность измерения температур ±1 %, теплот фазовых переходов ± 8.

Две грани (тройные системы) тетраэдра исследуемой четверной системы ($Ca//F,SO_4$, $MoO_4$ и $Ca//Cl,SO_4,MoO_4$) являются простыми эвтектическими, а на двух других ($Ca//F,Cl,SO_4$ и $Ca//F,Cl,MoO_4$) локализуются по одному эвтектическому и перитектическому составу (рис. 1). Следовательно, в системе реализуются по одному четверному эвтектическому и перитектическому составу.

Для определения состава и температуры плавления четверных эвтектики и перитектики, согласно правилам ПТГМ [5], выбрано двухмерное политермическое сечение $a - b - c$ ($a$ - 80% $CaF_2$+ 20% $CaMoO_4$, $b$ - 80% $CaCl_2$

+ 20% $CaMoO_4$, ***c*** - 80% $CaSO_4$ + 20% $CaMoO_4$) в объеме кристаллизации молибдата кальция, параллельное тройной системе огранения $CaF_2$ – $CaCl_2$ – $CaSO_4$ (рис.1). После проектирования на стороны сечения *a* – *b* – *c* тройных эвтектик ограняющих тройных систем, для экспериментального изучения выбран одномерный политермический разрез *m* – *n* (*m* – 20% $CaMoO_4$ + 25% $CaSO_4$ + 55% $CaCl_2$, *n* – 20% $CaMoO_4$ + 25% $CaSO_4$ + 55% $CaF_2$) (рис. 2). Диаграмма состояния разреза *m* – *n* показывает наличие в системе по одной нонвариантной точки эвтектического и перитектического типа (рис.2). Пересечением ветвей третичной и четвертичной кристаллизаций диаграммы состояния в точке *1* показывает направление на четверную эвтектику ($E^{\square}$), а ветвей $CaMoO_4$ + $CaSO_4$ + CaFCl и $CaMoO_4$ + $CaF_2$ + $CaSO_4$ в точке *2* – на перитектику ($P^{\blacksquare}$) с вершины *c* сечения *a* – *b* – *c*. Состав проекций четверных эвтектической и перитектической точек ($\overline{E}^{\square}$ и $\overline{P}^{\blacksquare}$) на сечении *a* – *b* – *c* определены изучением соответствующих лучевых разрезов $c \rightarrow 1 \rightarrow \overline{E}^{\square}$ и $c \rightarrow 2 \rightarrow \overline{P}^{\blacksquare}$ (рис.2). А составы четверных эвтектической и перитектической точек получены изучением политермических разрезов $CaMoO_4 \rightarrow \overline{E}^{\square} \rightarrow E^{\square}$ и $CaMoO_4 \rightarrow \overline{P}^{\blacksquare} \rightarrow P^{\blacksquare}$, соответственно (рис.1). При определении энтальпий плавления нонвариантных сплавов исследуемой системы эталонами служили соли: хлорид лития (LiCl) и молибдат натрия ($Na_2MoO_4$) с известными величинами теплот фазовых переходов и температурами плавления, близкими с исследуемыми: 610 °C и 688 °C, соответственно [6, 7].

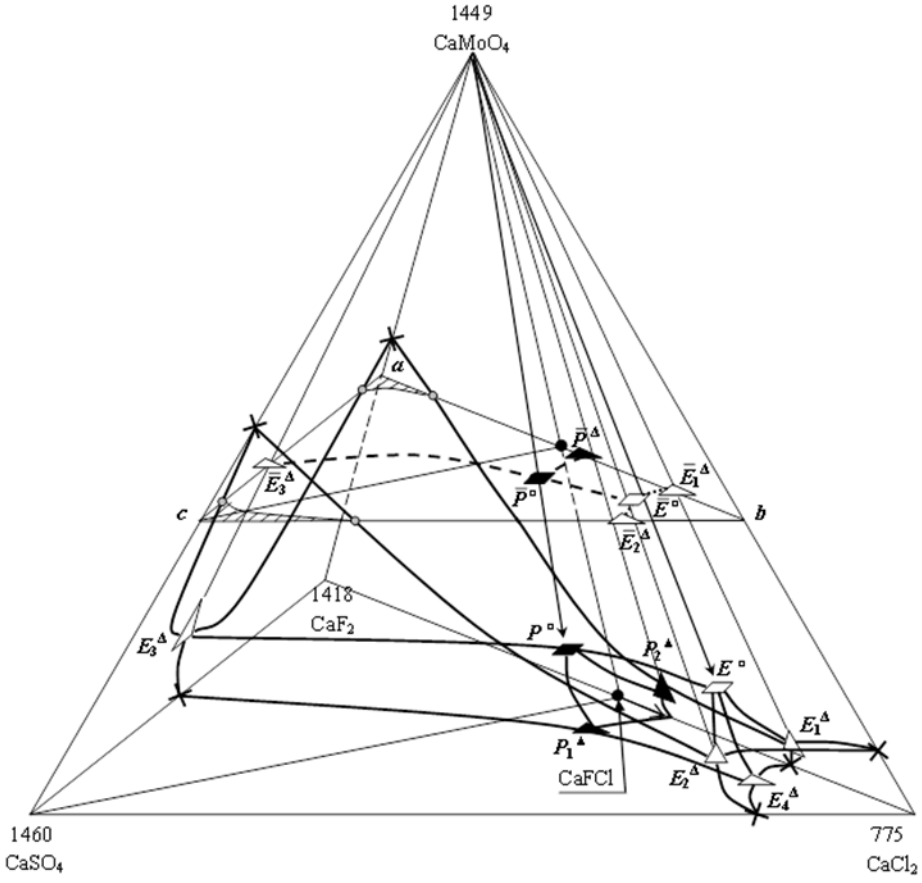



Рис.1. Тетраэдр составов системы Ca//F,Cl,$SO_4$,$MoO_4$ с указанием расположения двухмерного сечения *a* – *b* – *c*

Теплоты фазовых переходов ($\lambda_{ф.п.}$) всех нонвариантных составов тетраэдра определяли количественным дифференциально-термическим анализом по формуле [8]:

$\lambda_{пл.обр.} = (\lambda_{эт} \cdot S_{обр} \cdot (1+0{,}00052\Delta T)) / S_{эт}$,

где, $S_{обр}$ и $S_{эт}$, $\lambda_{пл.обр.}$ и $\lambda_{эт}$, $\Delta T$ – соответственно площади пиков, энтальпии плавления и разность температур плавления образца и эталона.

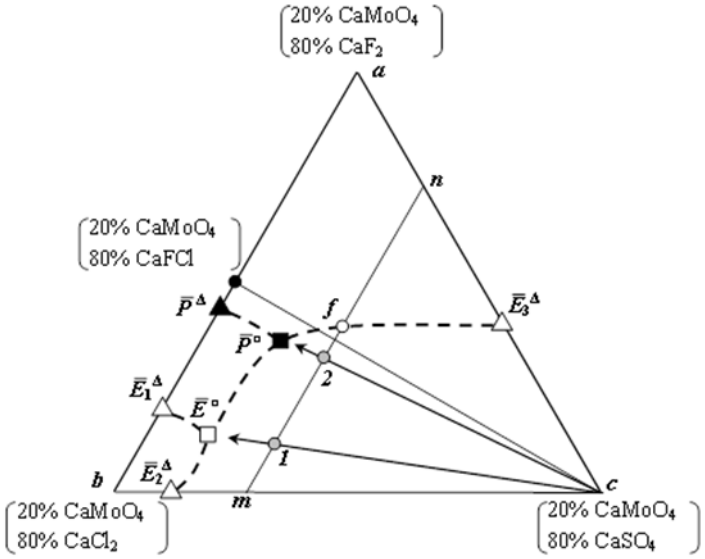



Рис.2. Двухмерное сечение *a – b – c* и расположение политермического разреза *m – n*

Кроме того, рассчитана плотность суммарной аккумулируемой тепловой энергии (теплота плавления плюс тепло за счет теплоемкости материала при переходе его к температуре 25 °С от температуры плавления) каждого из 12 нонвариантных сплавов тетраэдра $CaF_2$–$CaCl_2$–$CaSO_4$–$CaMoO_4$ в расчете на плотность твердой фазы. Доля теплоемкостной составляющей сопоставима, а в большинстве случаев даже превосходит фазопереходную составляющую общей аккумулируемой тепловой энергии (табл.).

Полученные теплоаккумулирующие составы на основе кальциевых солей предлагаются использовать как фазопереходные, фазопереходно-теплоемкостные и твердотелые теплонакопители с запасаемой тепловой энергией в диапазоне 206 – 1259 кДж/кг и плотностью аккумулируемой энергии 1911 – 4040 МДж/м$^3$.

Таблица. Параметры теплоаккумулирующих нонвариантных сплавов тетраэдра Ca//F,Cl,$SO_4$,$MoO_4$

| **Нонв. точка** | **$T_{пл.}$, К** | **$\lambda_{пл.}$, кДж/кг** | **$H^o_{Tпл.} - H^o_{298}$, кДж/кг** | **ΔH, МДж/м$^3$** | **ρ, кг/м$^3$ тв. фазы** |
|---|---|---|---|---|---|
| $e_1$ | 923 | 284 | 466 | 1941 | 2588 |
| $e_2$ | 981 | 224 | 522 | 1911 | 2562 |
| $e_3$ | 1247 | 301 | 1087 | 2534 | 3050 |
| $e_5$ | 993 | 272 | 530 | 2078 | 2591 |
| $E^{\Delta}_1$ | 893 | 336 | 457 | 2089 | 2634 |
| $E^{\Delta}_2$ | 946 | 224 | 505 | 1923 | 2638 |
| $E^{\Delta}_3$ | 1216 | 237 | 1022 | 4040 | 3209 |
| $E^{\Delta}_4$ | 870 | 206 | 446 | 1893 | 2903 |
| $P_1{}^{\Delta}$ | 976 | 379 | 595 | 2693 | 2765 |
| $P_2{}^{\Delta}$ | 965 | 207 | 562 | 2144 | 2788 |
| $E^{\square}$ | 858 | 485 | 442 | 2393 | 2581 |
| $P^{\square}$ | 923 | 256 | 551 | 2433 | 3015 |

**Литература:**

1. *Герасимов Я.И., Древинг В.П., Еремин Е.Н. и др.* Курс физической химии. Т. 1. Изд. 2-е, исправленное. – М.: Химия, 1969. 592с.

2. *Егунов В.П.* Введение в термический анализ. Самара: Самарский гос. тех. ун-т, 1996. 270с.
3. *Трунов В.К. Ковба Л.М.* Рентгенофазовый анализ. М.: Изд-во МГУ, 1976. 232с.
4. ASTM. Diffraction Data cardsand Alfabetical and Gronped Numerical Index of x-Ray Diffraction Data. Изд. американского общества по испытанию материалов. Филадельфия, 1946-1969г.
5. *Космынин А.С., Трунин А.С.* Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2006. 182с.
6. *Лидин Р.А.* Константы неорганических веществ: Справочник. – М.: Дрофа, 2006. 685с.
7. Термические константы веществ // Вып. X. Ч. I. / Под ред. акад. В. П. Глушко. - М.: ВИНИТИ ИВТ АН СССР. 1981. 635с.
8. *Васина Н.А., Грызлова Е.С., Шапошникова С.Г.* Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. - М.: Химия, 1984. 112с.

# РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УРАВНЕНИЯ КРИВОЙ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ ЖИДКОСТЬ–ПАР ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ

Базаев Э.А.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: emilbazaev@mail.ru*

По ранее полученным авторами экспериментальным значениям параметров точек фазовых превращений жидкость ⇆ пар в водных растворах алифатических спиртов (метанол, этанол, н-пропанол) $p_s$,$\rho_s$,$T_s$ приведена температурная зависимость плотности жидкой и паровой фаз вдоль кривой сосуществования и в критической области. Установлено, что степенные функции $\rho_{ж,п}=\rho_к\left(1\pm B_0\tau^{\beta_0}+B_1\tau^{\beta_1}\pm B_2\tau^{\beta_2}\right)$ и $(\rho_ж-\rho_п)/2\rho_к=B_0\tau^{\beta_0}+B_2\tau^{\beta_2}$ адекватно описывают зависимость приведенной плотности растворов $\omega=(\rho_{ж,п}-\rho_к)/\rho_к$ от приведенной температуры $\tau=(T-T_к)/T_к$ в исследованной двухфазной области и окрестности критической точки при значении критического показателя $\beta_0=0.365\pm0.002$ и значениях коэффициента $B_0=(2.471\text{-}2.803)\pm0.005$ в зависимости от концентрации спирта и числа атомов молекулы углерода.
*Ключевые слова*: растворы, фазовые превращения, кривая сосуществования КС, приведенные параметры, критическая точка КТ, критические показатели, уравнение состояния.

Как известно [1], температурную зависимость плотности жидкостей и жидких растворов вдоль кривой сосуществования фаз (КС) и в окрестности критической точки (КТ) описывают степенные функции с нецелочисленными показателями степени – критическими показателями:

$$\omega=B\tau^{\beta_i} \qquad (1)$$

Здесь: $\tau=(T_к-T)/T_к$ – приведенное отклонение температуры от критического значения $T_к$; $\omega=(\rho_ж-\rho_к)/\rho_к$ и $\omega=(\rho_к-\rho_п)/\rho_к$ – приведенное отклонение плотности (жидкой $\rho_ж$ и паровой $\rho_п$ фаз соответственно) от критического значения $\rho_к$ (параметр порядка); $\beta_i=\beta_0,\beta_1,\beta_2\ldots$ – критические показатели; $B_i=B_0,B_1,B_2\ldots$ – коэффициенты.

Существует множество вариантов уравнения (1), отличающиеся выражениями для параметра порядка $\omega$ и числом членов разложения в его правой части, но с близкими значениями $\beta_0$ (0.3–0.5), полученными для жидких систем на основе различных теоретических модельных представлений и экспериментально [1–8]. Так же известно, что величина критических показателей зависит от размерности пространства и числа компонентов параметра порядка [7].

Для определения величин $\beta_i$ и $B_i$ по уравнению (1) нужны надежные экспериментальные данные о критических параметрах веществ, в первую очередь о критической температуре и температурной зависимости плотности вдоль КС в широкой области и вблизи КТ.

Исследование фазовых превращений жидкость⇆пар в гомогенных двойных растворах вода – алифатический спирт [9–11] показывает, что КС их во многих отношениях подобна КС воды и спиртов. Из этого вытекает важный вывод о том, что математические подходы для описания критического состояния однокомпонентной жидкости $(\partial p/\partial\rho)_T^к=0$; $(\partial^2 p/\partial\rho^2)_T^к=0$ и $(dp/dT)_{T=T_к}=(\partial p/\partial T)_{T=T_к,\rho=\rho_к}$ [1] могут быть использованы для описания двухкомпонентных гомогенных систем при дополнительном условии

$\left(\partial\mu/\partial x\right)^{к}_{p,T} = \left(\partial^2\mu/\partial x^2\right)^{к}_{p,T} = 0$, где $\mu_i$ и $x_i$ –химический потенциал компонента раствора и его концентрация в мольных долях соответственно.

Цель данной работы – описание температурной зависимости плотности жидкой и паровой фаз двойных растворов вода–спирт (метанол, этанол, н-пропанол) вдоль КС и вблизи КТ на основе собственных экспериментальных данных $p_s,\rho_s,T_s$ [11] оптимальными уравнениями вида (1), нахождение значений критических показателей $\beta_i$ и коэффициентов $B_i$.

**Экспериментальная часть**. Значения параметров точек фазовых превращений $p_s,\rho_s,T_s$ водных растворов алифатических спиртов были получены методом определения сжимаемости [12] авторами ранее [10] на прецизионной пьезометрической экспериментальной установке [9], работа которой предварительно проверялась по воде (рис.1). Значения критических параметров $p_к,\rho_к,T_к$, определенные из $p_s,\rho_s,T_s$ - данных графо-аналитическим методом, в данной работе (табл. 1) уточнены с применением интерполяционных сплайн-уравнений.

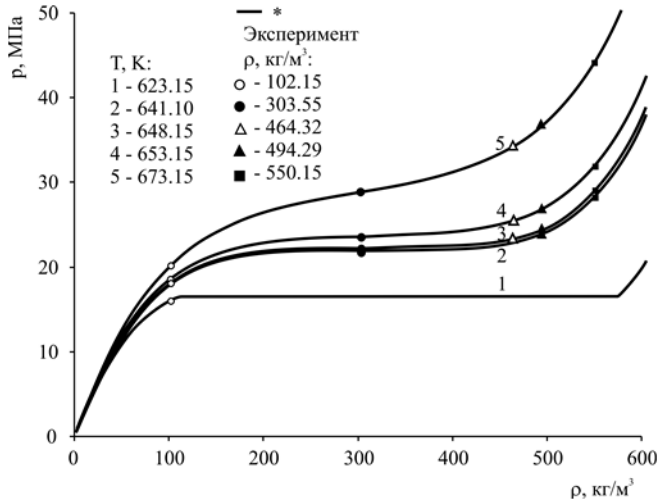



Рис.1. Изотермы зависимости давления пара воды от плотности: сплошные линии * – по данным IAPWS Formulation - 1995, точки – эксперимент

Таблица 1. Критические параметры растворов вода – спирт.

| x, мол.доли спирта | $T_к$, K | $p_к$, МПа | $\rho_к$, кг/м$^3$ | $Z_к$ |
|---|---|---|---|---|
| вода–метанол | | | | |
| 0.0 | 647.096 | 22.064 | 321.96 | 0.2295 |
| 0.5 | 565.15 ±0.3 | 13.5 ±0.2 | 292.2 ±0.5 | 0.2408 |
| 0.8 | 533.15 ±0.3 | 10.2 ±0.2 | 285.5 ±0.5 | 0.2277 |
| 0.1 | 512.60 | 8.1035 | 280.0 | 0.2040 |
| вода–этанол | | | | |
| 0.0 | 647.096 | 22.064 | 321.96 | 0.2295 |
| 0.2 | 601.15 ±0.3 | 16.1 ±0.5 | 293.4 ±0.2 | 0.2407 |
| 0.5 | 556.15 ±0.3 | 10.9 ±0.5 | 282.0 ±0.2 | 0.2529 |
| 0.8 | 530.15 ±0.3 | 7.9 ±0.5 | 280.1 ±0.2 | 0.2504 |
| 1.0 | 513.92 | 6.13 | 276.0 | 0.2396 |
| вода–н-пропанол | | | | |
| 0.0 | 647.096 | 22.064 | 321.96 | 0.2295 |
| 0.2 | 598.15 ±0.3 | 15.1 ±0.2 | 303.2 ±0.5 | 0.2613 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0.5 | 557.15 ±0.3 | 9.5 ±0.2 | 287.5 ±0.5 | 0.2752 |
| 0.8 | 541.15 ±0.3 | 6.5 ±0.2 | 284.2 ±0.5 | 0.2654 |
| 1.0 | 536.85 | 4.99 | 275.0 | 0.2443 |

**Обсуждение результатов**. Как было отмечено, величины критических показателей, определенные разными экспериментальными методами и теоретическими моделями, немного отличаются между собой [1–7] и от результатов, предсказываемых флуктационной теорией фазовых переходов ФТФП [8].

Для описания экспериментальных данных о $p_s$,$\rho_s$,$T_s$,x-зависимостях растворов вдоль КС в интервале температур 424.15–601.15 К и симметричной ее части ($\tau$=0–0.01) в данной работе использованы уравнения [2]:

$$\rho_{ж,п} = \rho_к\left(1 \pm B_0\tau^{\beta_0} + B_1\tau^{\beta_1} \pm B_2\tau^{\beta_2} + \cdots\right), \quad (3)$$

$$\left(\rho_ж - \rho_п\right)/2\rho_к = B_0\tau^{\beta_0} + B_2\tau^{\beta_2} + B_4\tau^{\beta_4} + \cdots \quad (2)$$

Здесь: $\beta_0$–критический показатель, определяющий форму КС при приближении температуры к критической $T \to T_к$; $\beta_i$–учитывают отклонения формы КС от симметрии относительно КТ; $B_i$ –коэффициенты.

При обработке экспериментальных данных по уравнениям (2) и (3) величину $\beta_i$ меняли в интервале 0.3–0.5, а параметр $B_i$ использовался как подгоночный (табл. 2). Предварительно уравнения (2) и (3) были проверены по воде. Они описывают адекватно данные воды при $\beta_0$=0.365 и $B_0$=2.653 с погрешностью менее 0.5%. Погрешность расчета для растворов доходит до 2–3%, а для некоторых точек до 5% (рис.2,3). Видимо, это связанно с погрешностью определения критических параметров растворов, которая в свою очередь зависит от чистоты спиртов.

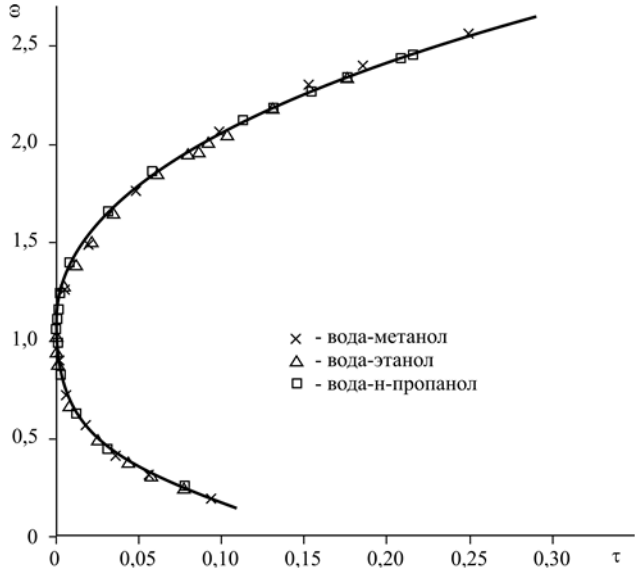



Рис.2. Зависимость приведенного отклонения плотности ω жидкой и паровой фаз от приведенного отклонения температуры τ растворов состава 0.5 мол.доли во всем исследованном интервале. Сплошная линия – расчет по уравнению (2), точки – эксперимент

Зависимость величины приведенного отклонения плотности растворов $\omega = \left(\rho - \rho_к\right)/\rho_к$ от величины приведенного отклонения давления $\pi = \left(p - p_к\right)/p_к$ при подходе к КТ сверху вдоль критической изотермы оптимально описывает уравнение $\omega = A\pi^{1/\delta_0}$ при значении критического показателя $\delta_0$=4 и значениях коэффициента A=0.7–0.9 в зависимости от числа атомов углерода молекулы спирта и состава раствора.

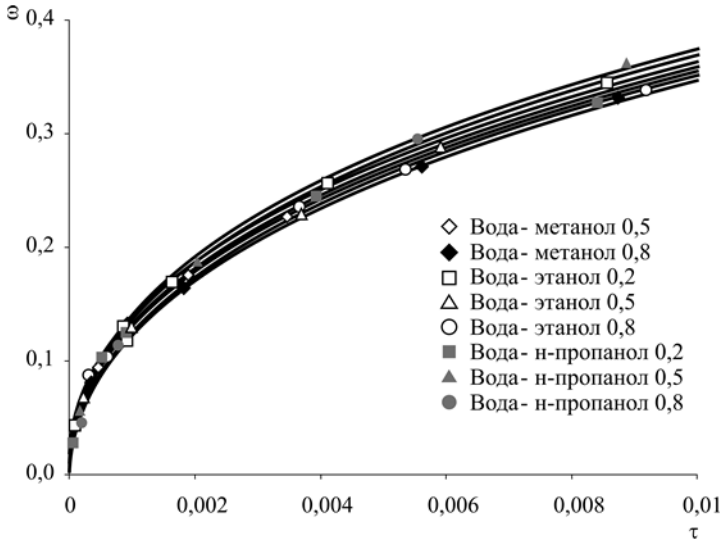



Рис.3. Зависимость приведенной плотности $\omega = (\rho_ж - \rho_п)/2\rho_к$ от приведенного отклонения температуры $\tau$ и состава растворов в симметричной части КС. Сплошная линия – расчет по уравнению (3), точки – эксперимент

Таблица 2. Значения критических показателей и коэффициентов уравнений (2) и (3) для растворов вода – спирт

| Раствор состава x – мол.доли спирта | $\beta_0$±0.002 | $B_0$±0.005 | $\beta_1$ | $B_1$ | $\beta_2$ | $B_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Вода | 0.365 | 2.561 | 0.829 | 1.067 | 0.811 | -0.713 |
| Метанол | 0.365 | 2.760 | 0.821 | 1.004 | 0.730 | -1.022 |
| н-Пропанол | 0.365 | 2.803 | 0.825 | 0.966 | 0.091 | -0.187 |
| Вода-метанол, 0.5 | 0.365 | 2.512 | 0.876 | 0.717 | 0.166 | -0.251 |
| Вода-метанол, 0.8 | 0.365 | 2.471 | 0.876 | 0.706 | 0.166 | -0.247 |
| Вода-этанол, 0.2 | 0.365 | 2.553 | 0.876 | 0.729 | 0.166 | -0.255 |
| Вода-этанол, 0.5 | 0.365 | 2.498 | 0.876 | 0.714 | 0.166 | -0.250 |
| Вода-этанол, 0.8 | 0.365 | 2.597 | 0.876 | 0.743 | 0.166 | -0.260 |
| Вода-пропанол, 0.2 | 0.365 | 2.649 | 0.876 | 0.757 | 0.166 | -0.265 |
| Вода-пропанол, 0.5 | 0.365 | 2.728 | 0.876 | 0.780 | 0.166 | -0.273 |
| Вода-пропанол, 0.8 | 0.365 | 2.752 | 0.876 | 0.786 | 0.166 | -0.275 |

**Заключение.** Полученное в данной работе значение $\beta_0$ (табл. 3) отличается от его теоретической оценки 0.325. Оно хорошо согласуется со значением, приводимым в работе [7] для трехмерных систем с тремя компонентами параметра порядка, и близко к полученному в [2,3] по экспериментальным данным для простых и сложных систем, а так же «компромиссному» значению 0.34–0.35, принятому при эмпирическом описании термодинамической поверхности [6].

Таблица 3. Сравнение величин критических показателей, полученных в данной работе и другими авторами.

| Источники | $\beta$ | $\delta$ | $\xi$ | $\nu$ | $\gamma$ | $\eta$ | $\alpha_\mu$ | $\alpha_\tau$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Данная работа | 0.365 | 4.0 | 0.42 | 0.61 | 1.095 | 0.2 | 0.12 | 0.175 |
| [1] С.105 | 0.354 | 3.8-4.1 | | | | | | |
| [2,3] | 0.35-0.357 | | | | | | | |
| [5] | 0.338 | 4.64 | 0.405 | 0.636 | 1.23 | 0.06 | 0.06 | 0.09 |
| [6] С. 125 | 0.34-0.35 | 4.5 | | | | | | |
| [7] | 0.3697 | | | 0.7109 | 1.3934 | 0.04 | | |

**Литература:**

1. *Стенли Г.* Фазовые переходы и критические явления. М.: Мир, 1973. 419с.
2. *Шиманский Ю.И., Шиманская Е.Т.* Расширенное масштабное уравнение для параметра порядка бензола в области фазового равновесия жидкость-пар // ЖФХ. 1996. Т.70. №3. С.443.
3. *Шиманская Е.Т., Шиманский Ю.И.* О критическом индексе β кривой сосуществования азота // ЖФХ. 1992. Т.66. №4. С.1054.
4. *Анисимов М.А.* Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. –М.: Наука, 1987. 271 с.
5. *Alekhin A.D.* Critical Indices for Systems of Different Space Dimensionality // Journal of Molecular Liquids. 2005. V.120. P.43.
6. *Новиков И.И.* О возможности построения единого уравнения состояния системы жидкость–газ на основе закономерностей теории критических явлений // Докл. АН СССР. 1994.Т.335. №3. С.308.
7. *Шелудяк Ю.Е., Рабинович В.А.* О зависимости критических показателей от размерности пространства и числа компонентов параметра порядка // ТВТ. 1993.Т.31. №6. С.915.
8. *Поташинский А.З., Покровский* В.Л. Флуктационная теория фазовых переходов М.: Наука. 1982. 382 с.
9. *Абдурашидова А.А, Базаев А.Р., Базаев Э.А., Абдулагатов И.М.* Термические свойства системы вода–этанол в около- и сверхкритическом состояниях // ТВТ. 2007. Т.45. № 2. С.208.
10. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А.* Экспериментальное исследование критического состояния водных растворов алифатических спиртов // ТВТ. 2009. Т.47. №2. С.215.
11. *Базаев А.Р.* Экспериментальные исследования фазовых переходов в бинарных системах вода-спирт и спирт-н.алкан // Материалы 4-й школы молодых ученных «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» г. Махачкала 19-22 сентября. -2011: С.80.
12. *Кирилин В.А., Шейдлин А.Е.* Исследование термодинамических свойств веществ. Часть 2 М.:Госэнергоиздат. 1963. 560с.

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ С ЦЕЛЬЮ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Белан С.И.[1,2], Саркаров Р.А.[1], Гусейнов Н.М.[1], Бадавов Г.Б.[2]

*[1] ООО «НПЦ Подземгидроминерал»;*
*Махачкала, Россия; 367000, ул.Абубакрова 16в, кв.1.; e-mail: sbelan@bk.ru*
*[2] ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

Энергоемкость внутреннего валового продукта России в несколько раз выше соответствующего показателя ведущих стран мира: в 4 раза выше, чем в США, в 3,6 раза выше, чем в Японии, в 2,5 раза выше, чем в Германии. Резервы экономии энергоресурсов в России составляют 40-50 % от уровня потребляемых топлива и энергии. Необходимость повышения энергоэффективности признана на всех уровнях управления экономикой.

Анализ современного состояния освоения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) показал, что в мире имеет место опережающий рост их использования по отношению к традиционным источникам энергии. Ежегодные темпы роста установленной мощности энергоустановок на базе ВИЭ в мире оцениваются в десятки процентов в год и на порядок превышают средние темпы развития традиционной энергетики. Во многих странах реализовываются планы доведения к 2020 году доли ВИЭ в энергобалансах до уровня 15-20% и выше.

В России темпы развития энергопроизводств на базе ВИЭ отстают от мирового уровня. Доли электро- и теплоэнергии, получаемой в России на основе ВИЭ, составляют соответственно 0,6 % и 3,9% от общего объема производства. На базе ВИЭ ежегодно вырабатывается около 8,5 млрд. кВт·ч электрической энергии, общая мощность электрогенерирующих установок и электростанций, использующих ВИЭ, составляет 2200 МВт (таблица 1).

Таблица 1. Основные показатели производства энергии на базе ВИЭ в России

| Виды ВИЭ | Доли ВИЭ в совокупном производстве энергии, % | Установленная мощность, МВт | Объем производства, млрд. кВт·ч |
|---|---|---|---|
| МГЭС (до 25 МВт) | 0,33 | 683 | 2,8 |
| Энергия ветра | 0,001 | 16,5 | 0,0097 |
| Энергия солнца | 0,000002 | 0,02 | 0,00002 |
| Энергия приливов | - | 1,5 | - |
| Геотермальная энергия | 0,05 | 76,5 | 0,4 |
| Биомасса/Биогаз | 0,62 | 1413 | 5,2 |
| **ВИЭ, всего** | **1,00** | **2186,5** | **8,41** |

(Источник: Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике)

Россия обладает большим ресурсный потенциалом использования ВИЭ несмотря на незначительный объем производства в настоящее время. Проведенные исследования позволили провести подсчет эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов геотермальных вод, оценить валовой, технический и экономический потенциалы солнечной, ветровой энергии и ресурсов биомассы в России. В таблице 2 даны сводные показатели ресурсного потенциала основных видов ВИЭ и потенциал газозамещения в соответствии с [1-3].

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что основные виды ВИЭ имеют высокий потенциал роста и могут существенно сэкономить органическое топливо. В настоящее время производство ВИЭ составляет 20,36 млн.т у.т./год или 2,91% от добычи природного газа. При условии эффективного использования экономического потенциала геотермальной, солнечной, ветровой энергии и биомассы уже в среднесрочной перспективе возможно дополнительно получить 197,6 млн.т у.т./год энергии, что эквивалентно замещению 28,2 % объема добычи природного газа.

Проведенный анализ современного состояния использования ресурсного потенциала основных видов ВИЭ выявил наличие значительных резервов их вовлечения в топливно-энергетические балансы по всем федеральным округам России.

Таблица 2. Сводные показатели ресурсного потенциала ВИЭ

| Добыча природного топлива за 2008г., млн. ту.т. | Вид ресурса | Потенциал, млн. т у.т. | | | | | Потенциал замещения природного газа источниками ВИЭ, в % к газопотреблению за 2010 г. | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Гидрогео-термальная энергия* | Солнечная энергия | Ветровая энергия | Биомасса | **Итого** | Гидрогеотермальная энергия* | Солнечная энергия | Ветровая энергия | Биомасса | **Итого** |
| Всего - 1628 в т.ч.: нефть и газовый конденсат -722,0 газ природный - 700,0 уголь - 206,0 | Валовой | 12600000 | 2205400 | 886256 | 467,56 | **15692124** | | | | | |
| | Технический | 11868,7 (3,86) | 9675,6 | 2215,6 | 140,45 | **23900,35 (12035,51)** | 1695,5 (0,6) | 1382,2 | 316,5 | 20,1 | **3 414,3 (1719,4)** |
| | Экономический | 114,9 (0,97) | 2,5 | 11,1 | 69,07 | **197,57 (83,64)** | 16,4 (0,3) | 0,36 | 1,59 | 9,9 | **28,22 (11,9)** |
| | Используемый | 0,35 (0,25) | 0,004 | 0,006 | 20,0 | **20,36 (20,26)** | 0,1 (0,04) | 0,001 | 0,001 | 2,86 | **2,91 (2,89)** |

* в скобках даны значения по разведанным геотермальным месторождениям

Потенциал роста геотермального производства по перспективным регионам России приведен в таблице 3.

По перспективным регионам России объем газозамещения в настоящее время составляет 163,74 млн. $м^3$/год. При вовлечении в топливно-энергетический баланс регионов эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов геотермальных вод среднегодовой объем газозамещения может составить соответственно 1165,56 и 4625,43 млн. $м^3$ (971,3 и 3854,53 тыс. тут).

Потенциал ВИЭ, преобразование которого в полезно используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен – экономический потенциал – составляет 202,47 млн. тут/год, что соответствует 176,2 млрд. $м^3$ природного газа. Лидерами по наличию экономического потенциала являются

Сибирский округ – 48,7 млн. тут/год, Юг России (Южный и Северокавказский округа) – 37,3 млн. тут/год, Дальневосточный округ – 34,41 млн. тут/год.

Одним из наиболее перспективных регионов для развития энергопроизводств на базе ВИЭ является Юг России. Наряду с высоким ресурсным потенциалом в регионе существует мощная действующая инфраструктура, в первую очередь, в области малой гидроэнергетики (только в Дагестане действуют 11 малых ГЭС мощностью 50,2 МВт), геотермальной (более 70 разведанных месторождений) и биоэнергетики. При этом регион является энергодефицитным, первичные энергоносители (газ природный, нефть, уголь) в основном поставляются из других регионов страны. В связи с этим, данный регион выбран в качестве объекта оценки экономической эффективности освоения ВИЭ с целью замещения органического топлива.

Для оценки экономической целесообразности освоения ВИЭ определены исходные технико-экономические показатели типового технологического оборудования по основным видам энергопроизводств. Исходной информационной базой послужили технико-экономические и финансовые показатели конкретных инвестиционных проектов в области возобновляемой энергетики, находящиеся на стадии разработки и реализации.

Таблица 3. Потенциал роста геотермального производства по перспективным регионам России

| Наименование района | Запасы, прогнозы термальных вод | | Потенциал теплопроизводства | | Современный и возможный объем газозамещения | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Категории: ИЗ* РЗ** ПР*** | Величина тыс.м$^3$/сут. тыс.т/сут. | тыс. Гкал/год | тыс. тут/год | млн. м$^3$/год | % (от потребления газа за 2009г.) |
| Юг России**** | ИР | 21,52 | 262,574 | 47,26 | 39,39 | 0,16 |
| | РЗ | 229,131 | 5012,2 | 902,20 | 751,83 | 3,08 |
| | ПР | 797,18 | 16672,4 | 3001,03 | 2500,86 | 10,25 |
| Чукотский автономный округ | ИР | - | - | - | - | - |
| | РЗ | 2,2 | 20,1 | 3,62 | 3,02 | 0,25 |
| | ПР | 29,6 | 270 | 48,60 | 40,50 | 329,3 |
| Магаданская область | ИР | - | - | - | - | - |
| | РЗ | 0,135 | 1,5 | 0,27 | 0,23 | - |
| | ПР | 7,1 | 77,8 | 14,00 | 11,67 | - |
| Сахалинская область | ИР | /3,24 | 1,95 | 0,35 | 0,29 | 0,05 |
| | РЗ | /13,71 | 8,23 | 1,48 | 1,23 | 0,21 |
| | ПР | /62,76 | 37,66 | 6,78 | 5,65 | 0,96 |
| Камчатский край | ИР | 33,28/62,41 | 645,15 | 116,13 | 96,77 | 1640,2 |
| | РЗ | 74,59/119,8 | 1433,33 | 258,00 | 215,00 | 3644,1 |
| | ПР | 452/650 | 8639 | 1555,02 | 1295,85 | 21950,0 |
| **Итого** | **ИР** | **54,8/65,65** | **909,67** | **136,45** | **163,74** | **0,66** |
| | **РЗ** | **306,1/133,51** | **6475,36** | **971,30** | **1165,56** | **4,66** |
| | **ПР** | **1285,9/712,76** | **25696,86** | **3854,53** | **4625,43** | **18,5** |

*-используемые ресурсы, **- разведанные запасы, ***- прогнозные ресурсы, ****-Республика Дагестан, Чеченская Республика, Краснодарский край, Республика Адыгея, Ставропольский край, Карачаево-ЧеркесскаяРеспублика, Кабардино-Балкарская Республика.

Определены сценарии освоения основных видов ВИЭ с учетом имеющихся в регионе технических и инвестиционных возможностей освоения ресурсного потенциала:

- *умеренный сценарий* создания энергопроизводств с использованием 10 % экономического потенциала ВИЭ Юга России за 15-летний период;
- *ускоренный сценарий* создания энергопроизводств с использованием 25 % экономического потенциала ВИЭ Юга России за 15-летний период.

По каждому сценарию рассмотрены следующие направления расширения использования ВИЭ в регионе:
- производство электроэнергии – малые ГЭС, геотермальные электростанции, ветроэлектрические станции, солнечные электрические станции, биотопливные электрические станции;
- производство теплоэнергии – солнечные коллектора геотермальные системы теплоснабжения.

В таблице 4 приведены сводные технико-экономические показатели создания энергопроизводств с использованием ВИЭ на Юге России по умеренному сценарию, на рисунке 1 показана динамика роста объемов замещения природного газа при освоении основных видов ВИЭ Юга России.

Выполнена оценка эффективности инвестиций в создание энергопроизводств на базе ВИЭ Юга России. В качестве базовых тарифов на электро- и теплоэнергию приняты действующие значения тарифов в регионе на 2011г. (2,464 руб./кВтч электроэнергии и 412,43 руб./ Гкал теплоэнергии с НДС).

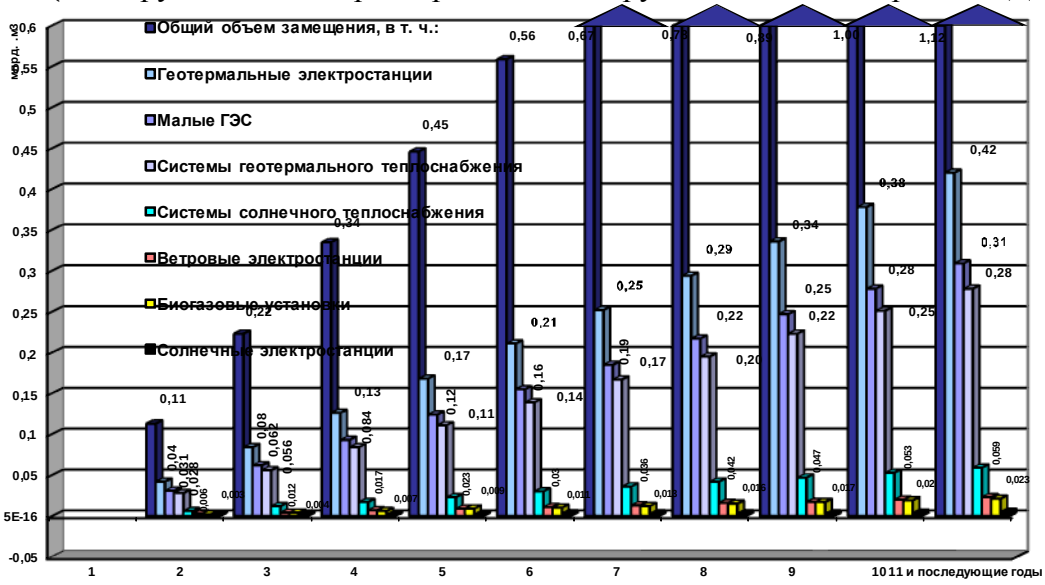



Рис.1. Динамика роста объемов замещения природного газа при умеренном сценарии освоения основных видов ВИЭ Юга России

В соответствии с [4] по некоторым видам ВИЭ приняты надбавки к тарифу, обеспечивающие минимально приемлемый уровень коммерческой рентабельности инвестиций (ВНД=15%).

Ниже приведены коэффициенты удорожания тарифов за счет государственных субсидий, ранжированные по мере убывания: солнечные электростанции - 2,887; малые ГЭС- 1,26; системы солнечного теплоснабжения - 1,21; ветроэлектростанции - 1,123; системы геотермального теплоснабжения - 1,115; геотермальные электростанции -1,025; биогазовые установки - 1,0.

Таким образом, на сегодняшний день на Юге России без субсидирования тарифной ставки на электро- и теплоэнергию привлекательный для инвестора уровень коммерческой эффективности будет иметь только строительство БиоТЭС. Остальные виды ВИЭ при действующих тарифах на электро- и

Таблица 4. Технико-экономические показатели создания энергопроизводств с использованием 10 % экономического потенциала ВИЭ Юга России

| Показатели | Экономический потенциал, МВт | Установленная мощность, МВт | Установленная мощность, Гкал/ч | Пр-во электро-энергии, млн.кВтч /год | Пр-во теплоэнер-гии, тыс.Гкал /год | Кол-во станций, шт. | Капиталь-ные вложе-ния, млн.руб. | Операцион-ные затраты, млн.руб. /год | Замещение топлива, млн.тут/год |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Малые ГЭС (МГЭС) | 2700 | 270,0 | | 1030,0 | - | 18x15 МВт | 32400,0 | 710,70 | 0,355 |
| 2. Геотермальные электростанции (ГеоТЭС) | 2000 | 200,0 | - | 1400,0 | - | 20x10 МВт | 24000,0 | 2940,00 | 0,483 |
| 3. Ветроэлектрические станции (ВЭС) | 300 | 25,0 | - | 74,0 | - | 1x25 МВт | 1875,0 | 88,80 | 0,026 |
| 4. Солнечные электрические станции (СЭС) | 28 | 10,0 | - | 16,0 | - | 1x10 МВт | 1200,0 | 14,56 | 0,006 |
| 5. Биотопливные электрические станции (БиоТЭС)* | 80 | 10,0 | - | 70,0 | - | 1x10 МВт | 800,0 | 26,60 | 0,024 |
| 6. Солнечные коллектора (СК) | 1700 | | 170,0 | | 340,0 | 34x5 Гкал/ч | 1511,0 | 170,00 | 0,068 |
| 7. Геотермальные системы теплоснабжения (СГТ) | 21000 | | 320,0 | - | 1600,0 | 64x5 Гкал/ч | 8320,0 | 240,00 | 0,320 |
| **Итого** | **5108 МВт (э)** | **515,0** | **490,0** | **2590,0** | **1940,0** | **41 – электр.** | **70106,0** | **4190,66** | **1,282** |
| | **26400 МВт (т)** | | | | | **98 – теплов.** | | | |

теплоэнергию находятся на грани окупаемости инвестиций или имеют отрицательную коммерческую эффективность. По мере изменения рыночной конъюнктуры – роста стоимости тарифов на электро- и теплоэнергию из традиционных источников – экономическая эффективность создания энергопроизводств на базе ВИЭ будет повышаться.

При условии реализации рассмотренных сценариев могут быть получены следующие технико-экономические результаты:

- введены электрические мощности на 2590,0 и 6467 МВт;
- увеличено производство электроэнергии на 24605,0 и 61436,5 млн. кВтч/год;
- введены тепловые мощности на 1940,0 и 4850 Гкал/ч;
- увеличено производство теплоэнергии на 18430,0 и 46075,0 тыс. Гкал/год;
- замещено органическое топливо в объеме 12,2 и 30,4 млн. тут или природный газ в объеме 10,6 и 26,5 млрд. $м^3$;
- увеличена доля ВИЭ в потреблении топлива на 1,27 % и 3,18 %;
- получен коммерческий доход в размере 82,66 и 205,72 млн. руб., в том числе с учетом дисконта – 2,94 и 31,92 млн. руб.
- получен бюджетный эффект за счет налоговых поступлений;
- созданы новые рабочие места;
- снижена энергетическая зависимость регионов Юга России от экспорта энергоносителей извне;
- сокращены выбросы в атмосферу парниковых газов ($CO_2$) более чем на 19 и 49 млн. т и др.

Проведенные расчеты показали, что предложенные сценарии имеют близкие показатели коммерческой эффективности и отличаются в основном техническими параметрами их реализации. В связи с этим, оба сценария могут быть реализованы при условии оказания поддержки со стороны государства и заинтересованных в развитии ВИЭ частных инвесторов. Необходимо отметить, что принятый уровень доходности инвестиций может быть приемлемым для крупных компаний с государственным участием (ОАО «Газпром», ОАО «Русгидро» и др.). Для частного инвестора уровень рентабельности инвестиций должен быть выше и составлять не менее 20%.

Технологическим и экономическим факторами, сдерживающими развитие энергопроизводств на базе ВИЭ в России, являются высокие затраты на генерацию электро- и теплоэнергии, недостаточный для широкомасштабного освоения ВИЭ уровень развития технологий, относительно низкий уровень тарифов на углеводороды внутри страны. По мере развития технологий освоения ВИЭ и роста тарифов на углеводороды экономическая эффективность создания энергопроизводств на базе ВИЭ будет повышаться.

Для реализации потенциальных ресурсов ВИЭ необходимы разработка и реализация государственной программы, включающей комплекс мероприятий по стимулированию инвестиций в создание энергопроизводств на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Мировой опыт освоения ВИЭ показывает, что спрос на возобновляемую энергию быстрее всего растет в странах, сделавших ее использование одним из приоритетов национальной энергетической политики. Государственная поддержка является важнейшим условием повышения уровня инвестиционной привлекательности отрасли.

Принятие поправок в Федеральный закон «Об электроэнергетике» явилось первым шагом к созданию нормативной базы освоения ВИЭ, способствовало созданию институциональных условий функционирования рынка

и повышению инвестиционной привлекательности отрасли.

Для стимулирования широкомасштабного освоения ВИЭ целесообразно установление налоговых льгот на федеральном и региональном уровнях, а также предоставление субсидий для выравнивания тарифов на электро- и теплоэнергию, полученную с использованием ВИЭ, к действующим в настоящее время энерготарифам на первичные топливно-энергетические ресурсы.

В некоторых регионах уже приняты собственные законы, регулирующие применение ВИЭ и определяющие особенности местной энергосберегающей деятельности. Существуют также региональные программы развития отдельных отраслей альтернативной энергетики: в Краснодарском крае – солнечной, Мурманской области – ветряной и др. В республике Дагестан разработана целевая программа по развитию ВИЭ до 2020 года.

Согласно Энергетической стратегии к 2030 году прогнозный объем производства электроэнергии на базе ВИЭ составляет не менее 80-100 млрд. кВт·ч в год.

Для реализации поставленных стратегических целевых показателей в области освоения возобновляемых источников энергии необходимо разработать и реализовать с участием Министерства природных ресурсов РФ, Министерства образования и науки РФ, Министерства топлива и энергетики РФ и ведущих энергетических компаний (ОАО «Газпром», ОАО «Русгидро» и др.) программу развития возобновляемых источников энергии на федеральном, региональном и отраслевом уровнях.

Уже в ближайшей перспективе повышение эффективности использования существующего экономического потенциала основных видов ВИЭ может сделать их актуальным резервом экономии газопотребления, а в последующем стратегическим резервом в энергоснабжении регионов Российской Федерации.

**Литература:**

1. *Безруких П.Г.* Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / под ред. П.Г. Безруких. – С.-Пб.: Наука, 2002.
2. Справочник по ресурсам ВИЭ и местным видам топлива. – М.: "ИАЦ Энергия", 2007. – 272 с.
3. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Теплоэнергетические воды. – М.: ФГУНПП «Росгеолфонд», 2009. – 68 с.
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2009г. № 1-р "Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года". – М., 2009.
5. *Волков Э.П.* Развитие электроэнергетики России на период до 2020 года: презентация / Э.П. Волков // Отрасль. ТЭК 2011: мероприятия Министерства энергетики Российской Федерации, посвященные развитию топливно-энергетического комплекса России, г.Санкт-Петербург, 15 июня 2011 г. – СПб., 2011.

# ОСНОВЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Бабаев Б.Д.

*ФГБОУ ВПО Дагестанский государственный университет;*
*Махачкала, Россия; 367025, ул.Магомеда Гаджиева 43а; e-mail: bdbabaev@yandex.ru*

Важнейшим аспектом энергетической политики страны стало создание экологически чистых энергетических установок на традиционных видах топлива, а также разработка и проведение мер по энерго- и ресурсосбережению [1, 2].

Одним из перспективных путей решения возникших в традиционной энергетике проблем является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Основное преимущество ВИЭ — *неисчерпаемость и экологическая чистота*. Их использование не изменяет энергетический баланс планеты и играет большую роль в решении трех глобальных проблем, стоящих перед человечеством: энергетики, экологии, продовольствия.

Несовершенство техники и технологии, отсутствие необходимых конструкционных и других материалов пока не позволяет широко вовлекать ВИЭ в энергетический баланс.

Слабое развитие ВИЭ отчасти можно объяснить тем, что при выборе оптимальных систем энергоснабжения сравнительная оценка с традиционными системами производится, без оценки влияния на окружающую среду, только по экономическим критериям, по которым системы на основе ВИЭ проигрывают.

Поэтому учет требований защиты окружающей среды и охраны природы при формировании и оптимизации систем энергоснабжения имеет большое значение.

Работа посвящена учету экологических факторов (влияния на окружающую среду) различных систем на основе возобновляющихся и невозобновляющихся источников энергии при выборе оптимальной системы энергоснабжения, что может способствовать широкому распространению использования ВИЭ.

Экологические характеристики энергетики, объемы вредных выбросов зависит от структуры топливно-энергетического баланса (ТЭБ), экологической чистоты используемого топлива, от технического уровня и условий эксплуатации установок и очистного оборудования, от организации управления природозащитной деятельностью.

**Экологические характеристики тепловой энергетики.** В России на долю тепловых электростанций (ТЭС) — основных потребителей органического топлива приходится примерно 66 % всех генерирующих мощностей. Основными видами топлива, используемого на ТЭС, являются газ и уголь. В топливном балансе ТЭС доля природного газа составляет 63 %, угля - 26 %, мазута — 11 % [2].

На объем вредных выбросов оказывает влияние качество топлива, экологическая чистота и совершенство технологии его подготовки и сжигания (табл.1).

При сжигании топлива реализуется первичная (тепловая) энергия, которая может быть преобразована в электрическую с определенным коэффициентом полезного действия (к.п.д.) - 40 - 44 % на ТЭС и 30 - 33 % на

атомных электростанциях (АЭС).

Основное тепловое загрязнение окружающей среды на ТЭС происходит за счет использования проточной воды для охлаждения и конденсации пара в конденсаторах (см. табл. 2) [3].

Таблица 1. Удельные выбросы вредных веществ в атмосферу при сжигании топлива различными потребителями, *г/кВт.ч*

| Виды вредных выбросов | Виды используемого топлива и удельные выбросы вредных веществ | | |
|---|---|---|---|
| | Газ | Мазут | Твердое топливо (ср. взвешенное) |
| | Тепловые электростанции | | |
| Оксиды серы | — | 5,0 | 5,66 |
| Оксиды азота | 0,65 | 0,86 | 1,81 |
| Твердые частицы | — | — | 1,5 |
| | Районные и промышленные кательные | | |
| Оксиды серы | — | 5,0 | 5,12 |
| Оксиды азота | 0,61 | 0,68 | 0,9 |
| Твердые частицы | — | — | 5,82 |
| | Печи и коммунальные кательные | | |
| Оксиды серы | — | 5,0 | 5,1 |
| Оксиды азота | 0,43 | 0,43 | 0,64 |
| Твердые частицы | — | — | 9,67 |

Таблица 2. Потери энергии при некоторых процессах, установках и машинах электростанций, %

| | КЭС | ТЭЦ | АЭС | МГЭС | СТЭ | СФЭУ | ВЭУ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Потери энергии с охлаждающей водой | 47 | 0 | ≈ 60-65 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Потери энергии с уходящими дымовыми (выхлопными) газами | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Потери энергии в топке, котле, теплообменнике, солнечном коллекторе | 2 | 2 | ≈ 5 | 0 | 20 | 0 | 0 |
| Потери энергии в турбогенераторе, полупроводниковых преобразователях, ветроколесе | 3 | 4,7 | 3 | 3 | 0 | 72 | 50 |
| Расход энергии на собственные нужды | 2 | 3,2 | ≈10 | 1,5 | 2 | 0,1 | 0,1 |
| Полезно используемая энергия | 36,5 | 80,6 | ≈ 27-32 | 96,5 | 78 | ≈28 | ≈50 |

Примечание: КЭС - Конденсационные паротурбинные электростанции, СТЭ – солнечная тепловая электростанция

Кроме вредных выбросов (табл.1), которые вызывают образование «кислотных» дождей, создание, передача и использование электроэнергии ведут к электромагнитному загрязнению.

В каменном угле и летучей золе содержатся значительные количества радиоактивных примесей ($Ка^{226}$, $Ка^{228}$ и др.). Годовой выброс в атмосферу в районе расположения угольной ТЭС мощностью 1 ГВт приводит к накоплению на почве радиоактивности, в 10 - 20 раз превышающей радиоактивность годовых выбросов АЭС такой же мощности [1].

Тепловая энергетика требует также изъятия территорий для добычи топлива, с выходом большого количества твердых отходов, его транспортировки,

размещения электростанций и линий электропередачи, а также отвалов со шлаком, которые вызывают загрязнение атмосферы, почвы и поверхностных вод вредными компонентами [1].

Крупные ТЭС создают повышенные локальные концентрации вредных компонентов на территории 400...500 км$^2$, увеличивают минерализацию воды в реках, ухудшают их гидрохимические и гидробиологические характеристики [1].

**Экологические характеристики атомной энергетики.** В России на долю АЭС приходится около 12 % генерирующих мощностей, построены и эксплуатируются АЭС с реакторами двух типов: ВВЭР-1000 - водо-водяной энергетический реактор (18 реакторов) и РБМК-1000 - реактор большой мощности канальный (11 реакторов) [1, 2].

Использование на АЭС ядерного топлива не сопровождается образованием двуокиси углерода $CO_2$, а также не создает окислов серы и азота, приводящих к кислотным осадкам.

Однако в расчете на единицу производимой электроэнергии АЭС сбрасывают в окружающую среду больше тепла, чем ТЭС аналогичной мощности (см. табл. 2) и оказывает радиактивное загрязнение, которое оценивается в 10 экологических баллов.

Есть и еще одна не техническая проблема, связанная с АЭС. На АЭС в основном используются реакторы на тепловых нейтронах, которые способны использовать только 1 - 2 % энергии урана-235. В настоящее время наиболее перспективными являются реакторы на быстрых нейтронах (бридеры); в них идет деление дешевого изотопа урана-238, запасы которого достаточно велики. Однако такие реакторы работают в режиме расширенного производства плутония - основы ядерного оружия. Развиваясь на этой базе, мировая энергетика введет в международный оборот много сотен тонн плутония. Ясно, что возникающая при этом принципиальная возможность его «утечки» находится в противоречии с интересами международной безопасности.

Наличие большого количества АЭС приводит к необходимости переработки, транспортировки и захоронения в шахтах или на дне моря больших объемов продуктов радиоактивного распада. Опасность для людей представляют и аварии на АЭС, сопровождающиеся выбросом радиоактивных продуктов распада в атмосферу..

Кроме того, АЭС могут быть объектами атаки при возникновении военных действий или террористов. Опасность возникновения аварий и террористических атак оценивается в 100 экологических баллов.

**Экологические характеристики гидроэнергетики.** В России на долю гидроэлектростанций (ГЭС) приходится около 22 % генерирующих мощностей [1].

ГЭС считают наиболее надежными и в экологическом отношении нейтральными, а в целом — более безопасными, чем другие традиционные виды энергетики. Однако это слишком оптимистичное мнение.

Общемировая статистика говорит о том, что из всех плотин высотой от 90 м и выше 21 % вызывает наведенную сейсмичность.

Безопасность гидротехнических сооружений определяется не только наведенной сейсмичностью, но и просчетами в проектировании, а также воздействием стихии, которые оцениваются в 50 экологических баллов.

Крупнейшими авариями за историю ГЭС являются: прорывы плотин в результате обильных осадков (Китай, Банкяо, 1975 г, сразу погибло 26 тыс. человек, после затопления утонуло еще 145 тыс, число пострадавших составило

11 миллионов); в результате обрушения оползня на водохранилище и вытеснения воды (Италии, Вайонт, 1963 г., погибло 2-3 тыс. человек); прорыв плотины (Пакистан, «Шакидор», 2005 г., погибло 130 человек); разрушение дамбы в результате военных действий (Японо-Китайской войны, Китай, 1938 г., погибло от 500 до 900 тыс. человек); по технологическим причинам (Россия, Саяно-Шушенской ГЭС, 2009 г., погибли 75 человек) [1].

Таким образом, работа ГЭС имеет ряд экологических особенностей:

- водохранилища ГЭС могут привести к наведенной сейсмичности;
- разрушение плотины ГЭС может привести к катастрофическому спуску воды из водохранилища, возникновению высокой волны, которая может уничтожить города, расположенные в долине реки ниже ГЭС;
- затопление земель, изымаемых из хозяйственного оборота;
- изменение климата в зонах водохранилищ;
- нарушение условий существования и нереста рыбы, сокращение рыбных запасов;

**Экологические аспекты ветроэнергетики.** Положительным фактором использования ветроэнергетики является то, что энергоустановки этого типа не генерируют вредных выбросов в атмосферу.

Опыт эксплуатации реально работающих ВЭУ позволил обнаружить ряд отрицательных явлений:

- затруднение приема телепередач;
- вред, наносимый животным и птицам;
- создание мощных инфразвуковых колебаний;
- создание механического и аэродинамического шумов.

В табл.3 для сравнения приведены уровни шумов от различных источников [3] и их отношение к пороговому значению.

Таблица 3.Уровни шумов от различных источников и их отношение к пороговому значению

| Источник шума | Уровень шума, У, дБ | $У/У_{порог}$ |
|---|---|---|
| Шум от ветрогенератора в непосредственной близости от оси ветроколеса | Около 100 | 0,83 |
| Шум от ветрогенератора на расстоянии 350 м | 35 - 45 | 0,29-0,37 |
| Шум от турбин реактивного двигателя на расстоянии 250 м | 105 | 0,58 |
| Шумовой фон в офисе | 60 | 0,5 |
| Шумовой фон ночью в деревне | 20 - 40 | 0,17-0,33 |
| Болевой порог человеческого слуха, $У_{порог.}$ | 120 | 1,0 |

**Экологические характеристики солнечной энергетики.** По сравнению с другими видами энергетики солнечная энергетика в целом является одним из наиболее чистых в экологическом отношении видов энергии. Однако избежать полностью вредного воздействия солнечной энергетики на человека и окружающую среду практически не удается, если учесть всю технологическую цепочку от получения требующихся материалов до производства электроэнергии. В этом плане производство полупроводниковых материалов для солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ), эксплуатация которых наносит минимальный вред окружающей среде, является весьма экологически опасным [4].

Наиболее опасны в этом отношении кадмий Cd, а также Ga, As и Te. Длительное вдыхание паров кадмия может привести к легочным или бронхиальным заболеваниям и даже летальному исходу. Постоянное воздействие малых доз кадмия ведет к его накоплению в почках и их заболеванию [4].

Весьма токсичны и некоторые соединения селена. Например, SeH, $SeO_2$ — отрицательно влияют на органы дыхания. Выработавшие свой ресурс солнечные модули на основе CdTe можно классифицировать как потенциальные ядовитые отходы и по возможности возвращать их изготовителям. По аналоги с проблемой отработавших ТВЭЛ-ов АЭС экологическое влияние их оценивается на 10 баллов.

Таким образом, в солнечной фотоэнергетике наиболее вредным для человека и окружающей среды является технологический процесс получения солнечных элементов, их хранения и утилизации.

Среди других аспектов отрицательного влияния солнечной энергетики на социально-экологические условия в стране следует отметить землеемкость из-за весьма рассеянного характера поступления солнечного излучения на Землю.

Для сравнения с другими типами энергетических установок в табл. 4 приведены экспертные оценки их землеемкости [4].

Таблица 4. Землеемкость разных типов энергетических установок [4]

| Тип | Биоэнергетические | ГЭС | ВЭС | Солнечный пруд | ГеоТЭС | АЭС | СФЭУ | ТЭС без топливной базы | БСЭС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Землеемкость, га/МВт | 20 | 10 | 10 | 8 | 1,9 | 0,65-2,0 | 1-1,6 | 1,17 | 1,1 |

При эксплуатации БСЭС, а также СФЭС происходит заметное изменение климатических условий в данном месте, в том числе изменение почвенных условий, растительности, циркуляции воздуха вследствие затенения поверхности, с одной стороны, и нагрева воздуха — с другой. Из-за последнего меняется тепловой баланс влажности воздуха, направление и величина ветров.

Низкий коэффициент преобразования солнечного излучения в электроэнергию ведет к появлению проблем, связанных с охлаждением конденсата. При этом тепловые выбросы в атмосферу на СЭС более чем в два раза превышают аналогичный сброс от ТЭС.

В табл. 5 приведены значения некоторых ключевых для окружающей среды эмиссий, рассчитанных по полному циклу производства электричества, для разных источников энергии, используемых для получения электроэнергии на разных типах электростанций и даны значения отношений количества выбросов $SO_2$ и $NO_X$ к ПДК в $м^3$ рабочей зоны.

Таким образом, экологические характеристики энергетики, основанной на сжигании углеводородных видов топлива (тепловой энергетики), атомной энергетики, гидроэнергетики, солнечной и ветровой энергий проявляются в таких процессах и явлениях, как:

- изъятие территорий для добычи топлива, размещения электростанций и линий электропередачи, захоронения отходов;
- загрязнение атмосферы и литосферы продуктами сгорания (выбросы в атмосферу, шлаки, радиоактивные отходы и т. п.);
- тепловое (термическое) загрязнение — сброс тепловой энергии электростанций в окружающую среду и повышение температуры среды;

- электромагнитное загрязнение — образование электрических, магнитных и электромагнитных полей, затрудняющих связь и создающих угрозу для человека и биосферы;
- радиоактивное загрязнение и загрязнение различными химическими соединениями;
- затопление полезных территорий водохранилищами гидроэлектростанций (ГЭС);
- воздействие на климат;
- воздействие на флору и фауну;
- «наведенная» сейсмичность - возникновение землетрясений при создании энергоустановок, в первую очередь гидроэлектростанций;
- создание шумов;
- опасность возникновения аварий и террористических атак.

Таблица 5. Эмиссии различных электростанций по полному циклу производства электроэнергии (г/кВт·ч) и их отношения к ПДК в м$^3$ воздуха рабочей зоны

| Электростанции | Выбросы, В | | | $B_{SO2}$/ПДК | $B_{NOx}$/ПДК |
|---|---|---|---|---|---|
| | $CO_2$ | $SO_2$ | $NO_X$ | | |
| Большие ГЭС | 9 | 0,03 | 0,07 | 3 | 14 |
| Малые ГЭС | 3,6 - 11,6 | 0,009 - 0,024 | 0,003 - 0,006 | 0,9 – 2,4 | 0,6 – 1,2 |
| Солнечные фотоэлектростанции | 98 - 167 | 0,20 - 0,34 | 0,18 - 0,30 | 20 – 34 | 36 – 60 |
| Солнечные тепловые станции | 26 - 38 | 0,13 - 0,27 | 0,06 - 0,13 | 13 – 27 | 12 – 26 |
| Ветроэлектростанции | 14,9 | 0,02 - 0,09 | 0,02 - 0,06 | 2 – 9 | 4 – 12 |
| Геотермальные станции | 79 | 0,02 | 0,28 | 2 | 56 |
| Электростанции на угле | 1026 | 1,2 | 1,8 | 120 | 360 |
| Электростанции на природном газе (комбинированный цикл) | 402 | 0,2 | 0,3 | 30 | 60 |

Введя исходные экологические данные для разных энергосистем на основе возобновляющихся и невозобновляющихся источников энергии, приведенные в таблицах 1 – 5, программа “Optimum” [5] производит сравнительную оценку экологического влияния разных систем.

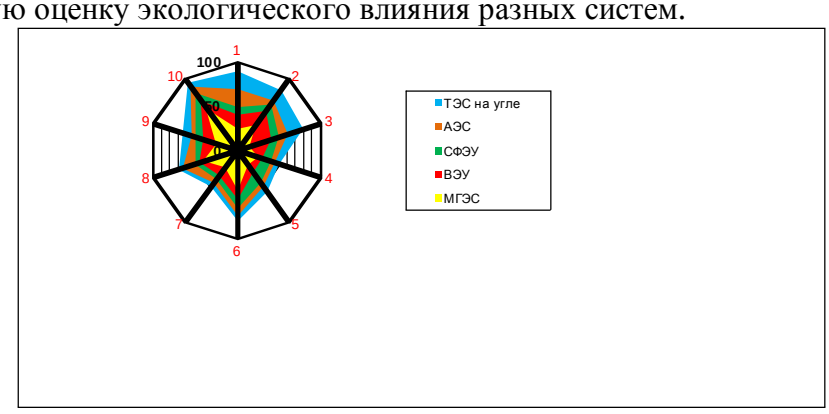



Рис.1. «Паук-ЦИС» диаграмма

Оценка осуществляется построением диаграммы в полярных координатах "паук-ЦИС" (рис.1). На оси наносятся значения показателей. Оценка экологического влияния разных систем осуществляется по площади

очерчивающей "паук-диаграммой", определяемой как сумма площадей треугольников.

Чем большее площадь "паук-диаграммы", тем большее вредное воздействие на окружающую среду оказывает данный способ производства энергии.

Полученные значения площадей (табл.6) сравнимы с штрафными экологическими баллами используемыми для учета отрицательного влияния различных типов энергоустановок на окружающую среду [4].

Таблица 6. Площади "паук-диаграмм" рассчитанных программой “Optimum” по экологическим критериям и штрафной экологический балл для различных электростинций

| Тип станции | Площадь "паук-диаграммы" по экологическим критериям | Штрафной экологический балл по [4] |
|---|---|---|
| ТЭС на угле | 20645 | 1735 |
| ТЭС на газе | 885 | 267 |
| АЭС | 5736 | 672 |
| СФЭУ | 1677 | 461 |
| ВЭУ | 356 | 65 |
| МГЭС | 34 | 5 |

Таким образом, для сравнительной оценки экологического влияния различных систем электроснабжения можно использовать разработанную методику и программу “Optimum” [5].

**Литература:**

1. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебн. пос. / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: КНОРУС, 2010. – 232с.
2. Энергетика в современном мире: Научное издание / В. Е. Фортов, О. С. Попель – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. -168с.
3. Енохович А.С. Справочник по физике. -2-еизд., перераб. и доп. М.: Просвещение. 1990. 384с.
4. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276с.
5. *Бабаев Б.Д., Баламирзоев А.Г.* Программа ”Оптимизация системы тепло- и энергоснабжения автономного потребителя ”Optimum”. С. №2002611012, РФ.

# ДОКЛАДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

## РЕСУРСНАЯ БАЗА, СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ЭФИОПИИ

Иванов М.Г.[1], Нефедова Л.В.[2]

[1] *ФГБОУ Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации;*
*Москва, Россия; 119454, Москва, Проспект Вернадского 76; e-mail: mikeivanov@yahoo.com*

[2] *ФГБОУ Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова;*
*Москва, Россия; 119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, д. 1, корп. 19, e-mail: nefludmila@mail.ru*

Благодаря своему географическому положению в восточной части Африки, Эфиопия относится к тем странам данного континента, которые обладают значительными геотермальными ресурсами. Эти ресурсы приурочены к Эфиопской рифтовой зоне и Афарской депрессии, являющимися частями Большого Восточно-Африканского разлома. Зона Эфиопского Рифта простирается от границы с Кенией до Красного моря в С-СВ направлении протяженностью около 1 тыс. км и занимает площадь в 150тыс. км$^2$ (рис.1).

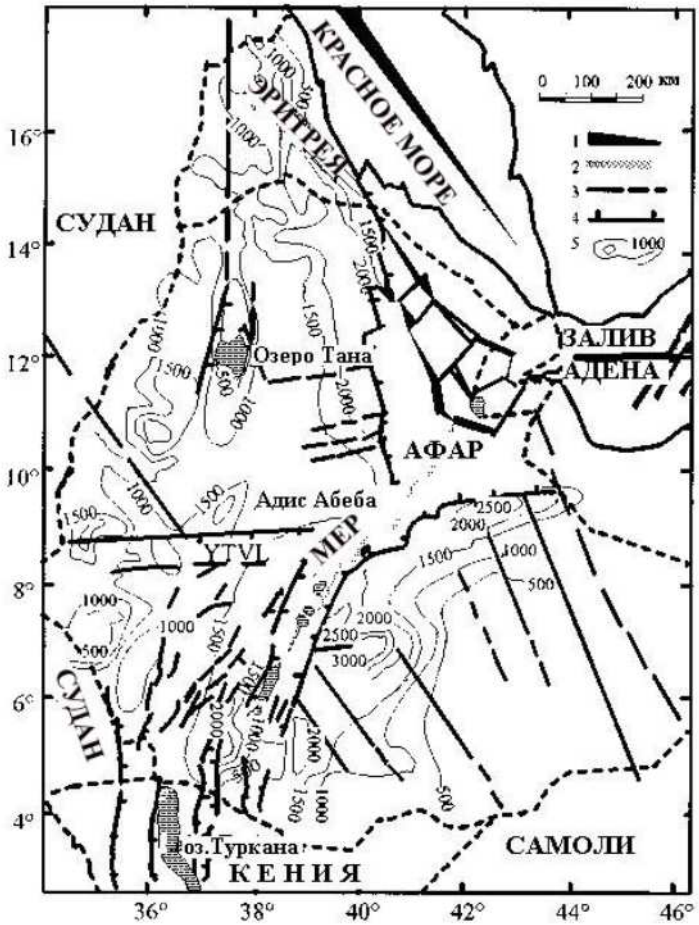



Рис.1. Структурная карта территории Эфиопии [1]

С давних времен население страны использовало гидротермальные ресурсы в бытовых и лечебных целях. Столица государства Аддис-Абеба была основана на горячих источниках на горе Энтото императором Менеликом по желанию его супруги Тайту Бытул. Первоначально название города звучало как «Финфин», что на языке народа оромо означает «горячие источники». Горячие термальные воды используются в отелях г. Адама (бассейны и пр.). Кипящие выходы термальных вод - фумароллы туристы могут наблюдать в национальном парке Абиятта-Шала.

1) Главная ось расширения океанической коры, 2) Ось континентального рифта, 3) Рифтовая секущая структура, 4) Главный разлом, 5) Изолинии абсолютных отметок кровли до кембрийского фундамента *(Перевод Белоусова В.И.)*

Первые научные исследования геотермальных ресурсов страны были предприняты в 1969году, после создания Геологической службы Эфиопии (Geological Survey of Ethiopia -GSE). Данная государственная научно-производственная структура была была организована в 1968г., для проведения плановых геологических изысканий в стране. Региональное геологической картирование М 1:2500000 выполнено на трети территории страны. GSE имеет хорошо оснащенную лабораторию, имеющую в распоряжении современное оборудование, необходимое для исследования и анализа образцов осадочных и скальных пород, подземных о геотермальных вод, нефти и газа. Гидрогеологическое картирование выполнено на территории около 35% площади страны с различной масштабной точностью, в том числе 13% М 1: 250000 [4].

Значительное место в разработках Геологической службы Эфиопии занимают вопросы исследования геотермальных ресурсов страны. За период исследований было выделено 16 геотермальных полей, перспективных для выработки электроэнергии. Значительно большее число термальных участков пригодно для использования в сельском хозяйстве и агроиндустрии. Была составлена схема размещения наиболее перспективных геотермальных полей зоны Эфиопского Рифта (рис.2): а) озерный район - Aluto-Langano ($t_{max}$ 350$^{o}$C), Corbetti, and Abaya; б) район Южного Афара - Tulu-Moye, Gedemsa, Dofan, Fantale, Meteka, Teo, Danab; в) район Северного Афара - Tendaho and Dallol (Danakil Depression).

Районы находятся на разной стадии изученности. С середины 80-х годов разведочное бурение велось на геотермальных полях Aluto-Langano, а в начале 90-х – и в районе Tendaho. В районе Aluto-Langano в период 1981-1985гг. было пробурено восемь скважин с максимальной глубиной до 2500 м, четыре из них были потенциально продуктивными, с максимальной температурой флюида в них - около 350$^{o}$C. В 1999г. на базе данных скважин была построена пилотная геотермальная станция мощностью 7,3 МВт. Однако станция не работала на полную мощность в связи с техническими проблемами и недостаточной квалификацией эксплуатационной группы. В 2005г. правительственная Электроэнергетическая компания после проведения тендера, заключила контракт с американской фирмой Geothermal Development Associates (GDA).

Исследования Геотермальных полей Tendaho были начаты с экономической и технической помощью Италии в 1979-1980гг. Позднее в период 1993-1998 гг. было выполнено разведочное бурение трех глубинных скважин (до 2100м) и трех мелких (около 500 м). Температура флюида была определена порядка 270$^{o}$C [7].

Согласно отчету GSE в период с 2006-2010гг. было выполнено

глубинное бурение скважин с целями оценки и исследования геотермальных ресурсов страны суммарной протяженностью 8500 м [7]. GSE выполняет заказы по контрактам на информационное и техническое обеспечение заказчиков. Только за 2011-2012 финансовый год Геологическая служба Эфиопии получила доход в 16 млн. бырр. (около 900 тыс. долл США), оказывая услуги консультации в области геотермии, бурения и лабораторных исследований [8].

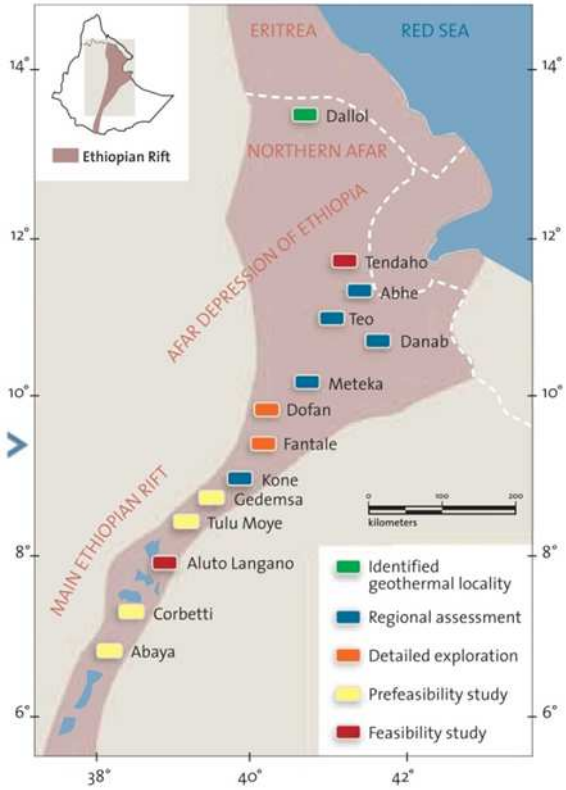



Рис.2. Расположение участков, богатых геотермальными ресурсами, различной степени изученности на территории Эфиопии. Источник: Geological Survey of Ethiopia

Значительным результатам по изучению геотермальных ресурсов в стране способствовало создание международной Геотермальной программы африканской рифтовой зоны (African Rift Geothermal Development Facility (ARGeo)). Она была организована в 2003г. при поддержке Международной организации окружающей среды (GEF), в целью содействия изучению и освоению геотермальных ресурсов в Восточной Африки и уменьшению рисков, связанных с их использованием. Программа включает следующие государства: Кения, Эфиопия, Джибути, Танзания, Уганда, Эритрия, Малави, Руанда и Замбия. Финансирование деятельности ARGeo осуществляется через Международный банк (WB) в размере 13 млн. долл. США, при общей стоимости данного проекта 17,5 млн. долл США. В проекте участвуют также Исландское агентство международного развития (ICEIDA), Германский федеральный Институт наук о Земле и природных ресурсах (BGR), Геотермальная Программа Университета ООН и Международное агентство по атомной энергетике (IAEA). Первая конференция ARGeo-1 состоялась в Аддис-Абебе в 2006. Далее через два года в 2008 г. – в Уганде, в 2010г.- в Джибути, и в ноябре 2012г. ARGeoC-4 состоится в столице Кении – Найроби. Кения является лидером среди африканских стран по использованию геотермальных ресурсов. Суммарная установленная мощность ГеоЭС составляет - 209 МВт (около 15% от суммарной установленной мощности ЭС страны), на 50 гектарах цветочных оранжерей используются термальные воды. В ближайшие четыре года планируется ввод в действие еще 2-х ГеоЭС

суммарной мощностью более 700 МВт (316 Мвт в Olkaria and 400 МВт в Menengai) при оценках потенциала мощности ГеоЭС в Кении в 4000 МВт.

**О состоянии энергетики в Эфиопии**. Проблема энергообеспечения населения и промышленности является в стране одной из самых первоочередных для дальнейшего экономического развития. Около 88% потребляемой энергии в стране составляет биомасса (дрова, листья, навозные брикеты). В Эфиопии к настоящему времени минимальна разработка собственных топливных ресурсов, в частности на газоконденсатном месторождении Кэлуб в районе Огадена малазийской монополией Petronas. Поскольку геологические карты имеются только на 25% территории страны, работы по поиску природного газа и нефти продолжаются. Страна не имеет выхода к морю и современной сети железных дорог для транспортировки органического топлива. При этом в Эфиопии весьма высок потенциал возобновляемых энергоресурсов, особенно гидроэнергии. По оценкам государственной Эфиопской электроэнергетической корпорации (Ethiopian Electric Power Corporation - EEPCo), выполненным при содействии иностранных специалистов, суммарный технический потенциал ВИЭ на территории страны составляет 60000МВт, из которых 45000 – гидроэнергия, 10000 МВт – ветроэнергетические ресурсы и 5000 МВт – геотермальные ресурсы [3].

В 1991г. установленная мощность электростанций составляла лишь 370 МВт, и только 8% населения имели доступ электроснабжению. За 20-ти летний период было сооружен ряд крупных и малых ГЭС и к 2012г. установленная мощность ЭС составила 2100 МВт, при этом около 97% электроэнергии вырабатывается на ГЭС. Согласно пятилетнему Плану Развития и Преобразования (ПРП) к 2015г. намечено достижение суммарной установленной мощности ЭС в 10000 МВт и соответственно увеличение доступа к электроэнергии с 47% в 2010г. до 75%, при этом доля установленной мощности ГеоЭС будет увеличена до 1,3 % (77,3 МВт) [5].

Министерством водных ресурсов и энергетики Эфиопии в январе 2012г. был разработан инвестиционный план Программы развития использования ВИЭ (SREP) [6]. Уже в 2012г. планирует начать сооружение геотермальной электростанции Aluto Langano мощностью 70-75 МВт при финансовой поддержек международных фондов, в том числе Программы развития возобновляемой энергетики в бедных странах в рамках Климатических инвестиционных фондов (CIF) [2]. В перспективе существуют также еще пять проектов дальнейшего включения электроэнергии ГеоЭС в энергобалланс страны (проведено бурение и технические оценки геотермальных ресурсов) (табл.1). Планируется, что средства на данные проекты также будут выделены из фонтов CIF. [6].

Действующая ГеоЭС Aluto Langano, мощностью 7,3 МВт построена в 1998 г. в 200 км к югу от Аддис-Абебы в рифтовой долине. Общая площадь используемых геотермальных ресурсов составляет порядка 8 км$^2$ и находится на высоте 1880-2100 метров. Государственная компания EEPCo координирует деятельность по развитию проекта нового проекта ГеоЭС Aluto Langano и распределению средств в соответствии с международными и национальными стандартами.

Организации, принимающие участие в работе надо проектом:

1. *Geological Survey of Ethiopia, GSE* – геофизическая, геохимическая и геологическая деятельность, бурение скважин;
2. *Отдел планирования EEPCo* – оценка влияния на окружающую среду;

*Сектор производства EEPCo* – направление инженеров со знаниями геотермальной энергетики на работу над проектом.

Таблица.1. Перспективный план развития геотермальной энергетики в Эфиопии до 2018г.

| | Район размещения | Проектная мощность (МВт) | Проектный срок введения в эксплуатацию |
|---|---|---|---|
| 1 | Aluto Langano | 75 | 2015 |
| 2 | Tendaho | 100 | 2018 |
| 3 | Corbetti | 75 | 2018 |
| 4 | Abaya | 100 | 2018 |
| 5 | Tulu Moye | 40 | 2018 |
| 6 | Dofan Fantale | 60 | 2018 |
| Всего: | | 450 | |

По данным исследований, энергетический потенциал района Aluto составляет около 100 МВт. Планируется бурение дополнительных скважин и строительство новой геотермальной электростанции с потенциалом 75 МВт. Строительство будет осуществляться на средства, выделенные правительствами Эфиопии и Японии, а также за счет средств кредита Всемирного банка, являющего крупнейшим из международных инвестиционных банков (Multilateral development banks (MDBs) (табл.2).

Проект будет выполнен в два этапа: первый будет состоять в бурении четырех оценочных скважин, а второй – в бурении пяти производственных скважин, трех обратных скважин для закачки флюида и строительстве новой электростанции. В результате новая электростанция будет производить от 35 до 75 МВт. Глубина бурения производственных скважин составит 2500 м. Сроки реализации проекта 2012-2016 гг.

Таблица 2. Геотермальные проекты в Эфиопии, их стоимость и источники финансирования до 2016г. (в млн. долл. США)

| № | Проект | Общая стоимость | Источники финансирования | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Пр-во Эфиопии | SREP | MDBs | Другие |
| 1 | *Освоение геотермального поля Aluto Langano* | 231,2 | 78,7 | 26,0 | 60,0 | 66,5 |
| 1.1 | Проект сооружения ГеоЭС Aluto Langano | 229,2 | 78,2 | 24,5 | 60,0 | 66,5 |
| 1.1.1 | Бурение оценочных и производственных скважин | 93,0 | 42,0 | 24,5 | 10,0** | 16,5* |
| 1.1.2 | Строительство электростанции и линии передач | 136,2 | 36,2 | - | 50,0 | 50,0*** |
| 1.2 | Разработка долгосрочной стратегии | 2,0 | 0,5 | 1,5 | - | - |
| 2 | *Освоение геотермального поля Tendaho* | 319,6 | 60,85 | 10,0 | 188,0 | 60,75 |

* 10 млн. долл. США будет выделено правительством Японии. Оставшиеся 6,5 млн. долл. США будут получены из других источников;
** Финансирование Всемирного Банка;
*** По предварительному соглашению, средства будут выделены правительством Японии.

Отдельной частью данного этапа правительства Эфиопии по развитию геотермальной энергетики является разработка долгосрочной стратегии. Она будет включать анализ существующих проектов и ресурсов и возможности

развития. Отдельно выделена необходимость привлечения частного сектора как источника оборудования, инвестиций, опыта и знаний. Сроки создания стратегии 2012-2013 гг.

Вторым разделом перспективного планирования к освоению является геотермальный район Тендахо находится на северо-востоке Эфиопии, на расстоянии 600 км от Аддис-Абебы. В 1990-ые годы при проведении оценочного бурения разведочных скважин энергетический потенциал района был оценен в 100 МВт. По предварительным данным геологические условия не позволяли начать производственную разработку, однако новые исследования, проведенные германскими геологами в рамках United Nations Environment Programme (UNEP) говорят о том, что разведочные скважины не достигли основного резервуара и имеются все возможности для начала разработки района. На настоящий момент продолжается изучение геотермальной области Тендахо при поддержке French Development Agency (AFD) и UNEP.

Согласно программе SREP Эфиопии работы по разработке геотермального района Тендахо будут вестись в три стадии:

1. Проведение исследовательской работы;
2. Оценочное бурение (бурение нескольких скважин и, в случае положительных результатов, строительство электростанции мощностью 30 МВт);
3. Производственное бурение и установка электростанции мощностью 70 МВт.

Сроки реализации проекта 2012-2016 гг.

В соответствии с долгосрочными планами Правительства Эфиопии намечено дальнейшее активное освоение геотермальных ресурсов страны для целей создания ГеоЭС. При этом доля геотермальной энергетики в энергобалансе страны должна возрасти до 7,4% к 2030г.(табл.3).

Таблица 3. Государственные планы по развитию геотермальной энергетики в Эфиопии

| Год | Установленная мощность ГеоЭС, МВт | Годовая выработка электроэнергии на ГеоЭС, ГВт.час | Доля в ГеоЭС электроэнергетике страны |
|---|---|---|---|
| 2011 | 7,3 | 49 | 0,60 % |
| 2015 | 77,3 | 571,0 | 1,40 % |
| 2030 | 1000,0 | 7446,0 | 7,49 % |

Рассмотренные перспективные планы Правительства Эфиопии, показывают предстоящий обширный объем работ по дальнейшему изучению и освоению геотермальных ресурсов страны. Правительственные структуры открыты к привлечению иностранных исследовательских и производственных компаний для выполнения работ. Значительная доля финансового обеспечения планов приходится на международные экологические инвестиционные фонды и иностранные инвестиционные банки. Еще в 2008г. Посольство Эфиопии проводило в Москве семинар, направленный на привлечение российских компаний к инвестированию и осуществлению проектов геотермальной энергетики страны. Опыт российских компаний по проведению работ, связанных с выполнением проектов геотермальной энергетики может быть важен и востребован при проведении крупномасштабной программы Эфиопии по освоению геотермальных ресурсов страны.

**Литература:**

1. *Berhe, S.M., Desta, B., Nicoletti, M. and Teferra, M.* (1987). Geology, geochronology and geodynamic implication of the Cenozoic magmatic province in W and SE Ethiopia. *Jnl. Geol. Soc., London*, vol. 144, 213-226.

2. Climate Investment Funds /The Program on Scaling-Up Renewable Energy in Low Income Countries (SREP) http://www.climateinvestmentfunds.org/cif/srep
3. Ethiopian Electric Power Corporation (EEPCo)- http://www.eepco.gov.et
4. Facts In Brief 2010/11.
5. Geological Survey of Ethiopia - http://www.geology.gov.et/
6. Growth and Transformation Plan (GTP) 2010/11-2014/15, Ministry of Finance and Economic Development (MoFED), The Federal Democratic Republic of Ethiopia, September 2010, Addis Ababa, 85pp.
7. Scaling - Up Renewable Energy Program /Ethiopia Investment Plan (Draft Final), Federal Democratic Republic of Ethiopia,Ministry of Water and Energy/ January 2012, 81p.
8. *Teklemariam M. and K. Beyene K.* Geothermal Exploration and Development in Ethiopia. Proceedings of the African Rift Geothermal Development Facility (ARGeo) Conference 2006, Addis Ababa, Ethiopia.
9. The biggest Ethiopien business portal - http://2merkato.com

# ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБОСОБЛЕННЫХ НАУЧНЫХ СТАНЦИЙ

Иванин О.А., Директор Л.Б., Майков И.Л.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва, 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: oleggin2006@yandex.ru*

**Введение.** По оценкам специалистов 2/3 территории России находятся вне зон централизованного энергоснабжения [1]. Как правило, это небольшие поселения, научные и наблюдательные станции, погранзаставы, небольшие промышленные и сельскохозяйственные предприятия. Из-за проблем с подвозом топлива, низкой надежностью локальных распределительных сетей, высокой себестоимостью энергии задача гарантированного энергоснабжения с максимальным использованием местных топливно-энергетических ресурсов, в т.ч. возобновляемых, является весьма актуальной.

Только академические институты имеют в своей структуре несколько десятков обособленных научных станций (НС) и филиалов. Если учесть университеты и Росгидромет, подобных объектов на территории России насчитывается несколько сотен. Характерные проблемы, присущие практически всем НС, связаны с неэффективной структурой и недостаточной надежностью энергоснабжения, что выражается в чрезмерно высокой стоимости энергоресурсов, негативном влиянии на экологию, приводит к срыву дорогостоящих научных экспериментов. Кроме того, условия постоянного проживания ученых и инженерно-технических специалистов, а часто и их семей, далеки от современных стандартов.

В настоящее время нет четкого понимания, как в каждом отдельном случае, с учетом конкретных требований и местных условий, эффективно решать задачи энергоснабжения обособленных и автономных объектов. Необходим комплексный, системный подход с широким использованием методов математического моделирования, современных численных методов и оптимизационных процедур, результатов стендовых испытаний. В соответствии с современными подходами к формированию структуры автономных энергетических комплексов они должны строиться с учетом местных топливно-энергетических ресурсов, максимального использования установок на ВИЭ, накопителей электрической и тепловой энергии. Отдельной задачей является согласование нагрузки энергокомплекса с внешней сетью. Эффективная эксплуатация подобных комплексов возможна только при наличии современной интеллектуальной системы управления, основой которой является набор программ, обеспечивающих функционирование системы управления [1].

**Постановка задачи.** Энергетические комплексы малой энергетики могут включать в себя как традиционные установки (котельные, энергоустановки на ДВС), так и установки на ВИЭ (ВЭУ, ФЭП, солнечные водонагреватели, установки, использующие биотопливо) и различные накопители электрической и тепловой энергии. Состав подобных комплексов определяется требованиями потребителя энергии, местными климатическими и метео- условиями, топливной базой, технологическими возможностями взаимодействия с внешними сетями. Кроме того, при использовании местных видов топлива (низкокалорийных углей, торфа, растительных сельскохозяйственных и древесных отходов) в состав энерготехнологического комплекса могут входить термохимические реакторы

(газификация, пиролиз) и вспомогательные устройства, которые должны быть согласованы с энергоустановками.

При определении оптимального состава энергокомплекса необходимо учитывать характерные времена изменения нагрузок и внешних условий (суточные, недельные, сезонные), в связи с чем расчетный интервал задачи оптимизации должен составлять один год с часовыми последовательностями изменения всех энергетических величин и метеоусловий. В результате решения оптимизационной задачи, помимо оптимальной конфигурации комплекса, определяются режимные карты работы всего оборудования энергокомплекса при условии неизменности заложенных графиков изменения нагрузок и метеоусловий (проектных, типовых, прогнозных, полученных путем статистической обработки данных многолетних наблюдений). По сути, это решение является алгоритмом работы системы управления энергокомплексом в «стандартных» условиях.

Вторая часть оптимизационной задачи – определение реакции системы управления на случайные отклонения энергетических нагрузок и метеоусловий от заложенных «стандартных» графиков. Если для решения первой задачи время машинного счета ограничено только разумными пределами, вторая задача должна решаться в режиме реального времени, что, учитывая огромный объем обрабатываемой информации, требует разработки специальных алгоритмов и эффективных численных методов.

Математическая модель строится на базе математических моделей входящих в энергокомплекс элементов и связей между отдельными модулями, определяемыми балансом потоков электрической и тепловой энергий. Элементы энергокомплекса, как правило, представляют собой нелинейные динамические объекты, характеризующиеся большим диапазоном изменения постоянных времени. Поведение подобного энергокомплекса описывается жесткой нелинейной системой дифференциальных уравнений [3], решение которой на больших характерных интервалах времени без значительного упрощения моделей отдельных элементов затруднительно. В связи с этим необходим компромисс между степенью детализации моделей элементов комплекса и реальной возможностью расчетов оптимальных режимов эксплуатации энергоустановок на современных персональных компьютерах.

В составе энергокомплекса можно выделить 6 групп взаимодействующих между собой компонентов (рис.1):

1) Традиционные энергоустановки, использующие ископаемые топлива или соответствующим образом подготовленное биотопливо. Установки такого типа являются полностью управляемыми, и для моделирования режимов их работы, как правило, имеется исчерпывающая априорная информация.

2) Энергетические установки на возобновляемых источниках энергии (солнечной и ветровой) относятся к классу плохо управляемых (в западной литературе – non-controllable). В связи со стохастическим характером изменения внешних условий (солнечной радиации, скорости и направления ветра) только часть информации является априорной (например, технические характеристики ФЭП и ВЭУ).

3) Электрохимические и тепловые аккумуляторы. При этом необходимо учитывать динамические характеристики аккумуляторов, скорости и глубину заряда/разряда электрохимических аккумуляторов, допустимое количество циклов заряда/разряда в зависимости от глубины разряда, эффект «памяти» (гистерезис).

4) Внешняя электрическая сеть. Возможны два случая: сеть является

бесконечным по сравнению с мощностью энергокомплекса источником или стоком энергии; мощность сети соизмерима с мощностью энергокомплекса (например, локальная сеть из нескольких энергокомплексов), что накладывает свои ограничения на возможность обмена энергией.

5) Потребитель энергии, который характеризуется частично априорной информацией (типовые графики изменения энергетических нагрузок), частично информацией стохастического характера – случайные отклонения от прогнозных нагрузок.

6) Блок термохимической конверсии биоотходов в топливный газ.

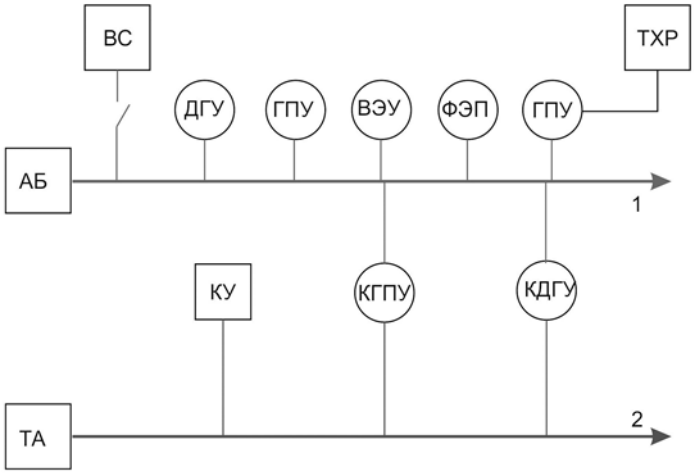



Рис.1. Структурная схема автономного энергокомплекса (АЭК) (ВС – внешняя электрическая сеть; АБ – аккумуляторная батарея; ДГУ – дизель-генераторная установка; ГПУ – газопоршневая электростанция; ВЭУ – ветроэнергетическая установка; ФЭП – фотоэлектрическая установка; ТХР – термохимический реактор; ТА – тепловой аккумулятор; КУ – котельная установка; КГПУ – газопоршневая мини-ТЭЦ; КДГУ – дизель-генераторная мини-ТЭЦ; 1 – электроэнергия к потребителю; 2 – тепло к потребителю)

В рамках поставленной задачи детальные модели компонентов комплекса – модели внутренних процессов (процессы горения и сжатия в цилиндрах ДВС, кинетика реакций в электрохимических аккумуляторах, элементарные фотоэлектрические процессы в ФЭП, модели элементов ВЭУ и т.п), определяющих основные характеристики оборудования, не рассматриваются. Для построения модели всего комплекса и решения задач оптимизации необходимо определить набор входных параметров и, с учетом известных технических характеристик конкретного оборудования и дополнительных ограничений, определить набор функциональных зависимостей выходных параметров, характеризующих динамическую реакцию устройства на изменение входных значений.

На втором этапе работы необходимо сформулировать оптимизационную задачу, решение которой определит состав энергокомплекса и номинальные характеристики входящих в него элементов. При этом на первом шаге в обобщенной схеме комплекса, исходя из условий конкретной задачи, учитываются все возможные генерирующие и накопительные устройства и, в зависимости от полученных результатов расчетов, на следующем шаге из схемы исключаются установки, коэффициент использования мощности которых составляет малую величину, после чего расчет повторяется для новой схемы.

В результате решения первой оптимизационной задачи, помимо определения конфигурации энергокомплекса, определяются режимные карты работы всего оборудования, и это решение является алгоритмом работы системы

управления энергокомплексом в «стандартных» условиях. На заключительном этапе необходимо построить алгоритм, который должен определять реакцию системы управления на случайные отклонения внешних параметров от заложенных «стандартных» значений, по сути, разработать алгоритм адаптивной системы управления. Алгоритм такой системы управления основан на корректировке режимов работы компонентов энергокомплекса таким образом, чтобы вся система на новом промежутке времени перешла в новое оптимальное состояние.

**Математическая модель и программная реализация.** Математическую формулировку модели энергокомплекса можно записать в виде системы уравнений баланса потоков тепловой и электрической энергии в каждый момент времени

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{NN} k_i W_i(t, \boldsymbol{\eta}_i) = N_W(t), \\ &\sum_{i=1}^{NN} k_i N_i(t, \boldsymbol{\xi}_i) = N_N(t), \end{aligned} \qquad (1)$$

где $NN$ – общее количество элементов энергокомплекса; $k$ – количество элементов $i$-го типа; $W_i$ и $N_i$ – положительные или отрицательные потоки тепловой и электрической энергии (мощности) от элемента $i$-го типа в момент времени $t$; $N_W$ и $N_N$ – тепловая и электрическая мощности потребителя в момент времени $t$; $\eta_i$ и $\xi_i$ – векторы переменных, от которых зависят тепловая и электрическая мощности элемента $i$-го типа в момент времени $t$ (например, это могут быть зависимости КПД от мощности, различные функции тепло- и электропотерь, метеорологические и климатические внешние условиях и т.п.).

Система уравнений (1) дополняется ограничениями на величины тепловых и электрических потоков, соответствующие постановке задачи (предельные величины мощности, отбираемой от внешней сети, предельные величины мощности элементов энергокомплекса), и дополнительными соотношениями, определяющими динамические характеристики элементов энергокомплекса (математические модели элементов).

Целевая функция может быть представлена в виде

$$f_0 = \int_0^T \sum_{i=1}^{N} \left( c_i(t, N_i) k_i N_i(t, \boldsymbol{\xi}_i) + d_i(t, N_i) k_i W_i(t, \boldsymbol{\eta}_i) \right) dt, \qquad (2)$$

где $c_i$ и $d_i$ – себестоимости вырабатываемого ресурса (электрическая и тепловая энергия) элементом $i$-го вида; $T$ – рассматриваемый промежуток времени.

Полную систему уравнений (неравенств) (1) в векторно-матричном виде можно записать как

$$\begin{vmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_i & 0 \\ 0 & 0 & A_N \\ B_1 & B_i & B_N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_1 \\ X_i \\ X_N \end{vmatrix} (=, \le, \ge) \begin{vmatrix} D_1 \\ D_i \\ D_N \\ 0 \end{vmatrix}, \qquad (3)$$

где $A_i$ и $B_i$ – матрицы коэффициентов, $D_i$ – вектор правых частей, $X_i$ – вектор неизвестных.

Задача оптимизации состоит в минимизации целевой функции $f_0$, т.е. в решении системы уравнений (1) (определение состава элементов энергокомплекса и режимов работы всех элементов в каждый момент времени) с соответствующими ограничениями и дополнительными соотношениями, при

которых $f_0 \rightarrow \min$.

Поставленная таким образом задача оптимизации является нелинейной задачей условной оптимизации с частично дискретным множеством решений, для которой не существует методов решения в общем виде. Так как в практических задачах оптимизации тепловая и электрическая мощности потребителя полагаются постоянными в течение некоторого малого промежутка времени $\Delta t$ (например, $\Delta t$ = 1 ч), то общая задача оптимизации может быть сведена к решению системы алгебраических уравнений. При этом оптимизационная задача становится полностью определенной и может быть решена методами линейного или выпуклого программирования. При наличии нескольких источников электрической и тепловой энергии задача хотя и становится линейной, но частично целочисленной [4]. Соответствующие численные методы решения представлены в работах [5] – [7].

Разработанные математические модели и программные коды реализованы в программном комплексе EnergyOptim V.2, основой для построения которого явился разработанный в ОИВТ РАН пакет программ EnergyOptim V.1.1 [8]. Версия программы EnergyOptim V.2 разработана в среде программирования Delphi 6, имеет более широкие возможности и, по сути, является интеллектуальным ядром системы управления и диспетчеризации автономных энергокомплексов.

Структура программного комплекса приведена на рис.2.

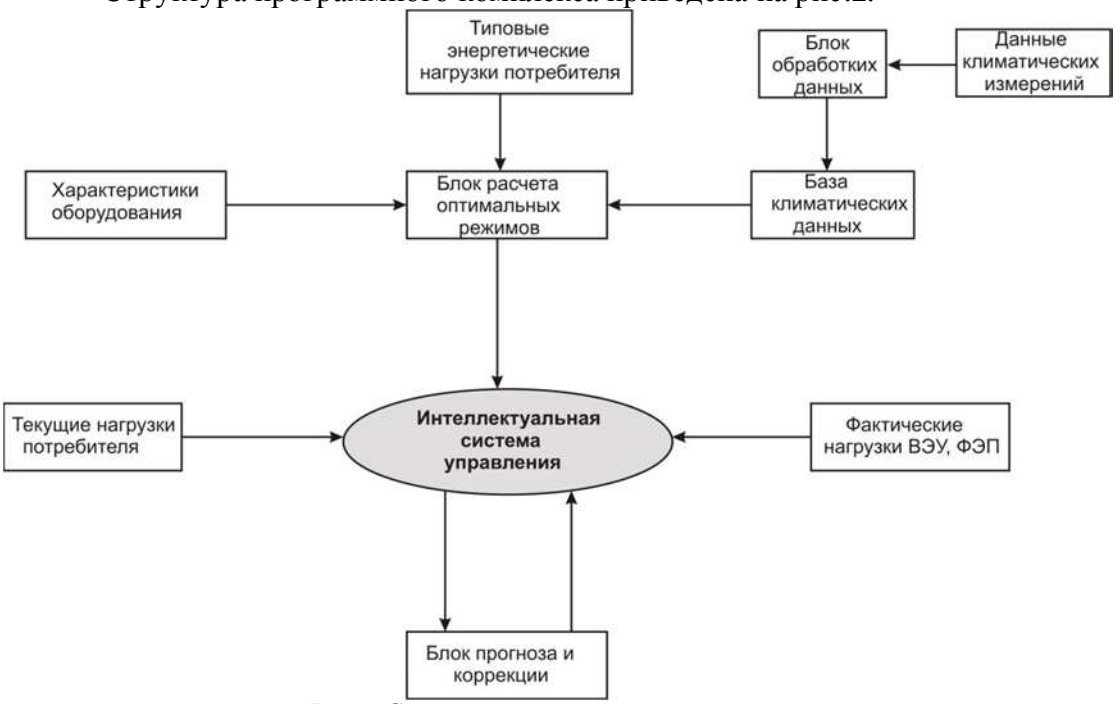



Рис.2. Структура программного комплекса

**Практическая реализация.** В качестве пилотных, демонстрационных объектов для практической реализации разрабатываемых подходов определены три характерные научные площадки: Научная станция РАН (НС РАН, Киргизский Алатау), Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО РАН, Западный Кавказ) и Филиал ОИВТ РАН в г.Махачкале (Ф ОИВТ РАН, Дагестан). Летом 2012г. сотрудниками ОИВТ РАН на площадках НС РАН и САО РАН проведен экспресс-энергоаудит и определены основные направления модернизации систем энергоснабжения. Экспресс-обследование Ф ОИВТ РАН запланировано на осень 2012г.

Научная станция РАН основана в 1978 году по решению Президиума Академии наук СССР для проведения опытно-методических работ по разработке методик прогноза землетрясений с использованием МГД-генераторов. НС РАН расположена на высоте 1750 м над уровнем моря в 30 км от г. Бишкек, численность сотрудников составляет 161 человек. Станция расположена на двух площадках, перепад высот между площадками 150 м.

Электроснабжение НС РАН осуществляется от централизованной сети. Учитывая, что по надежности электрообеспечения объект относится к I категории, на обеих площадках установлены резервные дизель-генераторы. Дизель-генераторы обеспечены системой автоматического запуска при отключении централизованной сети, при этом синхронизация с сетью по частоте и фазе тока отсутствует. При включении сети останов генераторов и переход на электроснабжение от сети производится автоматически. Электропотребление станции составляет более 2000 МВтч в год, свыше 50% расходуется в системе теплоснабжения.

Теплоснабжение обеспечивается электрокотельными. Максимальная тепловая нагрузка системы отопления составляет 0,42 Гкал/ч (ок. 500 кВт). Горячее водоснабжение обеспечивается индивидуальными электронагревателями, расположенными в зданиях станции. Схема теплоснабжения зависимая, регулирование температуры обеспечивается изменением мощности электрокотлов.

В процессе реализации программы энергосбережения на площадках Научной станции смонтированы солнечные водонагревательные установки (площадь коллекторов 52 $м^2$), тепловой насос для отопления гостиничного коттеджа, установлены резервные дизельные котлы.

Сегодня система энергоснабжения НС РАН представляет собой энергетический комплекс, объединяющий разнотипные источники энергии и внешнюю промышленную сеть. Эффективное управление подобным комплексом стало возможным в результате реализации первого этапа внедрения интеллектуальной системы управления. Система автоматического контроля и управления энергоснабжением построена на базе контроллера Siemens Simatic S7-1200.

Эксплуатация комплекса в течение года показала, что, помимо повышения надежности работы и удобства оперативного контроля и управления, за счет обеспечения оптимальных режимов эксплуатации оборудования затраты на энергоснабжение снизились на 7 %.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, расположенная в высокогорном районе Карачаево-Черкесии, является всемирно известным научным центром Российской академии наук, вносящим большой вклад в решение фундаментальных проблем исследования космического пространства, в том числе в рамках ряда крупных международных программ. САО располагает одним из крупнейших в мире оптическим телескопом с зеркалом диаметром 6 м и уникальным радиотелескопом с диаметром антенны 600 м (РАТАН-600). САО включает в себя 3 научные площадки:

- верхнюю научную площадку (ВНП) в 40 км от станицы Зеленчукской на высоте 2070 метров над уровнем моря (оптический телескоп);
- научную площадку на южной окраине станицы Зеленчукской (радиотелескоп РАТАН-600);
- нижнюю научную площадку (ННП) на берегу реки Большой Зеленчук – комплекс зданий и сооружений Обсерватории, включающий лабораторные и

административные корпуса, вычислительный центр и жилой поселок на 1000 человек с соответствующей инфраструктурой.

Годовое электропотребление САО составляет около 4500 МВтч, в том числе ННП – 2000 МВтч, ВНП – 1000 МВтч, РАТАН-600 – 1500 МВтч. Средняя суммарная нагрузка площадок САО в зимний день достигает 1420 кВт, в летний день – 650 кВт. Электрическая мощность установленного оборудования, требующего гарантированного бесперебойного электроснабжения (электроприемники 1 и 2 категорий) и соответственно нуждающегося в резервных источниках электроэнергии, составляет около 300 кВт.

ОИВТ РАН совместно с институтом «Ростовтеплоэлектропроект» разработаны рабочие проекты реконструкции систем энергоснабжения более 20 объектов САО. В связи с частыми перебоями в электроснабжении и большими рисками вывода из строя при отключении электропитания уникального астрономического и астрофизического оборудования и котельной жилого поселка, одной из ключевых задач было создание собственного источника энергоснабжения, в качестве которого установлена газопоршневая когенерационная энергоустановка (мини-ТЭЦ), обеспечивающая бесперебойное электроснабжение электроприемников 1 и 2 категорий и горячее водоснабжение жилого поселка.

Первым этапом создания системы диспетчеризации энергоснабжения САО стала система интеллектуального управления энергокомплексом в составе котельной и газопоршневой мини-ТЭЦ.

Реализация первых этапов программы энергосбережения позволила снизить затраты на энергоснабжение Обсерватории на 28% (3839,8 тыс. руб./год). При этом существенно повышена надежность энергоснабжения, улучшены экологическая обстановка и социальные условия работы и проживания сотрудников Обсерватории.

**Заключение.** Имеющийся опыт стендовых испытаний, результаты реализации первых этапов программ повышения энергоэффективности и энергосбережения на площадках НС РАН и САО РАН показывают, что реально достижимый эффект снижения потребления топливно-энергетических ресурсов на аналгичных площадках может достигать 30 % при среднем значении около 20 %. При этом, что наиболее важно, за счет повышения надежности энергоснабжения удастся избежать значительных материальных потерь, вызванных размораживанием систем теплоснабжения, выходом из строя уникальной аппаратуры, сбоями при проведении дорогостоящих научных экспериментов. Разработанные методики, расчетные программы и схемные решения могут быть с успехом применены и к другим аналогичным объектам: жилые поселки, сельскохозяйственные объекты, малые предприятия и т.п.

**Литература:**

1. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. 168 с.
2. *Директор Л.Б. и др*. Интеллектуальные системы управления автономными энергетическими комплексами в составе локальных распределительных сетей малой энергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 1. С. 38-49.
3. *Полак Л.С*. Вычислительные методы в химической кинетике / Л.С. Полак, М.Я. Гольденберг, А.А. Левицкий. – М.: Наука, 1984.
4. *Хемди А. Таха*. Ведение в исследование операций. – 7-е издание. –М.: Издательский дом Вильямс, 2005.
5. *Директор Л.Б., Майков И.Л.* Решение задач оптимизации сложных

энергетических систем // Управление большими системами / Сборник трудов. Выпуск 28. –М.: ИПУ РАН, 2010. С.274-291.

6. *Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л.* Метод оптимизации нестандартных схем энергокомплексов с когенерационными энергетическими установками // Изв. РАН. Энергетика. 2010. № 6. С.104-114.
7. *Майков И.Л., Директор Л.Б., Зайченко В.М.* Решение задач оптимизации энергетических систем с несколькими автономными энергоустановками / Управление большими системами. Сборник трудов. Выпуск 31. –М.: ИПУ РАН, 2010. С.110-129.
8. *Директор Л.Б., Майков И.Л.* «Программа оптимизации автономных энергетических комплексов». Свидетельство о регистрации в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации №20100616660 от 28 октября 2010г.

# ПРИРОДНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЭК

Кудинов А.А.

*ФГБОУ Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова*
*Москва, Россия; 119991, Ленинские горы 1, ГСП-1; e-mail: kanal13@mail.ru*

Одним из лидеров использования солнечной энергии среди регионов России является Республика Бурятия, которая характеризуется в настоящее время наибольшей установленной мощностью систем утилизации солнечной энергии (общая площадь установленных солнечных коллекторов, порядка 4 тыс. $м^2$).

В Республике Бурятия сформировался некоторый комплекс социально-экономических предпосылок, позволяющий найти ниши для развития возобновляемой энергетики и создания установок, преобразующих солнечную, ветровую энергию и гидроэнергию. В качестве экономических предпосылок можно рассматривать:

- в целом дефицитный энергетический баланс Бурятии – как в настоящее время, так и в прогнозных оценках;
- физический и моральный износ оборудования электростанций и электрических сетей, что делает во многих случаях рациональным создание автономных установок на ВИЭ для электроэнергоснабжения;
- структура сельскохозяйственного производства, в том числе наличие пастбищного животноводства и перспективы его дальнейшего расширения, что также заставит обратиться к использованию автономных ветровых и солнечных установок, как это долгие годы практикуется в соседней Монголии.

Для дальнейшего продвижения такого рода систем актуальным является сопоставление потребностей и возможностей для развития, и в первую очередь – оценка природных ресурсов с использованием различных источников данных и методов расчета. В связи с поставленной задачей нами на основе различных источников был создан массив данных и представлен в картографическом виде распределение ресурсов солнечной энергии на территории Бурятии.

Особенностью климата Бурятии является то, что в холодный период года здесь развит мощный северо-восточный отрог сибирского антициклона, который возникает в сентябре-октябре и исчезает в апреле-мае. В результате преобладающего действия антициклона зима характеризуется низкими температурами и большим количеством безоблачных дней. Зимой самые низкие температуры отмечаются в речных долинах и котловинах, где происходит застаивание и интенсивное выхолаживание воздуха. Средняя температура воздуха в январе -20÷30 ºС, а ее абсолютный минимум составляет -45÷55 ºС. Преобладает малооблачная, маловетреная или штилевая погода. В этот период существенных осадков не выпадает и поэтому мощность снегового покрова невелика. Суровая безветренная зима сменяется поздней ветреной и сухой весной с ночными заморозками. Барометрическое давление в этот период снижается, и на территорию устремляются потоки холодного воздуха из северных областей Сибири. Это способствует возврату холодов и появлению продолжительных и сильных ветров.

Летом преобладающей воздушной массой является полярный континентальный воздух. Лето не продолжительное, в первой половине

засушливое с отдельными суховеями, получившими развитие на территории Монголии. Во второй половине (июль-август) постепенно усиливается циклоническая деятельность, в результате чего в восточные и южные районы Бурятии с Тихого океана поступают влажные воздушные массы (морской тропический воздух).

Как указывалось еще в работе [1], территория Бурятии обладает одним из самых высоких потенциалов солнечной энергии среди регионов РФ. Действительно, существенной чертой климата Бурятии является большая продолжительность солнечного сияния (в среднем 1900-2200 часов), и по данному показателю республика не уступает, а порой превосходит южные районы России.

На рис. 1 представлено распределение солнечного сияния в течение года для метеостанции Улан-Удэ. Число часов солнечного сияния за год составляет здесь 2396 часов, на метеостанции Усойский Хребет эта величина составляет 2511 часов, Кяхта-2500 часов. Первичный анализ данных климатических справочников показывает, что число дней без солнца составляет в среднем 27 дней, в максимуме – 58 (Нижнангарск).

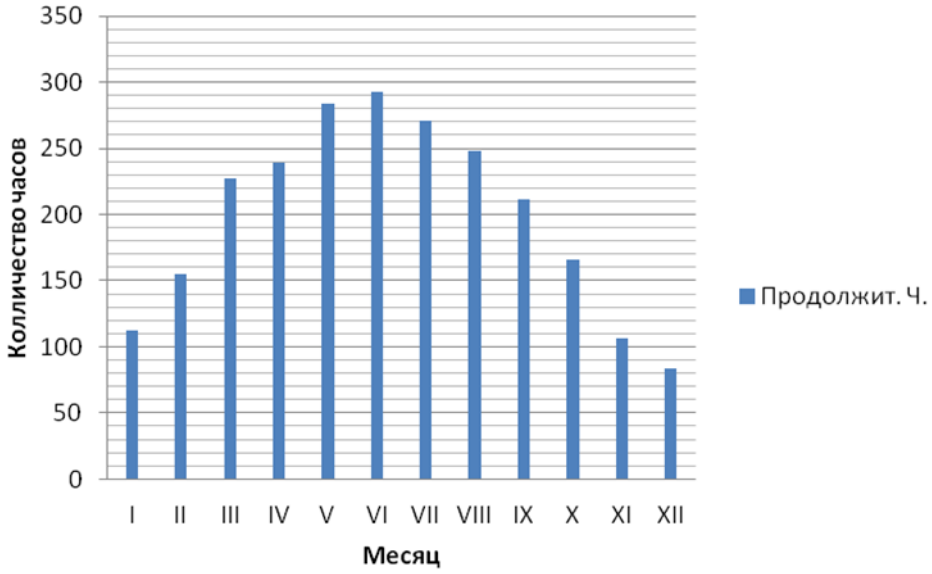



Рис.1. Средняя ежемесячная продолжительность солнечного сияния (часы). Улан-Удэ (составлено автором на основе [2])

Таким образом, тематический анализ физико-географических характеристик территории Республики Бурятия показывает, что на основе оценок самого общего уровня можно сделать вывод о значительном потенциале развития солнечной и ветровой энергетики. Ресурсы биоэнергетики выходят за рамки данной работы. В дальнейшем, однако, необходимо провести анализ адекватности и достоверности исходных данных для оценок, провести более детальные расчеты и анализ распределения ресурсов возобновляемой энергетики по территории для ранжирования и выделения наиболее благоприятных районов.

Метеорологические станции на территории Бурятии (рис.2) весьма немногочисленны всего две станции – Багдарин и Иволгинск – проводят актинометрические измерения.

В связи с этим нами для подготовки массивов данных по ресурсам солнечной энергии были использованы данные климатической БД NASA SSE [3], тематически ориентированной на потребности возобновляемой энергетики и содержащей массив данных с достаточно высоким пространственным разрешением (1x1 градус географических координат) [4].

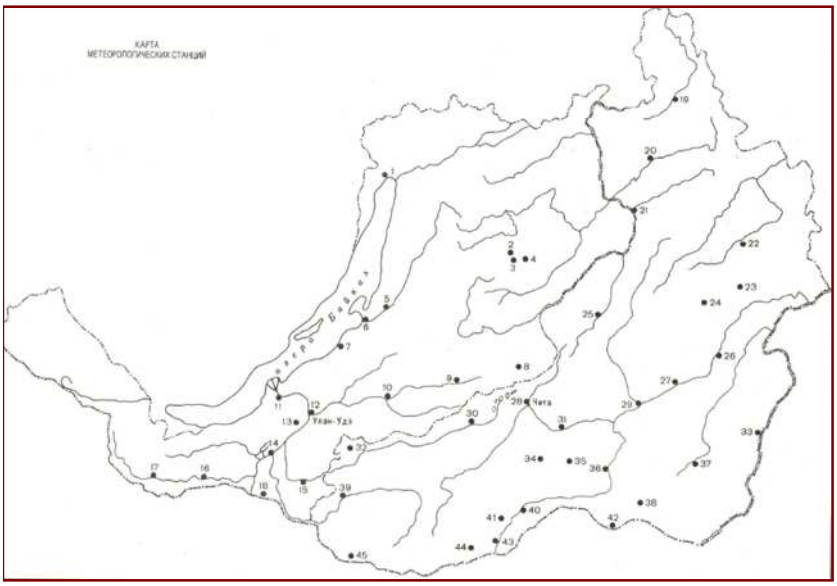
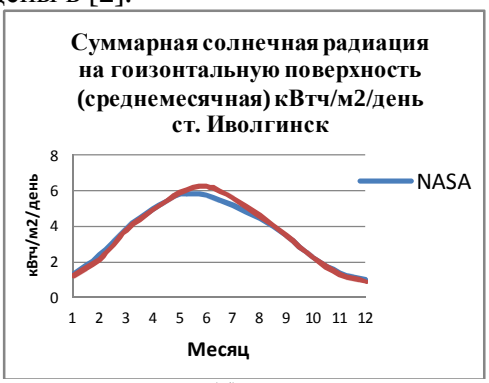


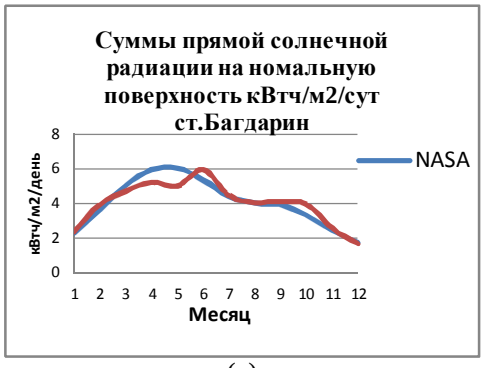

Рис.2. Расположение метеостанций на территории Республики Бурятии и Читинской области [2]

Для обоснования использования этого массива данных нами были проведены сопоставления значений падающей солнечной радиации, полученной наземными измерениями и математическим моделированием совместно со спутниковым мониторингом (NASA SSE). Ниже на рис. 3 изображено внутригодовое распределение суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность и прямой солнечной радиации, падающей на нормальную к лучу поверхность для двух актинометрических станций, результаты измерений на которых приведены в [2].

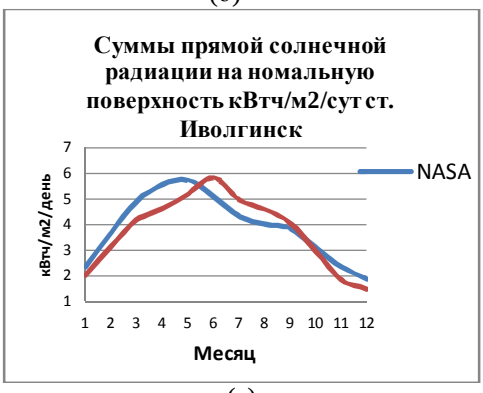
(а)




(б)




(в)




(г)

Рис3. Сравнение внутригодового распределения суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, и прямой солнечной радиации, падающей на нормальную к лучу поверхность, по метеоданным и данным БД NASA

Из приведенных графиков видно, что сопоставление с данными Багдарина и Иволгинска позволяет использовать БД NASA SSE для территории Бурятии. В ходе сравнения было выявлено, что относительная погрешность данных NASA $\delta^1$ составляет: для суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность по ст. Багдарин, δ= 0,1%, по ст. Иволгинск δ=0,17%. Для прямой солнечной радиации, падающей на нормальную к лучу поверхность по ст. Багдарин, отклонение δ= 0,33%, по ст. Иволгинск δ= 0,42%.

Нами на основе БД NASA для проведения дальнейших оценок ресурсов солнечной энергии, была составлена карта (рис.4), которая в дальнейшем будет использоваться для оценки и районирования территории по ресурсам солнечной энергии.

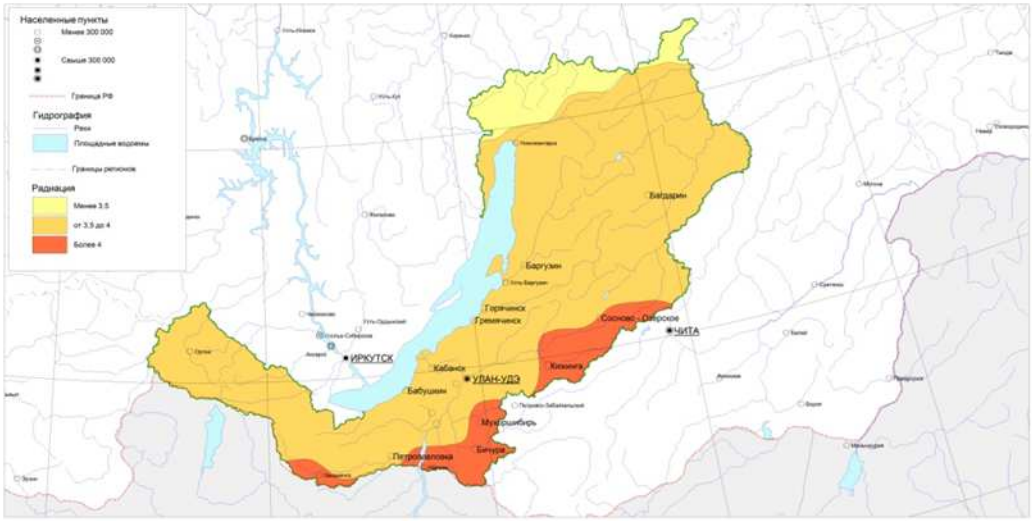



Рис.4. Суммарная падающая солнечная радиация на горизонтальную поверхность по данным NASA SSE, среднегодовые значения, кВтч/м$^2$/сут (составлено автором)

Согласно проведенным оценкам (метеоданные и данные NASA SSE), величина суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в июне составляет порядка 6 кВтч/м$^2$/сутки; среднегодовое значение – порядка 4 кВтч/м$^2$/сутки. Величина энергии сравнима, таким образом, с соответствующими показателями для Краснодарского края РФ и для центрально-европейских стран с высоким уровнем солнечной инсоляции.

Анализ электроэнергетического баланса Республики Бурятии показывает, что он является устойчиво отрицательным, и, согласно Стратегии развития топливно-энергетического комплекса Республики Бурятия на перспективу до 2030 года, останется таковым вплоть до 2020 года. В настоящее время электроэнергоснабжение отдельных регионов республики осложняется низкой надежностью и изношенностью сетей (износ более 66%), физическим и моральным износом оборудования электростанций. Столь же велики и проблемы теплоэнергетики в республике, связанные также в основном с низкой устойчивостью теплоснабжения и потерями в сетях (до 22%). Особенности хозяйственной структуры Бурятии, в частности, сельскохозяйственного производства, существенную долю которого составляет пастбищное животноводство, а также программа создания особой экономической зоны

[1] $D = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{12}(V_{meteo}-V_{NASA})^2}}{12}$ $\delta = \frac{D}{V_{\text{ср.год.}NASA}} * 100\%$

туристско-рекреационного типа Республики Бурятия определяют нишу развития возобновляемой энергетики в республике – автономные станции и установки для энергоснабжения удаленных поселений, чабанских стоянок, туристических объектов и др. В настоящее время в республике имеются инфраструктурные предпосылки развития солнечной энергетики: фирмы-дилеры оборудования, а также небольшое количество фирм, имеющих опыт проектирования и строительства гелиоустановок; ряд ВУЗов республики (Бурятская ГСХА и Восточно-Сибирский ГТУ) начали подготовку специалистов в области возобновляемой энергетики.

Для целей теплоснабжения перспективным возобновляемым энергоисточником в Бурятии могут стать геотермальные ресурсы. Сегодня имеются сведения о более чем 20 геотермальных источниках в Бурятии, среди которых высокотемпературные: Могойский (с температурой до 80 град. С), Гаргинский (t = 76 град. С), Питателевский (t = 68 град. С), Гусихинский (t = 55, ..., 74 град. С) и другие (Рис.5).

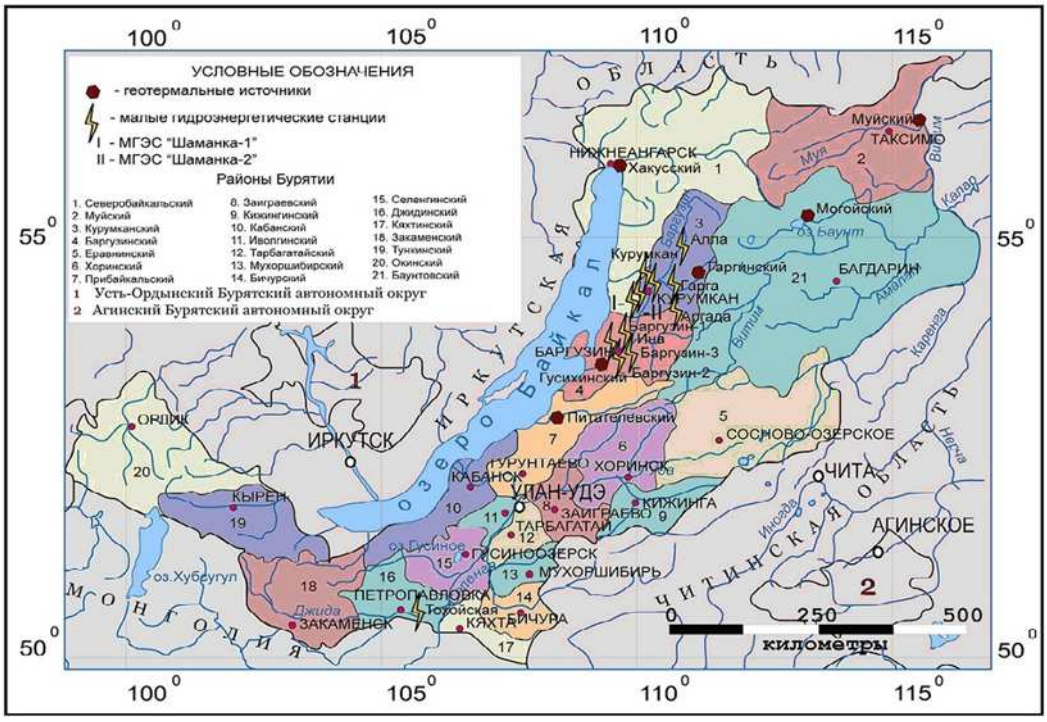



Рис.5. Перспективные для энергетического использования геотермальные источники и объекты малой гидроэнергетики на территории Бурятии [5]

Большое количество геотермальных источников имеет температуру геофлюида, достаточную для эффективного применения тепловых насосов (t = 25, ..., 45 град. С); например, Хакусский (45 град. С), Муйский (35 град. С), Сартинский (35 град. С).

Суммарный суточный дебит геотермальных источников Бурятии оценивается более чем в 50000 м3/сут. При этом важным преимуществом геотермальных месторождений Бурятии является низкая минерализация воды (в среднем 0,3, ..., 0,5 г/л) [5].

Выработка электроэнергии на базе геотермальных источников Бурятии из-за относительно невысокой температуры флюида на сегодня представляется технически нецелесообразным.

**Литература:**

1. *Мизандронцева К.Н., Потапова Л.С.* Погодно-климатические условия Прибайкалья и Забайкалья. Материалы методологических исследований. Вып. 2. М.: Наука, 1976. С. 60-71.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Части 1-6. Вып. 23. Бурятская АССР, Читинская область. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 549 с.
3. Сайт NASA SSE http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/
4. *Попель О.С., Фрид С.Е., Киселева С.В., Коломиец Ю.Г., Лисицкая Н.В.* Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие. М.: Изд-во МФТИ. 2010, 56 с.
5. Стратегия ТЭК 2030. Официальный сайт Республики Бурятия http://egov-buryatia.ru/fileadmin/minprom/strategia_tek_2030.doc

# ПОТРЕБНОСТЬ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ КРЫМА В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Санин А.Ю.

*ФГБОУ Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова*
*Москва, Россия; 119991, Ленинские горы 1, ГСП-1; e-mail: eather86@mail.ru*

В последнее время альтернативная энергетика вызывает все больший и больший интерес, как в связи с ухудшением экологической обстановки и негативным влиянием традиционной энергетики, так и в связи с появлением новых технологий, которые делают ее все более удобнее и дешевле. Есть некоторые территории, для которых внедрение и использование альтернативных электростанций для удовлетворения потребности в электроэнергии потребителей, расположенных на них, особо актуально. К таким территориям можно отнести и прибрежную зону. Ее можно рассматривать и как природную, и как рекреационную, и как социально-экономическую систему, причем развивающуюся относительно автономно. Очевидно, что такая система- здесь мы рассматриваем прибрежную зону как социальную систему – имеет потребности в энергии, в том числе в электроэнергии, для обеспечения функционирования рекреационной инфраструктуры, которая, по В.С.Преображенскому, является одним из пяти ее компонентов, если рассматривать посещаемую туристами прибрежную зону как территориально-рекреационную систему(ТРС).

В настоящее время, как правило, электроэнергия вырабатывается за пределами крымских прибрежных ТРС на ТЭС, ГЭС или АЭС, и уже потом транспортируется пользователям в пределах системы. При этом не избежать определенных транспортных потерь, а также нарушением экологической обстановки, которые лучше всего видны непосредственно на территориях, примыкающих к электростанциям, но проявляются и достаточно далеко, что легко объяснить, учитывая сложную систему взаимосвязей в природе. Хуже, если электростанции, особенно тепловые, расположены непосредственно в пределах ТРС либо в непосредственной близости от них- определить это достаточно сложно, так как территориально-рекреационные системы не имеют четких физических границ. Здесь уместно вспомнить проект атомной станции в Крыму, около города Щелкино, который вызвал большой общественный резонанс. Хоть в экологическом отношении само производство электроэнергии на станции является чистым, остается проблема с хранением отработанного топлива и возможность каких-либо нештатных ситуаций, вплоть до аварий и даже катастроф. Конечно, угроза последних значительно преувеличена. Здесь играет известную роль фактор Чернобыля. Тем не менее, для многих рекреантов наличие АЭС в Крыму делало б отдых несколько менее комфортным с психологической точки зрения, что нельзя не учитывать.

С другой стороны, в том же Крыму есть пример относительно рентабельно работающих ветровых электростанций («ветряков»). Но намного чаще примеры удачного использования последних, в том числе в прибрежной зоне, имеют место в Европе, в частности, в Голландии и Германии. Кроме «ветряков», перспективными для прибрежной зоны многих регионов могут быть так ГЭС на малых реках, приливные и солнечные электростанции. Последние не лишены смысла и для Крыма- здесь в пример можно привести соседнюю Турцию, где они применяются, в частности, для энергоснабжения некоторых гостиниц.

В отличие от, например, соседнего северного побережья Азовского моря, Крым, особенно его южный берег, привлекает туристов очень чистым воздухом (в южной части сказывается еще и влияние горного леса). Соответственно, именно воздух становится важной составляющей рекреационного потенциала полуострова, которая нуждается в сохранении. Альтернативная энергетика это обеспечит, что мы видим на примере тех регионов, где она является ведущей. При этом она позволяет отдельным единицам рекреационной инфраструктуры, например, санаториям, гостиничным комплексам, небольшим туристическим поселкам полностью себя обеспечивать электроэнергией и не зависеть от ее поставщиков. Но это требует значительных первоначальных вложений, которые окупаются через достаточно продолжительное время, что пока делает подобные проекты труднореализуемыми. С другой стороны, они все-таки реалистичные- здесь в качестве доказательства можно привести турбазу на Сон-острове, на Белом море, примерно в 40 км от железнодорожной станции Чупа, где автору довелось побывать. Территория около базы незаселенная, организация снабжения электроэнергией достаточно затруднительно, и руководство приняло решение о строительстве «ветряка», который в настоящее время покрывает потребности базы в электричестве. Конечно, если б поблизости б имелись предприятия традиционной энергетики, например, ТЭС, электричество б могло обходиться дешевле- здесь необходимы расчеты. Но тем не менее, принципиальная возможность снабжения из альтернативных источников этим доказывается, а над удешевлением в случае необходимости можно и нужно работать, прием это должны быть усилия как производителей, так и государства и органов управления на местах, в том числе и органа управления ТРС, который, по Преображенскому, наряду с рекреационной инфраструктурой, является одним из ее компонентов.

Для крымских берегов возможны три основных типа альтернативной энергетики: солнечные электростанции, ветровые электростанции и малые ГЭС. Сооружение последних возможно, главным образом, на Южном берегу, для рек которого характерен большой продольный уклон. Важно отметить, что подобные предприятия в Крыму начал создаваться еще в 30-е годы (ветряная электростанция недалеко от Балаклавы), но, к сожалению, после войны упор был сделан на традиционную энергетику. Отметим, что большая часть получаемой таким путем электроэнергии экспортируется с других административных единиц Украины, в частности, с запорожского энергетического узла, соответственно, не о какой энергетической автономии крымских ТРС не может быть и речи, как и Крыма как ТРС в целом, если его возможно рассматривать в таком ракурсе. Очевидно, что транспортировка приводит к потерям в ее ходе, и в удорожании энергии в конечном итоге.

В Крыму можно условно выделить три волны развития альтернативной энергетики. Первая имела место еще в 30-е годы, мы о ней вскользь упоминали, вторая приходится на 70-е и особенно 80-е годы, для этого времени характерно массовое строительство ветроэлектростанций, а в 1986 году здесь появилась первая в СССР солнечная электростанция мощностью в 5 МВт (1). Третья, и самая масштабная, начинается в последние годы, и масштабность ее связана с приходом иностранных инвестиций, что, в свою очередь, говорит о укреплении позиций альтернативной энергетики в мире в целом. Так, компания «Active Solar» инвестировала в развитие солнечной энергетики в Крыму более 30 млрд. рублей (по курсу лета 2012 года) и создала крупнейшую в настоящее время в мире солнечную электростанцию в Перово, мощностью 105 мегаватт (1). Быстрыми темпами развивается ветровая энергетика, причем важно отметить, что ВЭС

имеются в большинстве крымских регионов (Тарханкут, Керченский полуостров, Судак и т.д.), а также то, что удалось с учетом «зеленого тарифа» вывести предприятия на уровень рентабельности (1). Данный факт- серьезный контраргумент против противников альтернативной энергетики, так как достаточно часто именно нерентабельность, действительная или мнимая, сдерживает ее развитие. В проектах на ближайшие годы предполагается впервые достичь практически полного самообеспечения Крымского полуострова ветровой энергией. Если это удастся реализовать, тогда можно будет говорить и о достижении энергетической автономии для отдельных ТРС. Кроме того, это сделает неактуальными проекты тепловых и крупным гидроэлектростанций, которые потенциально в связи с развитием крымского рекреационного комплекса и ростом его потребности электроэнергии могли бы быть реализованы. Первые, несмотря на совершенствование технологий очистки, все же оказывают негативное влияние на экологическую ситуацию, а также могут отталкивать потенциальных рекреантов на психологическом уровне. Что касается крупных ГЭС, негативные последствия строительства последних хорошо известны. Для Крыма это подтопление плодородных земель, в частности, затопление фруктовых садов, расположенных в поймах рек – а крымские фрукты в настоящее время являются одним из факторов, способных повлиять на рекреанта в его выборе в пользу полуострова, а не, например, Турции или европейского средиземноморского курорта. Это немаловажно, ведь общеизвестным является то, что во многих случаях уровень сервиса для организованных отдыхающих достаточно низок, а цен- высок, и вследствие этого многие делают выбор не в пользу Крыма; во многом поэтому большинство отдыхающих в Крыму-неорганизованные. Другим, менее очевидным последствием является изменение баланса наноса в береговой зоне. Возведение плотин приводит к резкому уменьшению поступления речных наносов в береговую зону, а это основная приходная статья в их балансе. Следовательно, мы столкнемся с резким усилением размыва или абразии берега, ведь именно таким способом обычно покрывается дефицит наносов- а это угроза и материальных потерь, и жизни и здоровью рекреантов, и рекреационному потенциалу в целом, что мы видим на примере ряда участков берега, для которых интенсивная абразия или размыв характерны уже в настоящее время.

Малые ГЭС также могут оказать некоторое влияние на баланс наносов, но куда более слабое, тем более на Южном берегу, где речные наносы играют все же несколько меньшую роль для образования пляжей, чем, например, на Западном. В этой связи интересным представляется ответ на вопрос, оказывают влияние ли уже существующие в районе Ялты малые ГЭС на баланс наносов? Пока такие исследования не проводились, но с другой стороны, собственно наличие вышеупомянутых малых ГЭС указывает на возможный путь удовлетворения потребности в энергии южнобережных санаториев и прочих объектов рекреационной инфраструктуры. Если этот опыт окажется успешным, его можно распространять на весь Южный берег, или, по крайней мере, на его часть от Ялты до Феодосии, для которой характерно наличие многочисленных коротких, но быстрых малых рек. Впрочем, усложняет реализацию подобных проектов тот факт, что в летний период, когда потребности в энергии рекреационных объектов высокие, реки становятся маловодными, следовательно, их гидроэнергетический потенциал резко уменьшается.

Если малые ГЭС достаточно перспективны для Южного берега, то ветровые электростанции наиболее актуальны для Тарханкута и Керченского

полуострова, хотя имеются они и в других регионах Крыма, например, под Судаком. Благоприятны для них также и северо-западный и северо-восточный берега полуострова, но большая часть этих регионов может быть отнесена к так называемой «рекреационной пустыни»; населенные пункты, как правило, села, встречаются тоже достаточно редко, поэтому потребность этих регионов в электроэнергии не такая острая.

Если говорить о солнечной энергетике, то для ее развития благоприятна вся территория полуострова. Причем потенциал полуострова здесь не слабее, чем в тех районах США, Великобритании, Германии, в которых такая энергетика сейчас активно развивается. Почти вся прибрежная зона имеет более 2250 часов солнечного сияния, большая часть берега от Севастополя до Евпатории и южной части Тарханкутского полуострова- более 2400 (4). Важно, что Украина входит вместе с Норвегией и Германией в тройку европейских стран, способным самостоятельно производить все комплектующие и собирать солнечные батареи, что и удешевляет реализацию таких проектов, и дает рабочие места, то есть благоприятно для украинской экономики.

В заключении можно отметить, что развитие альтернативной энергетики, безусловно, хоть и требует и немалых финансовых затрат, и технологических решений, и определенной ломки сложившегося к ней отношения, но является достаточно перспективным для развития крымского рекреационного комплекса. Более того, альтернативная энергетика может способствовать сохранению и укреплению рекреационного потенциала полуострова.

**Литература:**

1. http://www.kianews.com.ua/node/46981
2. Сафьянов Г.А. *Геоморфология морских берегов.* М.: Изд-во МГУ, 1996
3. Рекреационные системы/Под ред. Н. С. Мироненко, М. Бочварова. М., 1986.
4. Атлас Крыма. Киев-Симферополь, 2003.

# УСТАНОВКА ПО ТОРРИФИКАЦИИ БИОМАССЫ

Бессмертных А.В, Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: juli_kuzmina@mail.ru, george.sytchev@gmail.com*

Торрификация является относительно новым и перспективным способом улучшения характеристик органического сырья растительного происхождения перед его использованием в качестве твердого топлива. Торрификация представляет собой процесс предварительной термической обработки измельченной или гранулированной биомассы при температурах до 300°С. Процесс торрификации сопровождается не только удалением влаги, т.е. сушкой, исходного сырья, но и термической деструкцией гемицеллюлозы, входящей в состав биомассы. В результате образуется твердый гидрофобный продукт. Сочетание торрификации и пеллетирования (так называемый ТОП-процесс) приводит к повышению плотности и удельной теплоты сгорания биомассы, что позволяет экономить до 30% затрат на хранение и транспортировку. В зависимости от условий, при которых проводится торрификация, теплота сгорания торрифицированных гранул из древесных отходов может достигать величины 19 – 23 МДж/кг.

В ОИВТ РАН была создана опытная установка по торрификации биомассы производительностью 30 кг/ч, использующая в качестве теплоносителя продуктов сгорания газопоршневого двигателя.

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1.

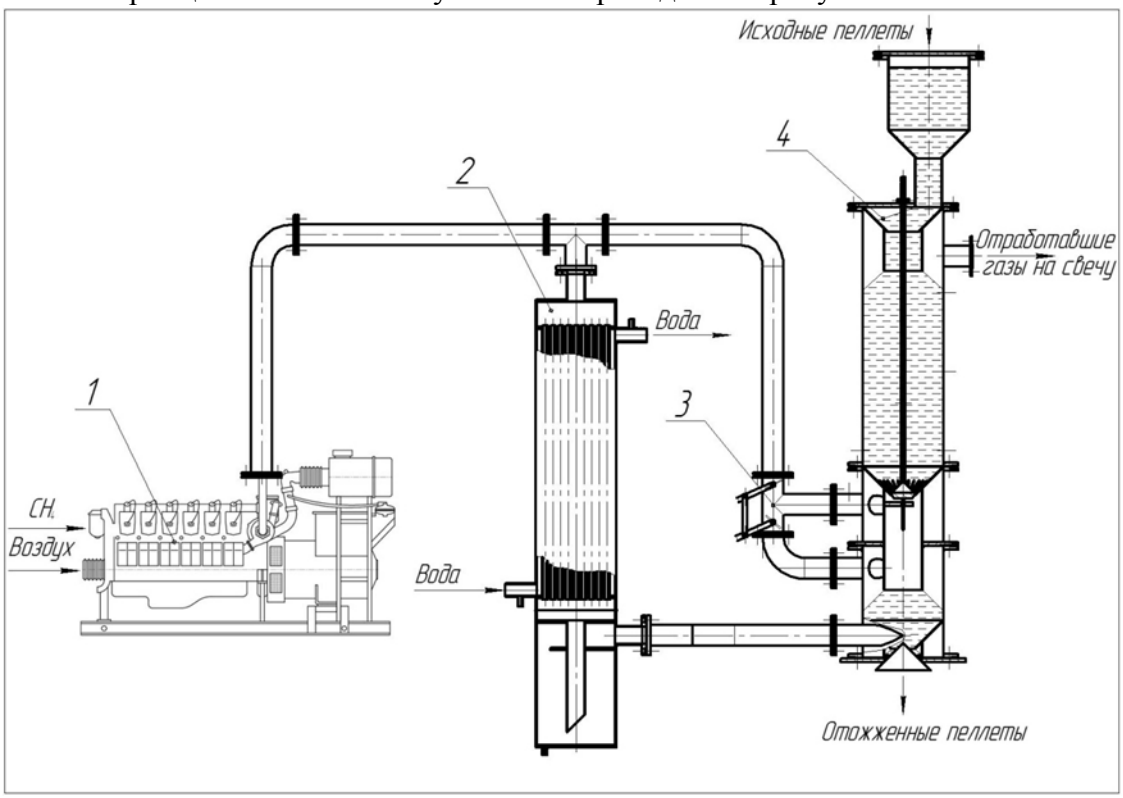



Рис.1. Принципиальная схема установки

В состав комплекса входят: система генерирования теплоносителя (газопоршневая машина и газоводяной теплообменник) и реактор отжига.

**Принцип действия реактора**. На рис. 2 показана схема реактора. Сырье загружается в реактор через загрузочный бункер 1 и заполняет объем верхнего корпуса реактора 3. Горячие газы из смесителя тангенциально поступают через патрубок 7 в средний корпус 6,проходя через перфорированный конус, прогревают пеллеты и выходят через патрубок 2 на свечу. С помощью штока 5 с запорной сферой горячие пеллеты выгружаются в нижний корпус 10. В нижнем корпусе они охлаждаются холодными газами, которые поступают тангенциально через патрубок 9 из теплообменника-охладителя. Проходя через слой пеллет они нагреваются и через патрубок 8 тангенциально выходят в смеситель. В смесители они смешиваются с горячими газами, и смесь поступает в реактор через патрубок 7. Охлажденные пелетты при открытии конуса-разгружателя выгружаются из реактора.

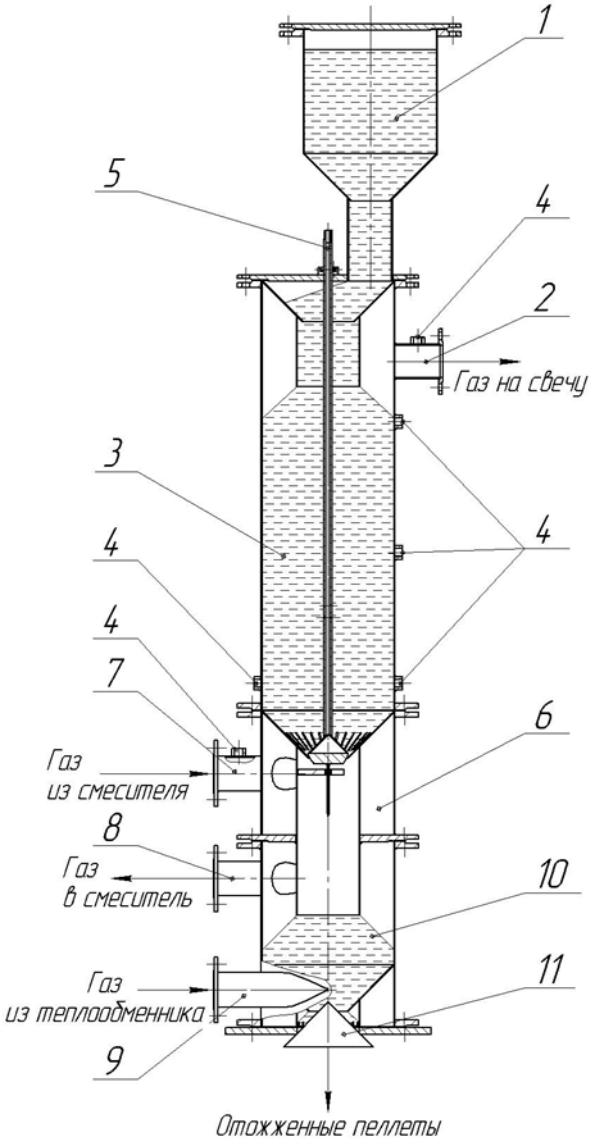



Рис.2. Схема реактора отжига (1 – загрузочный бункер, 2 – патрубок выхода газа на свечу, 3 – верхний корпус, 4 – термопары, 5 – шток, 6 – средний корпус, 7 – патрубок входа горячего газа из смесителя, 8 – патрубок выхода холодного газа в смеситель, 9 – патрубок входа холодного газа, 10 – нижний корпус, 11 – конус-разгружатель)

Теплотехнические параметры газов и пеллет в реакторе:

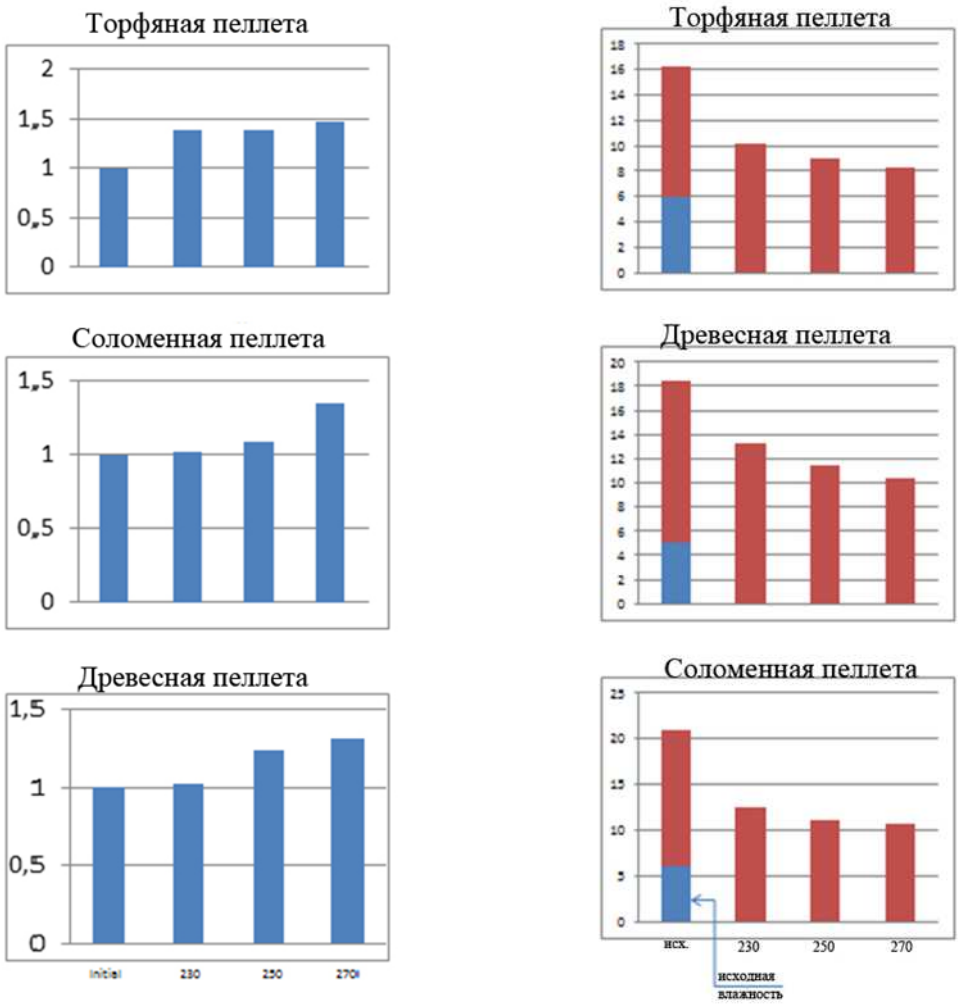
| | |
|---|---|
| Производительность по отожженным пеллетам | 30 кг/час |
| Температура газов на входе в реактор | 270°C |

| | |
|---|---|
| Температура газов на выходе из реактора | $160^0$C |
| Объемный расход газов на входе | 242,5 нм3/час |
| Количество летучих | 22,2 кг/час |
| Количество испаренной влаги | 6,14 кг/час |
| Объем газов на выходе из реактора | 275 нм3/час |
| Температура пеллет на входе в реактор | 10 °C |
| Температура пеллет на выходе из реактора | 260 °C |
| Температура пеллет на выходе из зоны охлаждения | 180 $^0$C |
| Расход газов в зону охлаждения (t1=$140^0$C) | 96 нм3/час |

Все детали реактора отжига выполняются из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Габаритные размеры реактора – 2455х600х500. Реактор состоит из загрузочного бункера (труба нержавеющая ∩325х2 с коническим переходом на трубу ∩110х2), верхнего, среднего и нижнего корпуса. Корпуса представляют собой трубы ∩325х2 с приваренными патрубками для входа и выхода теплоносителей. Верхний корпус содержит конус с приваренной трубой ∩154х2 для лучшего распределения материала в объеме корпуса. Патрубок входа горячего газа в средний корпус приваривается со смещением относительно оси корпуса для тангенциального входа газа (равномерне распределения газа по объему корпуса). В среднем корпусе установлен перфорированный конус для прохода газов в слой пеллет. Конус закрывается полусферой, приваренной к штоку. Шток проходит через верхний корпус и выходит за пределы реактора. Для присоединения к внешним устройствам регулирования на верхней части штока сделаны лыски под ключ S18 и внутренняя резьба М20. Поднимая и опуская шток, можно регулировать потом материала через реактор. Нижний корпус (зона охлаждения) состоит из конуса с приваренной перфорированной трубой ∩154х2 (для прохода холодных газов в слой горячих пеллет). Патрубки входа и выхода холодного газа так же смещены относительно оси корпуса. Все корпуса и бункер крепятся между собой болтовыми соединениям. В качестве уплотнителя используются паронитовые прокладки А-300-0,1-ПОН ГОСТ 15180-86. Для контроля температуры в верхнем корпусе и патрубках входа и выхода горячего газа устанавливаются термопары.

На рис.3а представлены гистограммы зависимости удельной теплоты сгорания для трех видов сырья (торфяной, соломенной и древесной пеллет) от режимных параметров торрификации (230, 250 и 270°С). Эксперименты по определению теплоты сгорания проводились в термоанализаторе SDT Q600 методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Выявлена тенденция к росту теплоты сгорания с повышением температуры торрификации. Наиболее эффективным является температурный режим 270°С для всех типов сырья.

На рис.3б представлены зависимости гигроскопичности трех видов сырья от режимных параметров торрефикации. Также учитывается начальная влажность исходной пеллеты, которая при нормальных условиях составляет порядка 5 процентов. Эксперименты по определению гигроскопичности проводились в эксикаторе в условиях стопроцентной влажности, все образцы выдерживались в течении двух суток. Было выявлено, что исходные пеллеты в таких условиях разрушаются. Гигроскопичность обработанных пеллет уменьшается с увеличением температуры торрефикации, наиболее эффективным оказывается режим 270 °С. Уменьшение гигроскопичности в значительной мере влияет на стоимость транспортировки пеллет. Также, пеллеты, подверженные торрефикации, не требуют жестких условий хранения.




(а) (б)

Рис.3. Зависимость удельной теплоты сгорания (а) и гигроскопичности (б) от температуры торрификации

Особенностью предложенной схемы является использование в качестве газа-теплоносителя выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания. Тем самым решаются две задачи. Во-первых, за счет высокого коэффициента теплообмена обеспечивается эффективный нагрев перерабатываемого сырья (по сравнению со схемами, в которых подвод тепла осуществляется через стенку реактора). Во-вторых, предложенная схема, по сути, представляет собой когенерационную установку, позволяющую вырабатывать электроэнергию и утилизировать производимое при этом тепло в целях повышения потребительских свойств твердого гранулированного топлива из биомасс. Такой подход существенным образом улучшает экономические показатели процесса торрификации и делает его экономически целесообразным.

**Литература:**

1. *Батенин В.М., Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А.* Термические методы переработки древесины и торфа в энергетических целях. Теплоэнергетика, N11, 2010. с.36-42.
2. *Кислицын А.Н.* Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная промышленность, 1920.
3. Рациональное использование газа в энергетических установках. Справочное руководство. Под ред. А.С. Иссерлин. Л. Недра. 1990. 424с.

# ИСПЫТАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АККУМУЛЯЦИОННОГО ТИПА НОВОГО ОБРАЗЦА ИЗ ТЕПЛОСТОЙКИХ ПЛАСТМАСС

Сулейманов М.Ж.[1], Коломиец Ю.Г.[1], Фрид С.Е.[1], Мордынский А.В.[1], Попель О.С.[1], Арсатов А.В.[2]

*[1] ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: smusi@mail.ru*
*[2] ООО «Политермо»;*
*Снегири(МО), Россия; 143590, Истринский район МО, ул.Станционная, 1*

В докладе приведены результаты разработки солнечной водонагревательной установки (СВУ) аккумуляционного типа, изготовленной из полимерных и композитных материалов, представлены результаты ее тепловых испытаний в климатических условиях г. Москвы.

История промышленного производства солнечных водонагревателей началась в конце XIX в. с выпуска в США солнечных водонагревательных установок аккумуляционного типа (интегрированных), представляющих собой несколько соединенных между собой трубчатых баков, помещенных в деревянный ящик, накрытый стеклом [1]. После изобретения в 1909 г. темосифонной СВУ [1, 2], у которой солнечный коллектор и бак-аккумулятор являются отдельными пространственно разделенными элементами, и дальнейшего совершенствования таких установок, они практически полностью вытеснили СВУ аккумуляционного типа с рынка. Причины непопулярности интегрированных солнечных водонагревателей кроются в их невысокой технологичности и, как принято считать, более низкой эффективности (из-за невозможности подавления тепловых потерь через остекление в ночное время) по сравнению с установками, в которых солнечный коллектор и бак-аккумулятор разделены.

Выполненные в [3, 4] оценки показывают, что в характерных для России условиях сезонной работы СВУ в теплое время года эффективность интегрированных СВУ не только не ниже, чем раздельных установок, но в ряде случаев может заметно ее превышать. Что касается низкой технологичности, то расширяющееся использование в гелиотехнике полимерных и композитных материалов позволяет обойти и это ограничение. Из таких материалов можно изготавливать детали большого размера и сложной формы, в результате СВУ собирается из небольшого количества (в нашем случае – четырех) деталей, что существенно повышает технологичность изготовления и снижает вес и себестоимость установки. Общий вид и схема экспериментального образца СВУ приведены на рис. 1. Габаритная площадь установки – около 1,5 м$^2$.

Стеклопластиковый корпус СВУ состоит из пяти объединённых между собою секций, объёмом около 20 л каждая, т.е. емкость бака-аккумулятора составляет 100 л (около 66 л/м$^2$). Тонкостенная (1 мм) поглощающая панель соединена герметично с корпусом. Прозрачное покрытие изготовлено из полиметилметакрилата методом термовакуумформования. Толщина воздушного зазора – 25 мм. Соединение прозрачного покрытия с корпусом – клеевое, с применением термостойкого полиуретанового клея, обладающего эластичностью для предотвращения растрескивания отформованного полиметилметакрилата. Тыльная сторона СВУ теплоизолирована вспененным материалом с добавками стекловолокна, теплоизоляция составляет единое целое с корпусом установки.

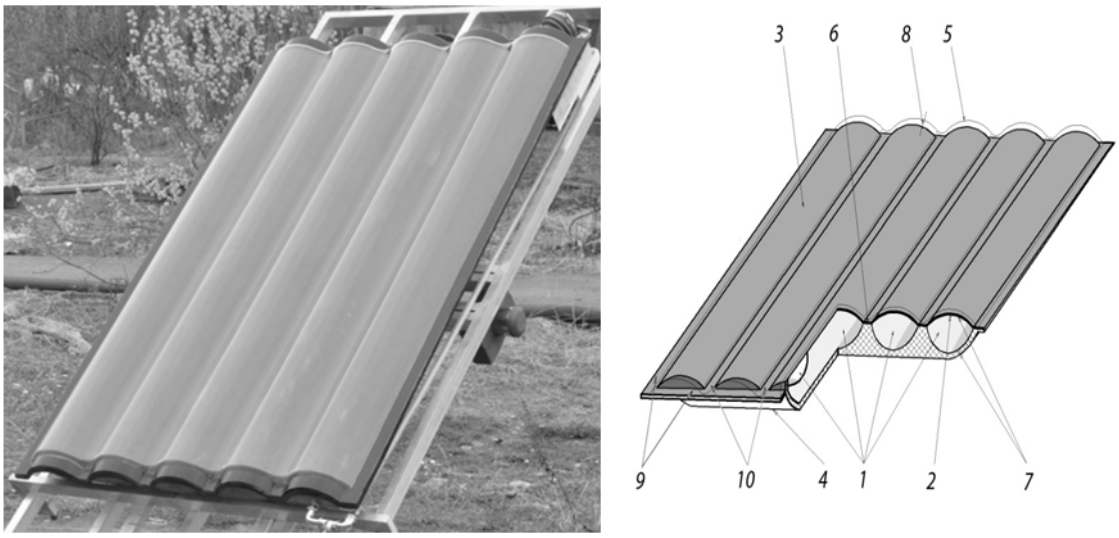



Рис.1. Экспериментальный образец СВУ из полимерных и композитных материалов (1 – аккумулирующая емкость, 2 – верхняя стенка, 3 – тепловоспринимающая поверхность, 4 – теплоизолированный корпус, 5 – прозрачное покрытие, 6 – плоские поверхности корпуса, 7 – герметичная полость, 8 – зазор, 9 – проклеенный периметр, 10 – внутренняя плоская поверхность)

Применение полимерных материалов позволило снизить удельную массу СВУ до величины порядка 20 кг/м$^2$. Оценки показывают, что себестоимость установки при переходе на крупносерийное производство (более 5000 изделий в год) не превышает 7000 р., т.е. 120 евро/м$^2$, что в 3–5 раз ниже стоимости известных традиционных СВУ. Предварительные испытания подтвердили работоспособность установки при давлениях до 0,25 МПа, установка обладает достаточным запасом прочности для работы в безнапорных системах теплоснабжения.

В мае-июле 2012 г. на специализированном теплогидравлическом стенде «Атон» ОИВТ РАН проводились тепловые испытания экспериментальных образцов интегрированной СВУ. Испытания базировались на методике стандарта ISO 9459-2:1995 [5]. Основной целью таких испытаний является получение обобщенных зависимостей количества накопленного за день установкой тепла и максимальной температуры нагрева воды в баке-аккумуляторе от дневной суммы солнечного излучения, поступающего на остекление СВУ, при различных температурах холодной воды и окружающего воздуха. Такие зависимости позволяют оценить производительность установки в реальных условиях эксплуатации.

Методика предусматривает непрерывное измерение в течение дневного эксперимента плотности потока солнечного излучения в приемной плоскости СВУ и температуры окружающей среды (см. данные одного из экспериментов на рис. 2). Результаты измерений солнечной радиации интегрируются, в результате чего определяется дневная сумма солнечной энергии $H$ *(МДж/м$^2$)*, поступившей на остекление. После захода Солнца производится отбор нагретой воды из бака аккумулятора путем вытеснения ее холодной водопроводной водой с одновременным измерением температуры сливаемой воды. Фиксируется максимальная температура нагрева воды в баке $T_{max}$. Отбор воды (рис. 3) осуществляется до тех пор, пока разность температур сливаемой и вытесняющей воды не становится пренебрежимо малой (менее 1$^o$C). Данная процедура позволяет путем интегрирования определить количество накопленного СВУ за день тепла $Q$.

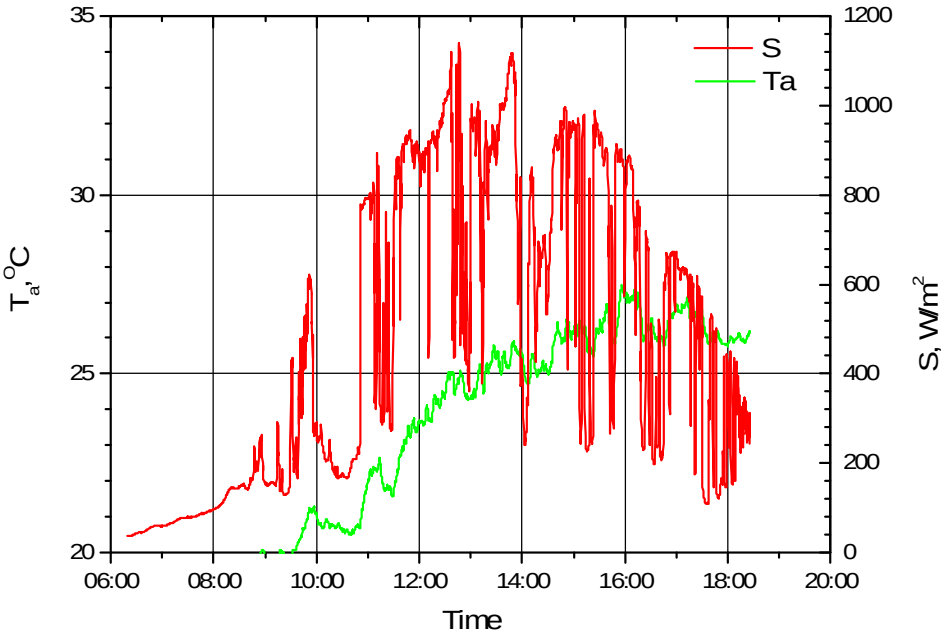



Рис.2. Изменение потока солнечной радиации S и температуры окружающего воздуха $T_a$ в течение одного из экспериментов

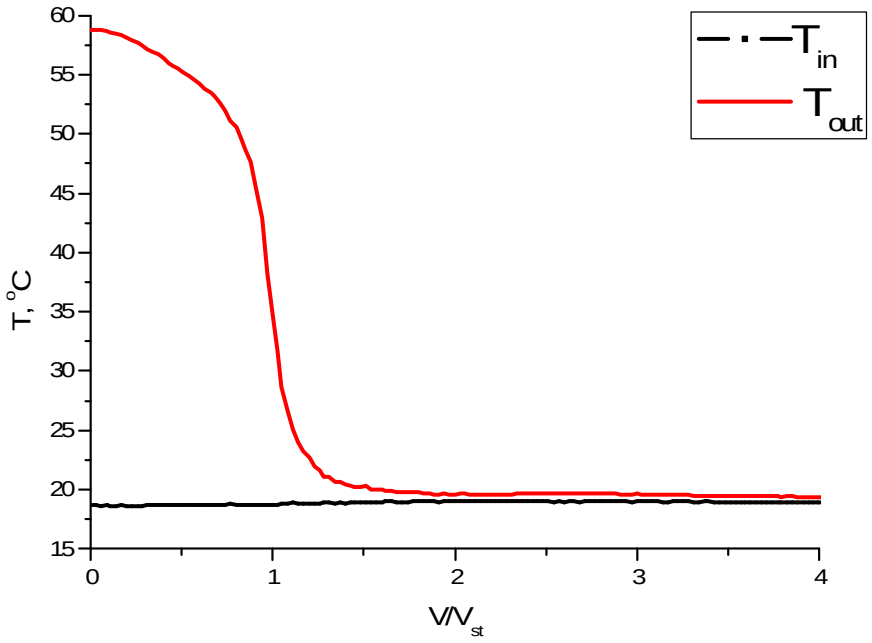



Рис.3. Изменение температуры воды в зависимости объема (в долях объема бака СВУ) слитой воды

Летом 2012 года выполнено более десятка экспериментов. Однако изменение дневной температуры воздуха в этот период в относительно узком диапазоне пока не позволило накопить достаточный объем экспериментальных данных и обеспечить требуемую погрешность аппроксимации обобщенных результатов эксперимента для всего неотопительного периода предполагаемой эксплуатации разрабатываемых СВУ (апрель-октябрь). Испытания будут продолжены в осенний период. Тем не менее, полученные значения среднедневного КПД установки (до 55%), позволяют говорить о ее высокой эффективности и возможности практического использования таких СВУ.

**Литература:**

1. *Bainbridge D.A.* The integral Passive Solar Water Heater Book. – Solar Usage Now. 1981. 104 p.
2. *Bailey W.J.* Solar Heater // US patent No. 966070. 1910.
3. *Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Сушникова Е.В., Ямудер В.Ф.* Эффективность и перспективы использования различных систем солнечного нагрева воды в климатических условиях Российской Федерации // Теплоэнергетика. 2011. №11. С. 26-31.
4. *Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Мордынский А.В., Сулейманов М.Ж., Арсатов А.В., Ощепков М.Ю.* Эффективность солнечных водонагревателей в климатических условиях России // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. №5 (в печати).
5. ISO 9459-2:1995. Solar Heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems. – Geneva. 1995

# ПОЛУЧЕНИЕ СИНТЕЗ-ГАЗА ИЗ БИОМАССЫ. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Косов В.Ф., Лавренов В.А.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: v.a.lavrenov@gmail.com*

В настоящее время во всем мире широко используются топливные гранулы (пеллеты) и брикеты, изготавливаемые из отходов деревообрабатывающей промышленности (опилки) и сельхозпроизводства (солома, шелуха). Процесс производства энергозатратен и приводит к сильному разогреву пеллет (брикетов) до температур около 100ºС, после чего их необходимо охладить. Только после этого можно проводить расфасовку и отправку потребителю.

Полученные таким образом гранулы очень гигроскопичны и разрушаются при открытом хранении, поглощая влагу из окружающего воздуха, имеют низкую механическую прочность на истирание, что затрудняет их транспортировку.

Указанные недостатки можно устранить, подвергнув пеллеты низкотемпературному пиролизу (230...270ºС). Этот процесс принято называть торрификацией. В результате торрификации получается био-уголь, имеющий большую теплоту сгорания, большую механическую прочность и улучшенные гидрофобные свойства. На сегодняшний день топливные гранулы и брикеты используются в основном для получения тепловой энергии путем их прямого сжигания.

Наиболее эффективным методом переработки биомассы является пиролиз, позволяющий получить высококалорийный топливный газ. Использование топливных гранул в реакторах пиролиза имеет ряд преимуществ. В ОИВТ РАН разрабатывается устройство, включающее в себя гранулятор, торрификатор и реактор пиролиза, позволяющее осуществлять конверсию твердого топлива в высококалорийный газ. В отличие от существующих технологий, основанных на пиролизе, где величина энергетической эффективности конверсии не превышает 0,18, в предложенной технологии она составляет 0,78 [1]. Количество образующихся газов – около 1,4 нм$^3$ на один кг исходного продукта, а теплота сгорания получаемого газа – около 3000 ккал/нм$^3$.

Основные преимущества разрабатываемой установки:

- получение высококалорийного топливного газа;
- непрерывный режим работы;
- объединение всех этапов производства топливного газа из отходов в одном агрегате;
- использование теплоты, образующейся в процессе производства пеллет;
- энергетическая независимость – теплота, поглощаемая в процессе пиролиза и крекинга может быть получена за счет сжигания пиролизованных пеллет;
- технологичность установки;
- возможность простого перехода к установке требуемой производительности;
- отсутствие жидкой фракции в продуктах;
- экологичность – отходом производства является зола.

Представленная в докладе лабораторная установка предназначена для отработки отдельных деталей и получения количественных характеристик процесса.

Принцип работы установки (см. рисунок 1). Топливные гранулы

(пеллеты) помещаются в загрузочное окно трубки пиролизера 5, закрепленной в опорах 2. Окно закрывается крышкой 3, которая фиксируется при помощи колец с зажимами 4. Посредством винтового штока 1 пеллеты периодически подаются в реакционное пространство внутри печи 6, где происходит их термическое разложение при нагреве до температуры около 500ºС. Жидкие и газообразные продукты пиролиза выводятся совместно с пиролизованными пеллетами (твердый остаток пиролиза), а также через зазор между пиролизованными пеллетами и стенками трубки 5, образующийся за счет усушки пеллет. Свежие пеллеты, подаваемые в реактор пиролиза, образуют газоплотный слой, не позволяя жидким и газообразным продуктам пиролиза перемещаться в сторону загрузочного окна.

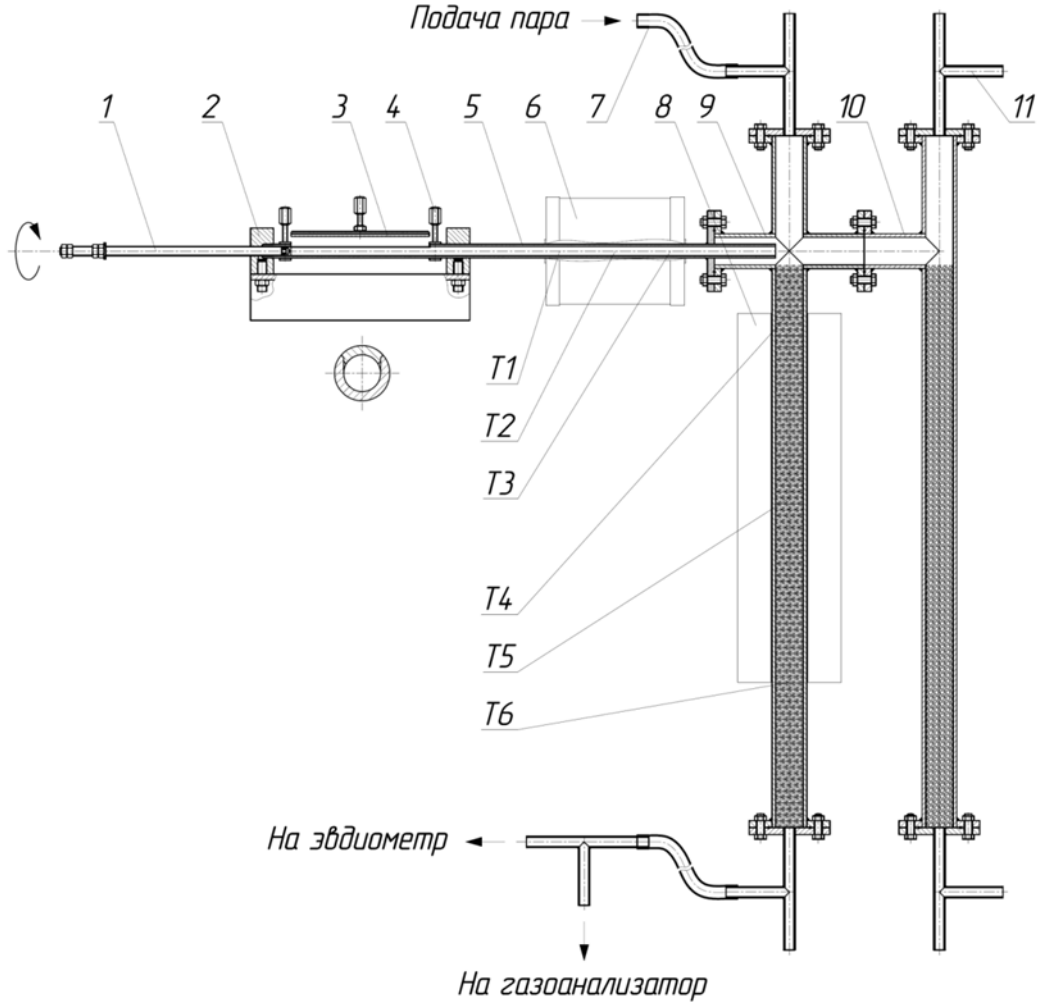



Рис.1. Лабораторная установка (1 – шток подачи, 2 – резьбовая опора, 3 – крышка загрузочного окна, 4 – фиксирующие кольца, 5 – трубка пиролизера, 6, 8 – печь электрическая, 7 – трубки подвода/отвода воды, пара и газов, 9 – корпус реактора крекинга, 10 – корпус бункера пиролизованных пеллет, 11 – патрубки; Т1-Т6 – термопары)

Продукты пиролиза попадают в реакционное пространство реактора крекинга, где нагреваются до температуры около 1000ºС посредством печи 8. В реакторе крекинга пиролизованные пеллеты подвергаются дальнейшей термической деструкции, в результате которой образуются газообразные продукты и угольный остаток. Параллельно в реакторе крекинга 9 происходит термическое разложение жидких и газообразных продуктов пиролиза, проходящих через угольный остаток. На выходе из него получается синтез-газ, представляющий собой смесь водорода и монооксида углерода в равных долях

[2], который выводится из нижней части реактора через один из патрубков и затем направляется в эвдиометр для измерения количественных характеристик. Кроме того производится отбор незначительного количества газа для подачи в газоанализатор для определения его химического состава. В процессе работы реактор крекинга 9 полностью наполняется угольным остатком и пиролизованные пеллеты начинают поступать в бункер 10, куда, по данным [2], поступает около 90 % от их общего количества. Посредством патрубков 11 и трубок 7, предусмотренных в различных частях установки производится отбор газов, подача в реакционное пространство воды, водяного пара или инертного газа, ввод термопар.

Детали установки выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Рамные элементы из Ст 3. Габаритные размеры установки – 820х810х100 мм. Загрузочное устройство в совокупности с винтовой системой подачи сконструированы так, чтобы повторить движение пеллет через трубку, подаваемых непосредственно из гранулятора. Крышка загрузочного окна, прижимаемая кольцами, снабженными винтовыми упорами, обеспечивает устойчивость столба пеллет при подаче. В реактор пиролиза и реактор крекинга помещаются термопары Т1-Т6 (рисунок 1) для контроля температурного режима работы установки.

**Литература:**

1. *Батенин В.М., Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А.* Термические методы переработки древесины и торфа в энергетических целях. Теплоэнергетика, N11, 2010. с. 36-42.
2. *Косов В.В.* Экспериментальные исследования процессов комплексной переработки биомассы в синтез-газ и углеродные материалы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2012.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПТИЦ

Зайченко В.М., Кузьмина Ю.С.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: juli_kuzmina@mail.ru*

Согласно маркетинговому исследованию рынка куриного мяса, проведенному компанией GLOBAL REACH CONSULTING, Российская Федерация является крупнейшим в мире импортером замороженных частей тушек и субпродуктов из мяса кур, занимая около 17% мирового импорта. При этом Россия находится на 7 месте в мире по объему производства куриного мяса.

В настоящее время в России в отрасли птицеводства функционирует 641 предприятие, из них 425 яичных, 137 бройлерных, 50 племенных, 9 утиных, 12 гусиных, 5 индюшиных и 3 перепелиных хозяйства. Для сравнения, в США количество птицеперерабатывающих заводов сократилось до 219.

По оценке НИЦПУРО (Научно-исследовательский центр по проблемам управления ресурсосбережением и отходами) ежегодный объем образования отходов птицеводства в России составляет 7,5 млн. т/год. Птичий помет относится ко второму классу токсичности промышленных отходов. Это обусловлено тем, что свежий птичий помет, как правило, содержит опасные болезнетворные бактерии, а так же в больших количествах содержит азот (2,69%), фосфаты и серу.

Примерный состав куриного помета: вода – 50–70 %, азот – 0,7–1,9 %, фосфорная кислота – 1,5–2,0 %, окись калия – 0,8–1,0 %, известь – 2,4 %, магний – 0,8 %, сера – 0,5 %. В помете содержатся и ценнейшие микроэлементы: медь, марганец, цинк, кобальт, бор, а также биоактивные вещества (среди них ростовые вещества – ауксины).

Простое складирование помета приводит к бактериальному загрязнению почвы, поверхностных и грунтовых вод, воздуха.

Сегодня существуют два основных способа утилизации отходов птицеперерабатывающих предприятий: использование в качестве удобрения и в качестве топлива.

Птичий помет по своим удобрительным качествам превосходит навоз, а по быстроте действия не уступает минеральным удобрениям. Качество его зависит от способа содержания и кормления птицы, вида кормов, но самое главное – вида, породы и возраста птицы. Наилучшими удобрительными свойствами обладает куриный помет.

Но при промышленном разведении птиц количество отходов намного превышает количество потребителей удобрений. Поэтому разрабатываются технологии использования птичьего помета в качестве топлива.

Методом, наиболее отвечающим экологическим, техническим и экономическим требованиям, является анаэробное сбраживание. При этом получаются жидкие биоудобрения и биогаз, из которого генерируется электрическая и тепловая энергии. Из 1м3 биогаза можно получить 2 кВтч электрической энергии и 3 кВтч тепловой энергии, сжигая его в газопоршневой установке.

В метантенке, под действием имеющихся в биомассе бактерий часть органических веществ разлагается с образованием метана (60-70%), углекислого

газа (30-40%), небольшого количества сероводорода (0-3%), а также примесей водорода, аммиака и окислов азота. Теплота сгорания его кубометра достигает 25 МДж.

Другие виды переработки помета в топливо требуют предварительной механической подготовки – пеллетизации. Гранулы являются высококачественным органическим удобрением, содержат все необходимые для питания растений элементы, причем в благоприятном количестве и сочетании. Также в последнее время все чаще начинают практиковать ее в качестве топлива

Готовые пеллеты можно сжигать как в существующих котлах для сжигания твердого топлива, так и в специальных пеллетных котлах. Возможно совместное сжигание топливных гранул из помета с соломой, древесной щепой или углем. Основной недостаток этой технологии – усложнение схемы получения электроэнергии. Для ее получения необходимо включать в установку в качестве двигателя паровую турбину, что при малых мощностях (для местного применения является экономически не выгодным). Так же, тепловая энергия, которая вырабатывается в котлах при сжигании пеллет, не всегда необходима на предприятиях птицеводства (сезонная потребность в тепловой энергии).

Другой способ использования пеллет – термохимическое воздействие, с целью получения газообразного топлива.

По сравнению с анаэробным сбраживанием (получение биогаза) термохимическая газификация генерирует из единицы сырья больше потенциальной энергии. Применяется технология воздушной газификации брикитированного топлива в реакторе. При газификации помета, отходов птицеферм, птицефабрик в синтетический или генераторный газ получается смесь CO и H2 с теплотой сгорания равной 1200 Ккал. Основной недостаток генераторного газа – высокое содержание азота (45-48%) и двуокиси углерода (11-15%), вследствие чего газ имеет низкую теплоту сгорания.

В ОИВТ РАН разработана технологии пиролиза гранулированного помета.

Продуктами пиролиза являются твердый угольный остаток, газообразная смесь, состоящая из CO2, CO, H2, CH4, CnHm и $N_2$ , а также жидкая фракция, представляющая собой смесь пирогенетической воды и смол. Соотношение между массами жидкой и газообразной фракций составляет –1,5 и наиболее сильно зависит от темпа нагрева. Переработка жидкой фракции в газообразное состояние естественно приведет к увеличению степени конверсии исходного сырья в газ. Повысить степень преобразования исходного сырья в газ в процессе пиролиза можно за счет уменьшения содержания в конечных продуктах жидкой фракции. Для переработки жидкой фракции в газ применяются как каталитические, так и некаталитические методы. В экспериментах использовался метод, суть которого состоит в том, что газы и пары, образующиеся в процессе нагрева исходного сырья, фильтруются через пористую углеродную среду (угольный фильтр), поддерживаемую при фиксированной температуре ($T_ф$=1000°C). В качестве угольного фильтра используется угольный остаток, полученный в результате пиролиза исходного сырья. Благодаря развитой поверхности угольного фильтра происходит быстрый нагрев пиролизных газов и паров до температуры $T_ф$. В результате протекания гомогенных и гетерогенных химических реакций идет интенсивное разложение пиролизных газов и паров.

Эксперименты проводились на установке, схематически представленной на рис. 1. Установка состояла из высокотемпературного реактора, системы отбора и анализа газов и паров, образующихся в процессе нагрева исходного сырья.

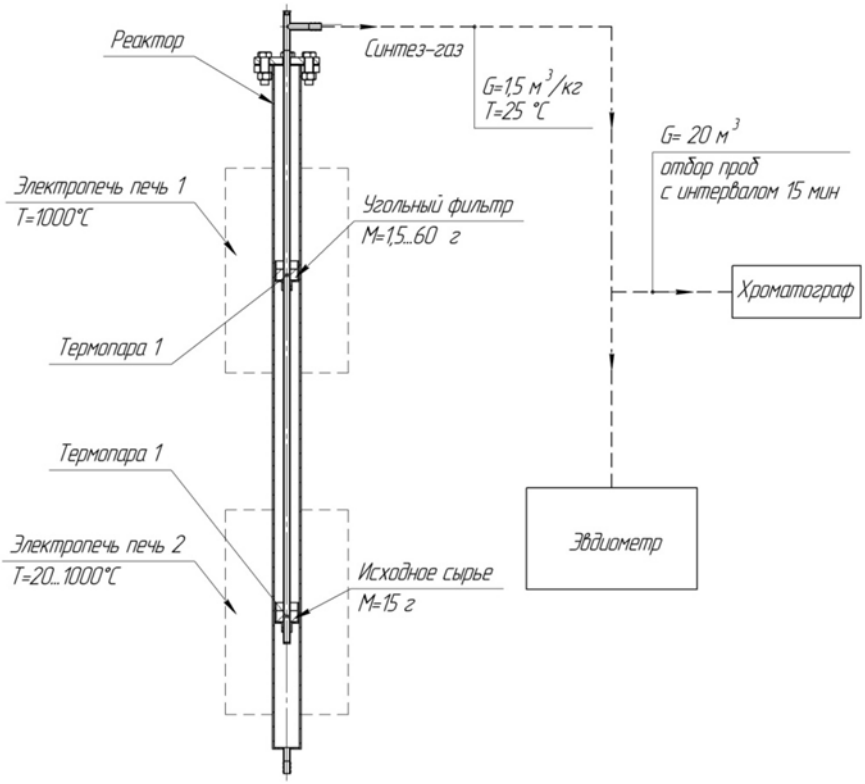



Рис.1. Схема экспериментальной установки

Реактор, представлявший собой металлическую трубу с внутренним диаметром 37 мм, которая помещается в две электрические печи. Высота каждой печи составляет300 мм. В нижней части реактора располагается исходное сырье, в верхней части – угольный фильтр, предварительно полученный путем карбонизации исходного сырья. помещался в двухсекционную печь, снабженную двумя независимыми нагревателями. Длина каждой секции была равна 300 мм. В нижней части реактора располагалось исходное сырье 1, в верхней части – угольный фильтр 2, предварительно полученный путем карбонизации исходного сырья. Размер угольного фильтра по высоте был равен 50 мм.

Перед проведением экспериментов верхняя часть реактора нагревалась до температуры $T_2$ = $1000^0$C, которая в дальнейшем поддерживалась постоянной. После этого нагревалась нижняя часть реактора. Темп нагрева составлял 10 град/мин. Таким образом, газы и пары, образующиеся в процессе пиролиза исходного сырья, проходили через пористую углеродную среду с фиксированной температурой $T_2$ (далее на этот режим будем ссылаться как на режим «пиролиз с крекингом»). В результате протекания гомогенных и гетерогенных химических реакций в высокотемпературной зоне происходило разложение пиролизных газов и паров. Степень химического преобразования последних зависела как от температуры в верхней части реактора $T_2$, так и от времени нахождения в высокотемпературной зоне. После реактора газовая смесь поступала в эвдиометр. Перед эвдиометром осуществлялся отбор проб для хроматографического анализа состава газов. При отсутствии угольного фильтра в верхней части реактора реализовывался стандартный режим пиролиза (далее этот режим будем упоминаться как режим «пиролиз»). При этом $T_2$ поддерживалась на уровне $200^0$C, чтобы не допустить конденсации летучих в верхней части реактора. Сопоставление состава и количества газов, образующихся при наличии и отсутствии угольного остатка в верхней части реактора, давало возможность

сравнить эффективность переработки исходного сырья в газ по двум рассматриваемым схемам: «пиролиз» и «пиролиз с крекингом».

В качестве исходного сырья использовались пеллеты из подстилочного куриного помета (диаметр 8 мм, длина 10 мм). Кажущаяся плотность пеллет обычно составляет около 1,2 г/см3, насыпная плотность – 0,6 - 0,75 г/см3, влажность – порядка 9%. Теплота сгорания (рисунок 2) была измерена на в термоанализаторе SDT Q600 и равняется $Q_H$ = 6,49 МДж/кг.

Результаты исследования «пиролиза» представлены на рисунках 2 и 3.

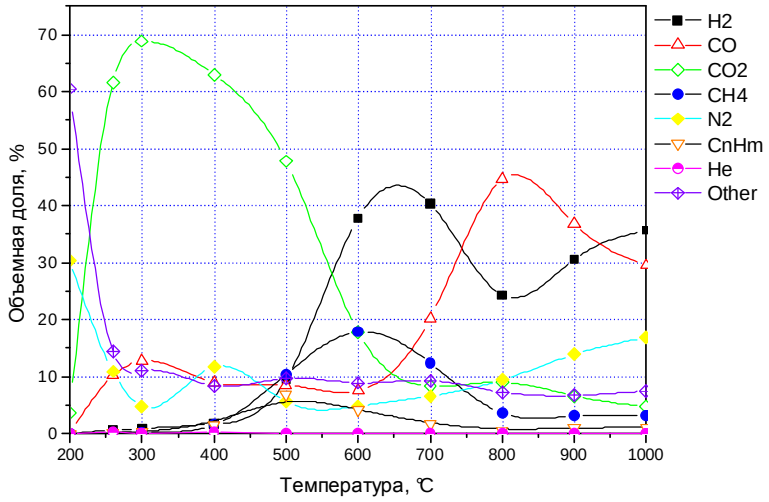



Рис.2. Химический состав пиролизного газа в зависимости от температуры

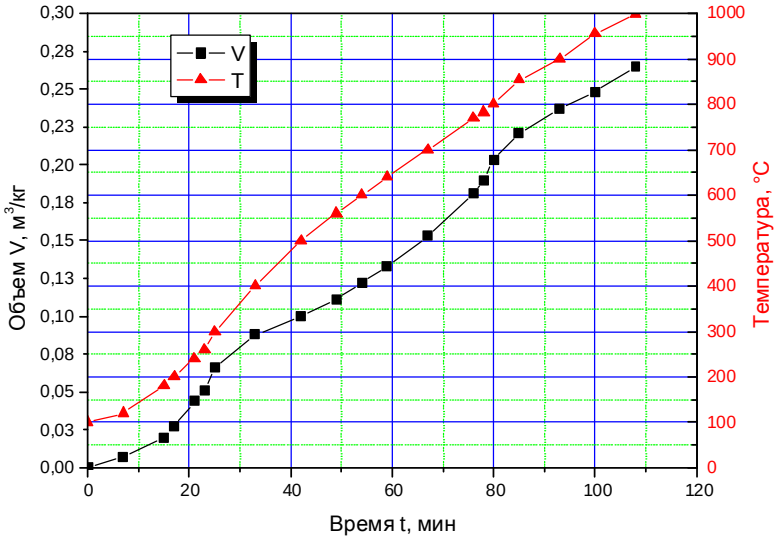



Рис.3. Зависимость температуры и объема выделившегося газа от времени

Выход газа из пеллет растет пропорционально увеличению температуры, и при температуре $1000^0$C составляет 0,26м$^3$/кг. В составе газа много негорючих элементов. В результате «пиролиза» образуется большое количество жидкой фракции.

Результаты эксперимента «пиролиз с крекингом» представлены на рисунках 4 и 5.

На рисунке 4 видно, что выделившийся газ состоит в основном из 2х компонентов: $H_2$ и CO. Из рисунка 5 видно, что объем выделившихся газов при «пиролизе с крекингом» гораздо выше, чем при «пиролизе». Это свидетельствует о том, что вся жидкая фракция перешла в газообразную.

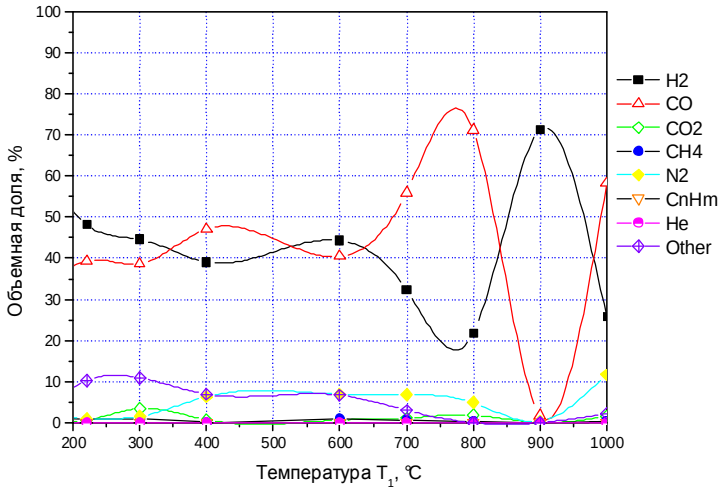



Рис.4. Химический состав пиролизного газа в зависимости от температуры

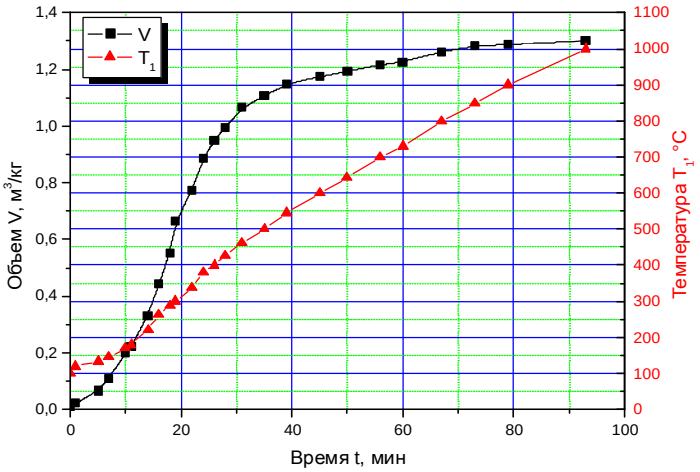



Рис.5. Зависимость температуры и объема выделившегося газа от времени

Таким образом в результате исследований показано, что пеллеты из куриного помета могут быть использованы для получения высококаллорийного газа по схеме «пиролиз с крекингом». Полученный газ может в дальнейшем использоваться в качестве топлива в газопоршневых двигателях для получения электроэнергии, что позволит решить как экологические проблемы, так и проблемы энергонезависимости птицефабрик.

**Литература:**

1. Россия – крупнейший в мире импортер замороженных частей тушек и субпродуктов из кур // РБК, 21 июля 2010.
2. Биоэнергетический комплекс «БИОЧЭК»: описание биокомплекса.
3. Переработка отходов животноводческих и птицеводческих комплексов и ферм в эффективные биологические удобрения и энергию. ОАО «БАШГИПРОАГРОП» Уфа – 2010.
4. *Гелетуха Г.Г., Железная Т.А.* Обзор технологий газификации биомассы // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. – N 2, с.2-6.
5. *Кислицын А.Н.* Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная промышленность, 1920.
6. *Kosov V.V., Kosov V.F., Maikov I.L., Sinelshchikov V.A., Zaichenko V.M.* High calorific gas mixture produced by pyrolysis of wood and peat. The Proceedings of 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June – 3 july 2009, Hamburg, Germany. P. 1085 – 1088.

# ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ

Зайченко В.М., Сычев Г.А.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: george.sytchev@gmail.com*

Торрефикация является относительно новым и перспективным способом улучшения характеристик органического сырья растительного происхождения перед его использованием в качестве твердого топлива. Он представляет собой процесс предварительной термической обработки измельченной или гранулированной биомассы при температурах до 300…320°C. Процесс сопровождается не только удалением влаги, т.е. сушкой исходного сырья, но и термической деструкцией гемицеллюлозы, входящей в состав биомассы. В результате образуется твердый гидрофобный продукт, называемый «отожженной биомассой» или «биоуглем». Отжиг в сочетании с гранулированием (пеллетизацией), представляет собой так называемый ТОП-процесс и приводит к повышению плотности и удельной теплоты сгорания биомассы. Последняя в зависимости от условий, при которых проводится отжиг, может достигать величины 19 – 23 МДж/кг. (в случае использования в качестве исходного сырья древесных отходов). Теплота сгорания сухой древесины и обычных древесных пеллет не превышает величины 18 МДж/кг. Таким образом, в результате использования ТОП-процесса для обработки биомассы биогранулы приобретают гидрофобные свойства, что наряду с повышением удельной теплоты сгорания приводит к существенному снижению расходов на транспортировку, упрощает условия хранения и дальнейшего их использования в качестве твердого топлива.

Происходящая в процессе торрефикации термическая деструкция гемицеллюлозы, входящей в состав исходного органического сырья, приводит к тому, что одновременно с основным твердым продуктом образуется некоторое количество летучих, которые представляют собой смесь конденсирующихся и неконденсирующихся газов и паров. Неконденсирующиеся летучие в основном состоят из двуокиси и окиси углерода, в то время как конденсирующиеся летучие это смесь паров воды, уксусной кислоты, метанола, муравьиной и молочной кислот, а также фурфурола.

Работа посвящена экспериментальному исследованию тепловых эффектов, проявляющихся в процессе нагрева образца в диапазоне температур от 200 до 270°C. Наложение этих эффектов, как показывают эксперименты, может привести к перегреву, либо к возгоранию сырья. Для определения экзотермического эффекта процесса пиролиза твердого углеводородного топлива используется метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Дифференциальная сканирующая калориметрия (далее ДСК) позволяет регистрировать тепловой поток, который характеризует происходящие в веществе изменения в результате нагрева или охлаждения.

Эксперименты по выявлению экзотермических эффектов проводились на термоанализаторе SDT Q600 путем нагрева образца со скоростью 10 °C/мин при различных скоростях продувки инертным газом (азотом). В качестве образцов использовались древесные пеллеты средней влажности 5-6 %. Были обнаружены два экзотермических пика (температура проявления первого ~ 200 °C, второго ~ 270 °C) и произведена их оценка по отношению к теплоте, подводимой для

нагрева образца.

В процессе изучения процесса торрефикации гранулированного топлива (на примере древесных пеллет) была обнаружена проблема – при нагреве большого объема пеллет на стендовой установке до температуры порядка 270 $^{o}$C активизировался процесс самостоятельного разогрева сырья вплоть до 500 $^{o}$C, причем процесс сопровождался возгоранием. Данное явление делает невозможным использование установки по назначению (для получения синтез-газа). Эту проблему стало возможным решить путем охлаждения реактора введением воды в активную зону.

Природа теплового эффекта твердо не установлена, недостаточно ясно, за счет каких реакций обеспечивается выделение тепла. В тепловой эффект пиролиза древесины основную долю вносит тепло экзотермического распада лигнина. Судя по росту величины теплового эффекта, при повышении конечной температуры пиролиза даже после выделения основной части летучих продуктов в момент формирования структуры угля, можно полагать, что реакции перестройки структуры угольного остатка является важным источником тепловой энергии. Известно также, что если в подвергаемом пиролизу сырье присутствует более 15 % кислорода, то тепловой эффект терморазпада положителен. Выделение тепла при этом связано с перестройкой структуры компонентов древесины, сопровождающейся образованием новых кислородсодержащих соединений с более выгодным энергетическим состоянием - окиси и двуокиси углерода.

На данном графике представлена зависимость теплового потока от времени в процессе торрефикации. На графике представлен процесс торрефикации при трех режимных параметров температуры – 230, 250 и 270 ˚C (синяя, красная и черная кривые соответственно). Как видно, экзотермический эффект присутствует только при температуре торрефикации 270 ˚C.

Первый экстремум во всех графиках соответствует выходу влаги из образца, второй – плавлению лигнина.

Эксперименты по торрефикации древесных пеллет длились 100 минут.

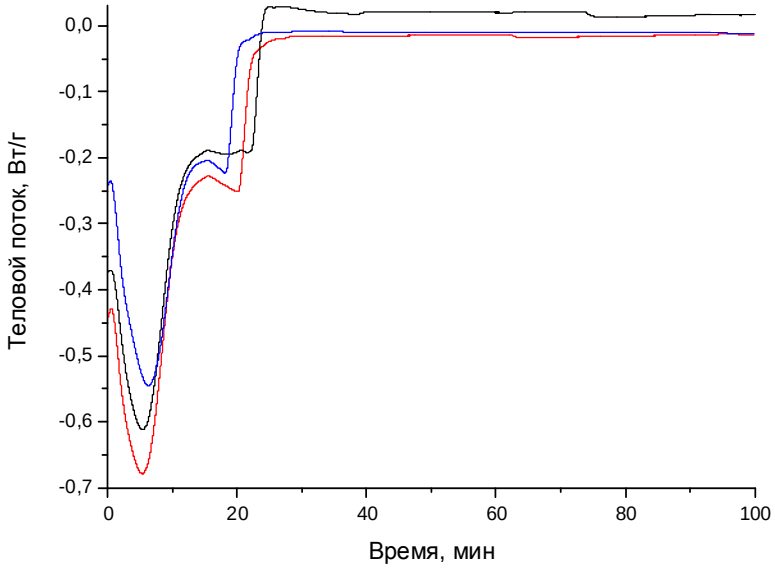



Рис.1. Древесная пеллета

Помимо экспериментов по торрефикации была проведена серия экспериментов по нагреву до 370 $^{o}$C (температура была выбрана экспериментально, как наиболее очевидно выражающая скачок теплового потока при переходе к зоне изотермии) и выдержке образцов при этой температуре. Было

выявлено два экстремума, характеризующих экзотермические эффекты (температура проявления первого ~ 200 °С, второго ~ 270 °С). Суммарный тепловой эффект этих пиков составляет 140 Дж/г.

Эксперименты проводились при следующих скоростях продувки – 20, 50 и 100 мл/мин. Сделан вывод, что в рамках данного прибора скорость продувки не значительно влияет на регистрацию теплового потока. Так же проводился эксперимент с закрытой чашей с образцом, так как было сделано предположение о возможном теплоуносе продувочным газом из объема тигля с образцом. Эксперимент опроверг данное предположение.

Тепловые потоки, снимаемые с образцов при трех скоростях продувки представлены на следующих графиках:

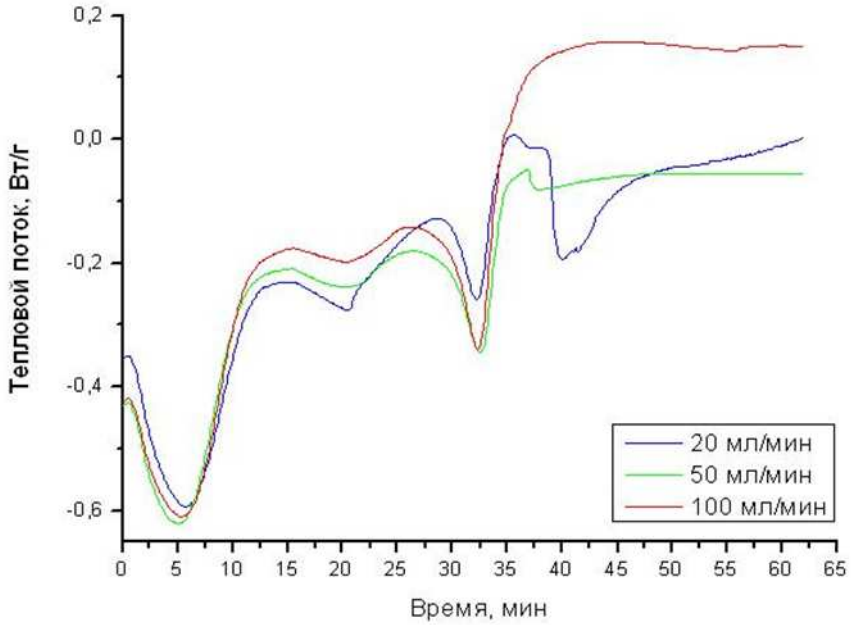



Рис.2. Графики тепловых потоков при различных скоростях продувки

Следовательно, при составлении уравнения теплового баланса можно уменьшить количество теплоты, подводимой к объему сырья, если присутствует экзотермический эффект.

**Литература:**

1. *Батенин В.М., Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А.* Термические методы переработки древесины и торфа в энергетических целях. Теплоэнергетика, N11, 2010. С.36-42.
2. *Косов В.Ф., Синельщиков В.А., Сычев Г.А.* Низкотемпературный пиролиз как способ улучшения теплотехнических характеристик твердых углеводородных топлив, 2011.

# ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ВОЗДУШНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР

Тюхов И.И., Раупов А.Х.

*Московский государственный университет инженерной экологии;*
*Москва, Россия; 105066, ул.Старая Басманная 21/4; e-mail: ityukhov@yahoo.com, raupov_a@list.ru*

**Введение.** От четверти до трети всей энергии, потребляемой человечеством, идет на отопление жилых и производственных помещений. Как известно интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в здания, сооружения и дома является важной и актуальной задачей [1], способствующей активному внедрению экологически чистых («зеленых») технологий и экономии традиционных ресурсов. Система оценок «зеленых» технологий опирается на ряд технических требований к зданиям, к которым имеют отношения также и энергетическая инфраструктура и энергопотребления.

В соответствии с указанной тенденцией была поставлена задача создать низко затратный вертикальный воздушный солнечный коллектор (ВВСК) [2], интегрированный в подсобное помещение с летним душем для повышения комфортности, а также для удобства использования его в весенне-осенний период.

Следует отметить, что необходимым условием использования ВИЭ для теплоснабжения является предотвращения потерь тепла через ограждающие конструкции здания, особенно это относится к уже существующим помещениям, к которым предусмотрены интеграция энергетических установок на базе ВИЭ.

**Описание конструкции и принцип действия коллектора.** Для изучения работы ВВСК было выбрано помещение под душ, причем предусматривалось изготовление коллектора из дешевых, доступных и в то же время современных материалов. Объем помещения составил примерно 8 м$^3$ с отведенной под солнечный коллектор глухой стеной, по нормали, обращенной примерно на юго-восток. Для использования солнечной энергии считается наиболее эффективным южная ориентация здания, когда солнцеулавливающая поверхность направлена в сторону юга, однако допускается отклонения до 30° к востоку или западу [3]. Внешние габаритные размеры воздушного коллектора составили 2,2 х 2,0 х 0,1 м, что не вызвало необходимости дополнительных площадей и работ на крыше. Коллектор интегрирован на южной стороне снаружи параллельно плоскости утепленной стены толщиной 13см. Деревянная каркасная конструкция помещения утеплялась пластинами из минваты и слоем фольгированного пенофола. Основными элементами ВВСК являются прозрачное покрытие 4 и теплопоглощающая металлическая панель 5, установленные таким образом, что между ними находятся воздушные прослойки. Для размещения элементов коллектора был использован простейший деревянный каркас 1 в виде короба. Теплопоглощающая панель 5 представляет собой металлический лист, покрашенный в матовый черный цвет (краска на резиновой основе «Карибская ночь») и имеет форму черепицы (металлочерепица), что обеспечивает лучший теплообмен в коллекторе. В качестве прозрачного покрытия 4 применен листовой сотовый поликарбонат Polynex толщиной 6 мм. В нижней и верхней части южной стены 6, предусмотрены отверстия 2 и 3 разных размеров для циркуляции воздуха (рис.1).

Внешний вид коллектора представлен на фотографии (рис. 2).

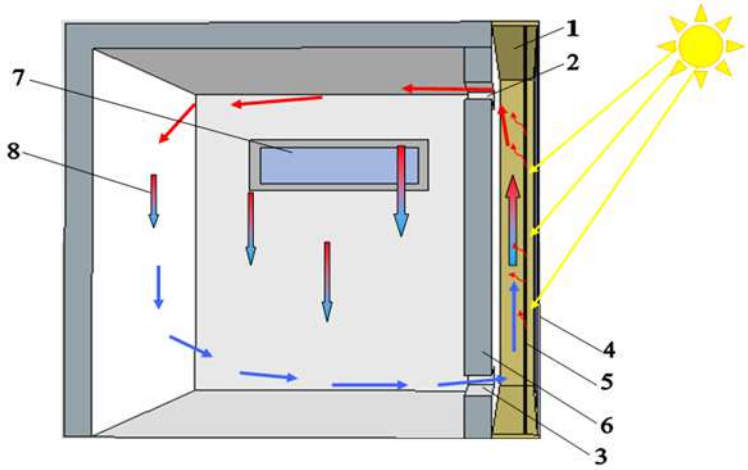



Рис.1. Вертикальный воздушный коллектор и его принцип действия (1 – деревянный каркас; 2, 3 – верхнее и нижнее отверстия соответственно; 4 – прозрачное покрытие – сотовый поликарбонат; 5 – теплопоглощающая панель; 6 – стена душевой; 7 – окно; 8 – циркуляция воздуха)

Рис.2. Вид ВВСК снаружи

Принципиальное отличие данного коллектора от классической вертикальной стены Тромба заключается в том, что здесь не используется капитальная массивная стена как тепловой аккумулятор, что конечно существенно ограничивает аккумулирующие возможности коллектора, но в тоже время, при интеграции в существующие сооружения не требует существенных капитальных затрат.

Принцип работы коллектора заключается в следующем. Солнечное излучение, проникая через прозрачное покрытие 4, поглощается черной панелью 5, хорошо поглощающей световое излучение. В результате греются воздушные слои между панелью, поликарбонатом и стеной. Нагретый в коллекторе воздух поднимается вверх и через отверстия проходит внутрь помещения. В свою очередь более холодный воздух из душевой через нижние отверстия проходит в воздушный канал коллектора. Таким образом, происходит циркуляция воздуха, и солнечный коллектор способствует повышению температуры воздуха в помещении (рис. 1). Теплопоглощающая панель 5 в ВВСК установлена так, что она имеет зазоры снизу и сверху, которые позволяют воздуху циркулировать через воздушный канал между панелью, стеной и прозрачной изоляцией (на рис.1 это не показано). Тем самым поднимающийся вверх воздух снимает тепло с внешней и внутренней поверхности теплопоглощающей панели 5.

Для проведения детального исследования на стене 6, как уже было отмечено выше, были предусмотрены входные и выходные отверстия различных форм и размеров. Из-за конструктивных особенностей сооружения не все отверстия располагались оптимальным образом, в частности, наличие несущей балки не позволило сделать достаточно большие отверстия, выше приемных поверхностей коллектора. Тем не менее, наличие нескольких входных и выходных отверстий различных размеров позволяет проводить многообразные измерения, располагая имеющимися в наличии разными датчиками температуры (цифровой мультиметр DT-838), термометры, термоанемометр (AZInstrument 8908) в различных местах при различных состояниях отверстий (открыто/закрыто) и внешних погодно-сезонных условиях (рис.3). Также на рис. 3 показаны 4 круглых отверстия диаметром 15 мм.

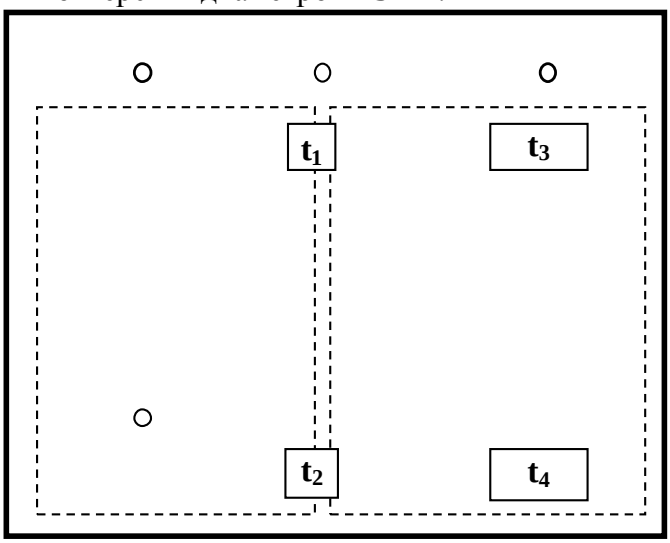



Рис.3. Расположение отверстий (вид изнутри, верхние круглые отверстия сделаны в несущей балке и расположены выше поглощающих излучение листов – показаны пунктиром). $t_1$- $t_4$ – месторасположения датчиков температур в коллекторе

Для наблюдения за работой коллектора использовались шесть датчиков температур: два в нижних отверстиях, два в верхних, один внутри душевой и один снаружи в тени. Одновременно снаружи проводились измерения освещенности с помощью четырехразрядного цифрового люксметра MS6610. Показания с измерительных приборов снимались с интервалом полчаса – час с утра до вечера в течение нескольких дней. Полученные результаты обработаны в программе Excel и отображены с помощью графических диаграмм (рис. 4 и 5).

Термоанемометром были также измерены скорости движения циркулирующего воздуха при естественных условиях и при использовании компактного вентилятора работающего от небольшого фотоэлектрического солнечного модуля (т.е фактически работает комбинированная ФЭТ технология [4]) . При интенсивном солнечном облучении естественная скорость воздуха достигала 0,1 – 0,3 м/с, а при включенном вентиляторе 0,7 – 0,9 м/с.

В качестве примера ниже приведены результаты измерений, проведенных 1 сентября 2012 г. (табл. 1).

В таблице используются обозначения в соответствии с рис.3: $t_1$ - температура на выходе, °С, $t_2$ - температура на входе, °С (средние отверстия),: $t_3$ - температура на выходе, °С, $t_4$ - температура на входе, °С (большие отверстия), t5 - температура внутри помещения, °С, t6 - температура снаружи в тени, °С, Е – освещенность, люксы.

Таблица 1. Результаты измерений, проведенных 1 сентября 2012г

| Время | E, лк до изм. | t1, °C | t2, °C | t1-t2 | t3, °C | t4, °C | t3-t4 | t5, °C | t6, °C | t5-t6 | E, лк, после |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7:17 | 3700 | 7,4 | 7,2 | 0,2 | 8 | 7 | 1 | 8 | 8 | 0 | 4000 |
| 9:24 | 103700 | 44,6 | 11,7 | 32,9 | 45 | 12 | 33 | 19 | 10,5 | 8,5 | 104000 |
| 9:57 | 123000 | 46,1 | 12,9 | 33,2 | 46 | 14 | 32 | 22 | 11 | 11 | 23000 |
| 10:33 | 20000 | 37 | 13,4 | 23,6 | 37 | 15 | 22 | 21,5 | 11,5 | 10 | 21000 |
| 11:02 | 121200 | 46,8 | 13,9 | 32,9 | 41 | 15,5 | 25,5 | 21 | 12 | 9 | 116000 |
| 11:30 | 22500 | 44,2 | 14,9 | 29,3 | 43 | 17 | 26 | 23 | 13 | 10 | 27000 |
| 12:00 | 42000 | 47,2 | 15,4 | 31,8 | 41 | 18 | 23 | 22 | 13 | 9 | 105000 |
| 12:30 | 55000 | 50,4 | 16 | 34,4 | 44 | 19 | 25 | 23,5 | 14 | 9,5 | 25000 |
| 13:00 | 110000 | 43,8 | 17,9 | 25,9 | 42 | 20 | 22 | 26 | 14 | 12 | 100000 |
| 13:40 | 14000 | 35,9 | 18 | 17,9 | 36 | 21 | 15 | 26 | 14 | 12 | 14000 |
| 14:53 | 20000 | 26,2 | 15 | 11,2 | 25 | 18,5 | 6,5 | 21 | 13,5 | 7,5 | 12000 |
| 15:33 | 12000 | 25,1 | 14,8 | 10,3 | 23 | 18 | 5 | 21 | 13,5 | 7,5 | 20000 |
| 16:12 | 14000 | 24,6 | 14,8 | 9,8 | 23 | 19 | 4 | 20 | 14 | 6 | 13000 |
| 16:47 | 8400 | 22,6 | 14,9 | 7,7 | 22 | 18 | 4 | 20 | 14 | 6 | 85000 |
| 17:31 | 7300 | 21,2 | 14,5 | 6,7 | 22 | 17,5 | 4,5 | 19 | 14,5 | 4,5 | 8600 |
| 18:07 | 5000 | 19,6 | 14,4 | 5,2 | 19 | 18 | 1 | 18 | 14,5 | 3,5 | 5500 |
| 18:42 | 4000 | 17,2 | 13,9 | 3,3 | 17 | 17 | 0 | 18 | 13 | 5 | 4300 |
| 19:30 | 2300 | 15,7 | 13,2 | 2,5 | 16 | 15,5 | 0,5 | 16 | 12,5 | 3,5 | 2100 |
| 20:32 | 300 | 14 | 12 | 2 | 14 | 13,5 | 0,5 | 14,5 | 12 | 2,5 | 200 |

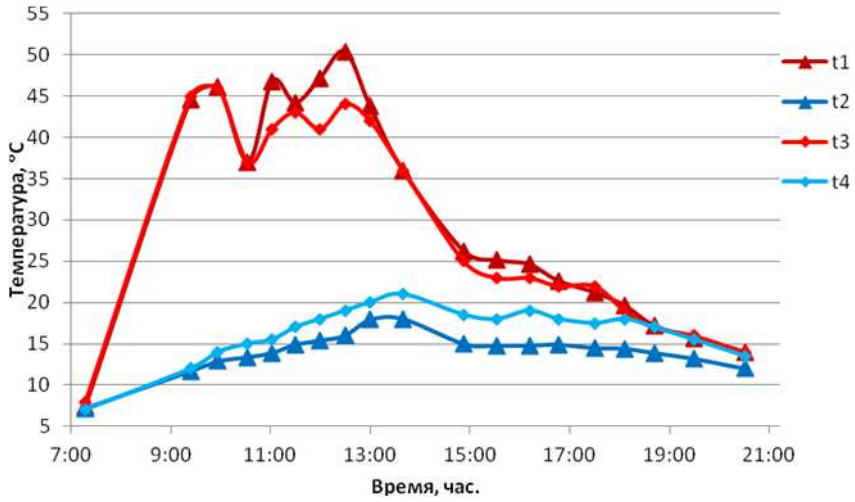



Рис.4. Температура воздуха на входе (внизу) и выходе (наверху) коллектора 1 сентября 2012г

Как видно из рисунков 4 и 5, на графике температура воздуха, поступающего в помещение душа, значительно выше в первой половине дня (юго-восточное расположение коллектора), т.к. во второй половине дня количество солнечных лучей, падающих на коллектор, под малыми углами к нормали становится меньше. Это обусловлено тем, что солнцеулавливающая поверхность коллектора имеет отклонение на восток. Меньшие перепады температур вызываются в первую очередь облачностью. Кроме того, сильное влияние оказывают ветер, дождь, затенения окружающих предметов и т.д.

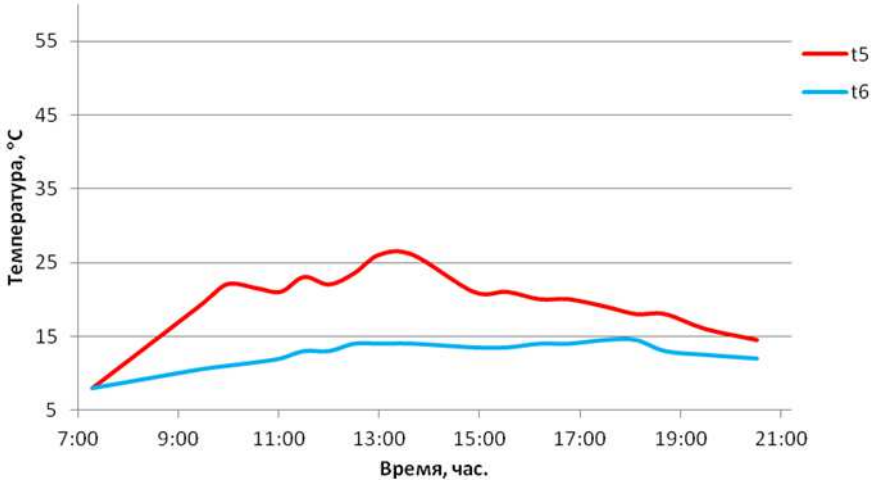



Рис.5. Температура воздуха внутри помещения и снаружи 1 сентября 2012г

Результаты измерений, проведенные в течении нескольких дней показали, что температура в помещении увеличивалась в среднем на 13-14$^{o}$C в зависимости от времени суток, облачности, также и от температуры наружного воздуха (рис. 6). В целом увеличилось время комфортного пребывания в душевом помещении.

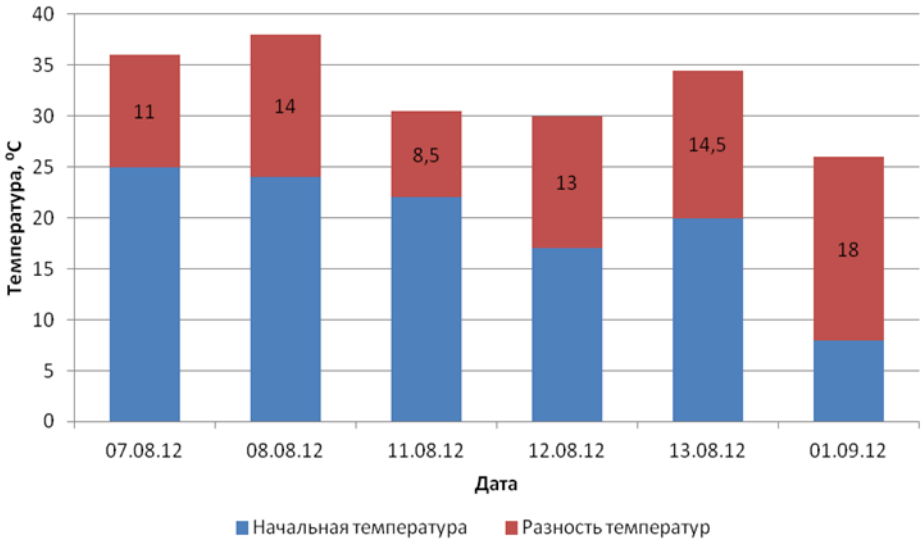



Рис.6. Повышение температуры в помещении за счет ВВСК

**Выводы.** Проведены измерения на реальном объекте и получены данные для составления соответствующих рекомендаций по созданию новых конструкций. Улучшились возможности для вентиляции, которая легко управляется открытием или закрытием соответствующих отверстий. Получены рекомендации по проведению дальнейших исследований.

**Рекомендации по практическому использованию.** По поводу ориентации коллектора, очевидно, что наиболее эффективным считается южная ориентация. Однако вышеприведенные результаты измерения свидетельствуют о том, что по возможности солнцеулавливающую поверхность ВВСК нужно разделить на две части и поверхности обеих частей направить в сторону юга, при этом одну с отклонением на восток, а другую с отклонением на запад. Такой подход способствует увеличению времени использования солнечной энергии для получения тепла.

Во время эксплуатации ВВСК при более холодной погоде необходимо исключить прямой контакт теплого воздуха, циркулирующего через коллектор, с

прозрачным покрытием. Соответственно, воздушный слой между прозрачным покрытием и теплопоглощающей панелью должен быть замкнутым.

Один из недостатков использования солнечной энергии заключается в том, что тепло производится больше тогда, когда оно меньше всего необходимо, особенно, в жаркие летние дни. В рассматриваемой нами установке наиболее подходящим решением данного вопроса является нагрев воды.

**Рекомендации по дальнейшим исследованиям.** Измерения, выполненные в натурных условиях, выявили необходимость проведения исследований в лабораторных условиях для более точного учета всех влияющих факторов (изменяющиеся уровни облученности, температура, ветер, затенения, влажность, дождь).

Несмотря на простоту конструкции, требуется провести б**о**льший объем измерений, в том числе с фотоэлектрическим модулем, обеспечивающим активную вентиляцию.

Поскольку на работу коллектора значительное влияние оказывает облачность, по возможности необходимо более детально рассматривать приход светового излучения, проходящего через облака, учитывая их разновидности и плотность.

**Литература:**

1. *Tyukhov I., Strebkov D., Litvinov P., Kuzhnurov Y., Tveryanovich Ed., Kivalov S.* “Integrating PV/thermal concentrator systems into buildings”, 2005.
2. *Тюхов И.И., Раупов А.Х., Дуничкин И.В., Симакин В.В.* «Возобновляемые источники энергии как основа развития экологических поселений» // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. трудов Международной научной конференции (Москва, 19–21 октября 2011г.); в 2 т. Т.1. / М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». М. : МГСУ, 2011. – 772с.
3. *Харченко Н.В.* Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко М.: Энергоатомиздат, 1991. 208с.
4. *Тюхов И.И.* Гибридные ФЭТ (PVT) – технологии в солнечной энергетике Возобновляемые источники энергии: Лекции ведущих специалистов. Выпуск 5. / Под общей редакцией А.А.Соловьева, С.В.Киселевой –- М.: Издательство ЧеРо, 2008, с. 100-118.

# АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ С ВОДОРОДНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

Счастливцев А.И., Малышенко С.П.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail:h2lab@mail.ru*

**Введение.** Использование геотермальной энергии позволяет получать электроэнергию и теплоту без каких-либо затрат ископаемого топлива. Однако, электрический КПД современных геотермальных станций остаётся относительно низким (12-18%), что связано в первую очередь с параметрами скважины, температура теплоносителя в которых не превышает 500 К. В основе преобразования геотермального тепла в электрическую энергию лежит паротурбинная технология, являющаяся наиболее эффективной и доступной в данном случае, т.е. в качестве рабочего тела используется водяной пар, а в качестве преобразователя его внутренней энергии в механическую – паровая турбина. Современные паровые турбины, работающие на перегретом паре и используемые в энергетике, как правило, имеют достаточно высокий внутренний КПД, существенно превышающий КПД влажнопаровых турбин ГеоТЭС. Сравним основные составляющие электрического КПД одноконтурных паротурбинных установок:

- термический КПД паротурбинного цикла
  - паровые турбины на перегретом паре (до 65%);
  - влажнопаровые турбины ГеоТЭС (менее 25%);
- КПД паровой турбины;
  - паровые турбины на перегретом паре (около 90%);
  - влажнопаровые турбины ГеоТЭС (менее 75%);

Таким образом, максимальный электрический КПД современной одноконтурной паротурбинной установки может составить около 55%, а для геотермальной не более 18%. Это связано в первую очередь с тем, что пар, на входе в геотермальную турбину подается с относительно низкими параметрами температуры и давления, что значительно снижает термический КПД паротурбинного цикла. Наличие в подаваемом паре влаги вынуждает конструкторов использовать в турбине ступени с сепарацией, что снижает ее внутренний КПД, а наличие оставшихся капель может приводить к более быстрому износу рабочих лопаток.

**Постановка задачи.** Для повышения КПД геотермальной энергоустановки, работающей по циклу Ренкина необходимо увеличить располагаемый теплоперепад на турбине. Это достигается путем увеличения температуры пара на входе в турбину и снижением давления на выходе из нее. Однако применение вышеуказанных методов не приведет к существенному возрастанию КПД установки без замены геотермальной турбины, на турбину, работающую на перегретом паре с более высоким внутренним КПД, применение которой оказывается возможным, при перегреве влажного пара, поступающего в турбину.

Для увеличения температуры пара необходим дополнительный подвод теплоты, при этом возможны 2 варианта: Первый - использование теплоты из внешних источников, например сжиганием дополнительного количества топлива,

однако это зачастую не представляется возможным либо из-за его дороговизны либо из-за соображений экологии. Второй – нагрев за счет собственной выработанной электроэнергии, при этом возникает ситуация, когда с одной стороны снижается количество электроэнергии, выданной конечному потребителю, а с другой стороны количество электроэнергии, вырабатываемой паротурбинной установкой возрастает за счет повышения ее абсолютного электрического КПД [1]. Таким образом, если количество дополнительно выработанной электроэнергии превышает количество электроэнергии, затраченной на перегрев, получаем увеличение общего КПД паротурбинной установки. Ранее нами предложено использовать водородо-кислородные парогенераторы для осуществления этой идеи [2].

Для такого перегрева пара необходимо использовать часть электроэнергии с целью разложения воды на водород и кислород. КПД получения водорода в современных электролизерах составляет 73-75 %, оставшиеся, примерно 25 % электроэнергии расходуются следующим образом: около 15-20 % идет на нагрев воды и повышение давления водорода и кислорода, что в конечном итоге повышает их энтальпию, а оставшиеся 5-10 % расходуются на собственные нужды электролизера (работу системы управления, прокачку воды и т.д.). В качестве пароперегревателя предлагается использовать водородно-кислородный парогенератор, в котором происходит сжигание водорода в кислороде при стехиометрическом соотношении компонентов с образованием водяного пара высокой температуры (до 1700 ˚С), при этом передача тепла основному расходу пара происходит путем смешения, что существенно упрощает конструкцию такого пароперегревателя и минимизирует тепловые потери. Схема с использованием такого перегрева показана на рис.1.

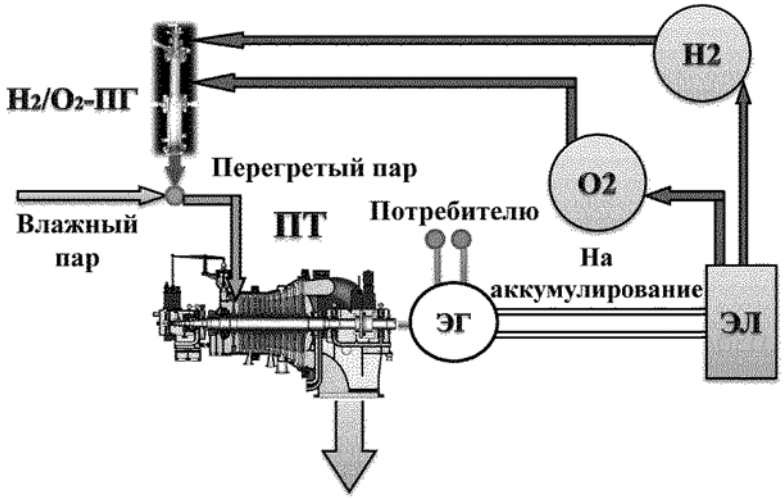



Рис.1. Схема с водородо-кислородным перегревом пара перед паровой турбиной

Исследования и разработки водородо-кислородных парогенераторов были инициированы теоретическими исследованиями, выполненными в конце 70-х начале 80-х годов прошлого столетия в СССР [3], США [4] и Германии [5]. В настоящее время в России созданы экспериментальные образцы водородо-кислородных парогенераторов киловаттного и мегаваттного класса мощности [6,7,8]. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что технические характеристики этих установок позволяют использовать их в современных энергетических установках как для перегрева пара, с целью повышения КПД паровых турбин, так и для производства пиковых мощностей. Подробно вопросы использования водородо-кислородных

парогенераторов в энергетике, а также задачи их дальнейших разработок рассмотрены в [6-10].

**Анализ изменения кпд геотермальной установки при водородо-кислородном перегреве.** Оценка изменения КПД ГеоТЭС может быть выполнена аналогично [9]. Поскольку для перегрева водяного пара используется энергия, выделяющаяся при сгорания водорода в кислороде необходимо оценить расход водорода, требуемый для перегрева. Рассчитаем тепловую мощность выделяемую в водородо-кислородном парогенераторе при сгорании в нем водорода с расходом $G_{H2}$ и низшей теплотой сгорания $Q_{H2}$=120 МДж/кг:

$$N_{H2} = G_{H2} \cdot Q_{H2}. \quad (1)$$

Обозначим относительный расход добавляемого для перегрева пара α, учитывая расход подаваемого кислорода, который при стехиометрическом соотношении компонентов равен 8•$G_{H2}$ следующим образом:

$$\alpha = \frac{G_{H2} + 8 \cdot G_{H2}}{G_{П}} = \frac{9 \cdot G_{H2}}{G_{П}} \quad (2)$$

где Gп - основной расход пара на входе в паровую турбину на номинальном режиме.

Суммарный расход пара на входе в паровую турбину после перегрева составит:

$$G_{П}' = G_{П} + G_{H2} + 8 \cdot G_{H2} = G_{П} + 9 \cdot G_{H2} = G_{П} \cdot (1+\alpha). \quad (3)$$

Составляющими абсолютного внутреннего КПД турбоустановки являются термический КПД цикла и внутренний КПД турбины. Запишем выражение для одноконтурной геотермальной энергоустановки с водородо-кислородным перегревом пара:

$$\eta_i = \frac{G_{П} \cdot (1+\alpha) \cdot H_0' \cdot \eta'_{0i} - \frac{N_{H2}}{\eta эл}}{Q_{1-2-3} + Q_{3-3'} - Q_{4'-1}}. \quad (4)$$

где $H_0'$ – располагаемый теплоперепад, $\eta'_{0i}$ – внутренний КПД турбины, $Q_{1-2-3}$, $Q_{3-3'}$, $Q_{4'-1}$ – подведенная и отведенная теплоты.

Для определения внутреннего КПД турбины при изменении влажности воспользуемся известным соотношением [11]:

$$\eta'_{0i} = \eta^{0}{}_{0i} \cdot \chi'_{ср} \quad (5)$$

где $\eta^{0}_{0i}$ – максимальный внутренний КПД паровой турбины, $\chi'_{ср}$ – средняя степень сухости пара в турбине.

Для определения абсолютного внутреннего КПД турбоустановки при различных значениях α используем соотношение:

$$\eta_i = \frac{(h_{вх}' - h_{4'}) \cdot \eta^{0}{}_{0i} - \frac{\alpha \cdot Q_{H2}}{9 \cdot \eta эл \cdot (1+\alpha)}}{\frac{h_{вх}}{(1+\alpha)} - h_{кв}}. \quad (6)$$

Проведем расчет для типовой геотермальной энергоустановки на следующие параметры:

- начальная температура пара на входе 200 ˚С;
- давление 1.5 МПа;
- давление в конденсаторе 5 кПа;

- влажность пара на выходе из турбины 14.5 %;
- внутренний относительный КПД турбины 71 %;
- абсолютный внутренний КПД энергоустановки 14 %.

Типичные значения $\eta^0_{0i}$ для влажнопаровых турбин ГеоТЭС составляют 0.70-0.80, для расчета примем его равным 0.8. Подставив данные в (1) и (6) при различных значениях α получим результаты, представленные на рис. 2.

При установке модернизированной турбины на перегретый пар $\eta^0_{0i}$ будет равен 0.85-0.9. При этом также следует учесть, что КПД турбины на перегретом паре при работе на влажном паре окажется меньше исходного, из-за нерасчетного режима работы. Изменение КПД геотермальной установки, при установке турбины на перегретый пар и изменение абсолютного КПД ГеоТЭС в зависимости от α представлено на рис.2.

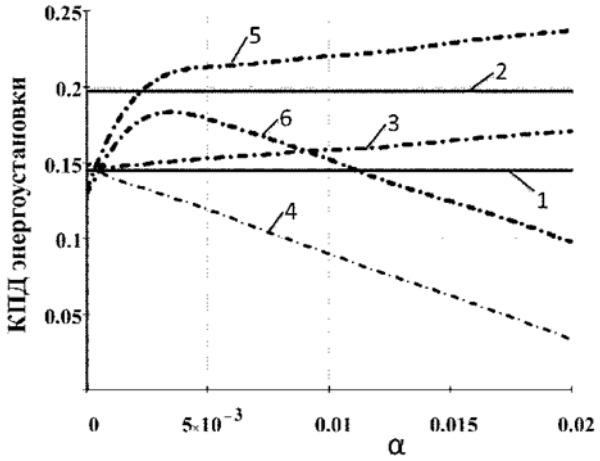



Рис.2. Изменение абсолютного КПД ГеоТЭС в зависимости от α (1 – КПД ГеоТЭС с влажнопаровой турбиной без использования перегрева; 2 – КПД ГеоТЭС при использовании турбины на перегретом паре, 3 – КПД ГеоТЭС при использовании перегрева с влажнопаровой турбиной без учета затрат на электролиз; 4 – КПД ГеоТЭС при использовании перегрева с влажнопаровой турбиной с учетом затрат на электролиз; 5 - КПД ГеоТЭС при использовании перегрева без учета затрат на электролиз и при установке турбины на перегретый пар, 6 – КПД ГеоТЭС при использовании перегрева с учетом затрат на электролиз и при установке турбины на перегретый пар)

Из рис.2 видно, что при перегреве пара КПД влажнопаровой турбины незначительно возрастает (линия 3), что обусловлено в основном увеличением термического КПД цикла и снижением потерь из-за высокой влажности пара на выходе, но с учетом затрат электроэнергии на производство водорода и кислорода общий КПД ГеоТЭС снижается (линия 4). При установке на ГеоТЭС турбины, работающей на перегретом паре, характер изменения КПД существенно изменяется. При значениях α близких к 0, когда влажность пара практически не изменяется, ее КПД оказывается ниже номинального для обеих типов турбин (линии 1 и 2), что обусловлено нерасчетным режимом работы (линия 5), однако при снижении влажности пара и выходе на расчетный режим работы он существенно возрастает с ростом α и может превысить КПД влажнопаровой турбины с учетом затрат электроэнергии на электролиз (линия 6) в области α от 0,001 до 0,015. При дальнейшем возрастании α затраты энергии на электролиз возрастают и КПД энергоустановки на перегретом паре становится меньше, чем КПД ГеоТЭС с влажнопаровой турбиной (пересечение линии 6 с линией 1).

Таким образом, затраты произведенной электроэнергии на перегрев пара не могут компенсироваться ростом внутреннего КПД влажнопаровой геотермальной турбины и увеличением располагаемого теплоперепада, однако,

при установке турбины на перегретый пар рост КПД энергоустановки при значениях $\alpha<0{,}015$ может компенсировать затраты на электролиз и увеличивать общий КПД энергоустановки на 1-3 % (рис. 2), а при учете возможного повышения давления перед турбиной за счет модернизации или исключения сепаратора пара тонкой очистки и снижения давления в конденсаторе – на 3-5%. Отметим также, что при производстве и аккумулировании водорода и кислорода возможно использование ГеоТЭС для покрытия неравномерностей графика нагрузки [9,10].

**Изменение стоимости электроэнергии от ГеоТЭС при водородо-кислородном перегреве.** При установке водородо-кислоордного пароперегревательного оборудования появляется ряд полезных свойств, которые могут снижать годовые издержки производства электроэнергии, тем самым снижая ее стоимость:

- снижение влажности пара на выходе из турбины приводит к уменьшению эрозионного износа проточной части, что повышает надежность оборудования и уменьшает количество вынужденных ремонтов;
- при увеличении температуры на входе в турбину облегчается ее пуск и снижается время выхода на рабочий режим;
- одним из самых ненадежных узлов влажнопаровых установок является сепаратор, при выходе из строя которого резко повышается влажность пара в проточной части турбины, что может приводить к выходу из строя оборудования. При установке водородо-кислородного пароперегревателя повышения влажности можно избежать, тем самым увеличивается надежность влажнопаровых установок и снижается время вынужденного ремонта, а также затраты по замене вышедших из строя деталей;
- появляется возможность покрытия неравномерностей графика нагрузки, что позволяет работать энергоустановке с номинальной мощностью практически постоянно при оптимальных значениях КПД.

Учитывая вышеприведенные обстоятельства, можно повысить коэффициент использования установленной мощности с 0.7..0.8 до $K_p$=0.85..0.95 в зависимости от мощности устанавливаемого дополнительного оборудования.

Годовые издержки производства представляют сумму затрат на топливо, составляющей капитальных затрат и эксплуатационных расходов:

$$И = И_T + И_K + И_{экспл}. \quad (7)$$

Поскольку для геотермальной установки в качестве источника энергии используется тепло Земли, то топливную составляющую принимаем равной 0. Составляющая капитальных затрат определяется следующим выражением:

$$И_K = P_a \cdot \Sigma S_{ст} + И_{Т.Р.} = 1.2 \cdot P_a \cdot \Sigma S_{ст}. \quad (8)$$

где $P_a$ – коэффициент амортизации, $И_{Т.Р.}$ – ежегодные затраты на текущий ремонт, которые примем в размере 20 % от амортизационных отчислений, $\Sigma S_{ст}$ – полная стоимость сооружения электростанции.

Эксплуатационные затраты включают в себя заработную плату обслуживающего персонала и прочие общестанционные расходы и составляют 55-65 % от амортизационных отчислений. Удельная стоимость 1 кВт установленной мощности ($S_{ст}$) составляет 900-1200 \$/кВт, а для дополнительного оборудования ($S_{доп}$), где 80-90 % стоимости составляет стоимость электролизеров, эта величина составляет 1700-2200 \$/кВт. Примем среднее значение как $S_{доп}=2 \cdot S_{ст}$.

Обозначим относительную мощность устанавливаемого дополнительного

оборудования θ, а номинальную мощность станции $N_{ст}$ [кВт] и получим полную стоимость дополнительного оборудования:

$$\Sigma S_{доп} = 2 \cdot \theta \cdot S_{ст} \cdot N_{ст} . \quad (9)$$

Составляющая капитальных затрат при установке дополнительного оборудования также увеличится:

$$И'_К = P_а \cdot \Sigma S_{ст} + P_а \cdot 2 \cdot \theta \cdot \Sigma S_{ст} + 0{,}6 \cdot 0{,}2 \cdot P_а \cdot \Sigma S_{ст} = P_а \cdot \Sigma S_{ст} \cdot (1{,}12 + 2 \bullet \theta) . \quad (10)$$

Составляющая эксплуатационных затрат при установке дополнительного оборудования практически не изменится, поскольку для его обслуживания потребуется незначительное увеличение штата работников. Подставив выражения (8), (9), (10) в (7) получим выражение для определения издержек при установке дополнительного оборудования:

$$И' = P_а \cdot \Sigma S_{ст} \cdot (1{,}12 + 2 \bullet \theta) + 0{,}6 \cdot P_а \cdot \Sigma S_{ст} . \quad (11)$$

Стоимость произведенной электроэнергии определяется следующим выражением:

$$Э_{эн} = \frac{И_{экспл}}{N_{ст} \cdot 8760 \cdot 0{,}8} . \quad (12)$$

Окончательно для расчета стоимости электроэнергии, при установке дополнительного оборудования получим:

$$\frac{Э'_{эн}}{Э_{эн}} = \frac{(1.12 + 2 \cdot \theta + 0.6) \cdot 0.8}{(1.2 + 0.6) \cdot K'_p} = \frac{(1.72 + 2 \cdot \theta) \cdot 0.8}{1.8 \cdot K'_p} . \quad (13)$$

где $Э'_{эн}$ - стоимость произведенной электроэнергии при установке дополнительного оборудования, $К'_р$ – коэффициент использования установленной мощности, после установки дополнительного оборудования.

Результаты расчета при различных значениях $К'_р$ и θ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценка стоимости электроэнергии ГеоТЭС при осуществлении водородо-кислородного перегрева пара

| **Θ** | **$К'_р$** | **$Э'_{эн}/ Э_{эн}$** |
|---|---|---|
| 0.01 | 0.82 | 0.94 |
| 0.02 | 0.84 | 0.93 |
| 0.05 | 0.87 | 0.93 |
| 0.1 | 0.91 | 0.94 |
| 0.15 | 0.94 | 0.96 |
| 0.3 | 0.96 | 1.07 |

Таким образом при оптимальном соотношении $К'_р$=0,85..0,90 и θ=0.03..0.07 снижение стоимости вырабатываемой электроэнергии составит примерно 6-7 %.

**Заключение.** Использование на геотермальных электростанциях оборудования, осуществляющего водородо-кислородный перегрев пара и турбин на перегретом паре повышает термодинамическую эффективность рабочего цикла и увеличивает внутренний КПД паровой турбины, что приводит к увеличению КПД электростанции на 3-5 %. Кроме этого, за счет повышения надежности оборудования, снижения затрат на ремонт и покрытия неравномерностей графика нагрузки общая стоимость электроэнергии может быть снижена на 6-7 %. По результатам проведенных оценочных расчетов, оптимальная доля добавляемого высокотемпературного пара, обеспечивающая наибольший КПД установки и наименьшую стоимость производимой электроэнергии, находится в диапазоне от

0.002 до 0.01.

В заключение отметим, что в настоящее время разработаны научно-технические основы создания нового оборудования для реализации рассмотренных выше схем ГеоТЭС и созданы экспериментальные образцы $H_2/O_2$ – парогенераторов тепловой мощностью до 25 МВт (ОИВТ РАН в кооперации с ОАО КБХА [8]).

**Литература:**

1. *Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г* «Введение в водородную энергетику». Монография /. М:, Энергоатомиздат, 1984.
2. *Малышенко С.П., Счастливцев А.И.* Патент на полезную модель № 84467 «Геотермальная установка для выработки электроэнергии с водородно-кислородным перегревом» от 21.01.2009.
3. *Стырикович М.А, Легасов В.А., Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П.* «Основные проблемы водородной энергетики» Доклад комиссии АН СССР по водородной энергетике, М.: Изд. ИВТАН, 1978.
4. *Wright D.E., Lucci A.D., Campbell J., Lee J.C.* «Hydrogen turbine power conversion system assessment» NASA-CR 135298, 1978.
5. *Wojkowsky H., Schnurberger W., Sternfeld H.J.*: ”Evaluation of attainable efficiencies and for generation of electricity from hydrogen”, Commision of the European Community, Contract No. 404-78-7 EHD. Report EUR 7529 DE, 1981.
6. *Malyshenko S.P., Gryaznov A.N., Filatov N.I.*: “High-pressure H2/O2-steam generators and their possible applications”, Int. Journ. Hydrogen Energy, V.29. P.589-596, 2004.
7. *Малышенко С.П., Бебелин И.Н., Волков А.Г., Грязнов А.Н.:*” Разработка и исследование экспериментального водородо-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т)”, Теплоэнергетика, № 8, с.48-52, 1997.
8. *Малышенко С.П., Пригожин В.И., Рачук В.С.* «Водородо-кислородные парогенераторы», Современное машиностроение, № 2-3 (8-9), с. 54-59, 2009.
9. *Малышенко С.П., Назарова О.В., Сарумов Ю.А.* "Некоторые термодинамические и технико- экономические аспекты применения водорода в энергетике", Атомно-водородная энергетика и технология. Вып.8 под ред. В.А. Легасова. М:, Энергоатомиздат, с.16-21, 1988.
10. *Трухний А.Д., Изюмов М.А., Поваров О.А., Малышенко С.П.* «Основы современной энергетики». Том 1. Современная теплоэнергетика / под ред. А.Д. Трухния, М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
11. *Маргулова Т.Х.* «Атомные электрические станции»,. Учебник для вузов по специальности «Атомные электрические станции и установки». М., «Высшая школа», 1969.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ГАЗОДОБЫЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВОГО МЕТОДА

Смолкин А.К., Торчинский В.М.

*ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Россия, Москва; 125412, ул.Ижорская 13, стр.2; e-mail: satu_rn@rambler.ru*

**Введение**. В настоящее время большое внимание уделяется более эффективной добыче углеводородов и внедрение новых методик интенсификации добычи. Опыт газодобывающей промышленности показывает, что одной из основных является проблема повышения степени извлечения газа и конденсата из продуктивных пластов. Из анализа данных разработки большого числа месторождений следует, что в ряде случаев коэффициент газоотдачи оказывается недопустимо низким (на некоторых месторождениях он не превышает 0,3 –0,5), а пластовые потери конденсата соизмеримы с потерями нефти в пласте. В настоящее время все газовые и газоконденсатные месторождения разрабатываются на режиме истощения (т.е. до того момента, когда давление в пласте станет равным давлению в устье скважины), что обуславливает низкие коэффициенты конденсатоотдачи и ограниченность периода постоянной добычи газа.

В данной работе будет рассмотрен волновой метод интенсификации добычи газового конденсата, разработанный в ОИВТ РАН. Газовый конденсат (один из видов углеводородного сырья) представляет собой сложную смесь метана и высших производных метанового ряда с высоким содержанием метана (более 0,7 мольных долей). Из множества методов, предлагаемых для интенсификации добычи газового конденсата, наибольшее практическое применение нашел метод закачки сухого газа в действующую скважину или сайклинг-процесс. Сайклинг-процесс - способ разработки газоконденсатных месторождений с поддержанием пластового давления посредством обратной закачки газа в продуктивный горизонт. При этом происходит частичная газификация и оттеснение жидкостной пробки от забоя скважины и дебит на некоторое время возрастает. Применение этого метода требует больших затрат газа, наличия мощных высокопроизводительных компрессоров и дает кратковременный эффект в случае, если газовый конденсат в пласте находится при термобарических условиях, соответствующих закритической области фазовой диаграммы.

**Обзор методов повышения конденсатоотдачи**.

*Закачка газа (сайклинг-процесс) или жидкости***.** После ввода месторождения в эксплуатацию из продуктивного пласта отбирают углеводородную смесь в режиме истощения до давления максимальной конденсации этан-пропан-бутановой фракции ($C_2$ - $C_4$) пластовой смеси. Затем осуществляют закачку сухого углеводородного газа для частичного поддержания пластового давления, причем при содержании фракции $C_2$ - $C_4$, меньшем двухкратного содержания стабильного конденсата ($C_{5+}$), перед закачкой сухого углеводородного газа создают в пласте оторочку объемом не менее 15% объема пор зоны воздействия из углеводородного газа, насыщенного фракцией $C_2$ - $C_4$ при текущих пластовых давлений и температуре.

*Использование растворителей*. Промывка скважин различными растворами нашла широкое применение на нефтяных месторождениях.

Аналогичные методы предложены для газоконденсатных скважин. Кроме растворителей, устраняющих кольматациюприскважинной зоны, рассматривается закачка реагентов, выделяющих тепло в процессе реакции в скважине. Фазовое равновесие газоконденсатной смеси смещается в сторону газовой фазы, что должно приводить к увеличению выхода газоконденсата.

*Воздействие взрывом, акустическими и упругими волнами, электромагнитное воздействие.* Сущность способа заключается в бурении по пласту горного массива протяженных горизонтальных скважин и воздействии через них на продуктивный пласт. Для этого большую часть пласта охватывают горизонтальными скважинами. По всей их длине укладывают в сплошной оболочке взрывчатое вещество с обеспечением теплоты взрыва на единицу длины скважины от 3500 до 14000 ккал/м и заполнением взрывчатым веществом объема горизонтальных скважин от 5 до 20% при заполнении остального объема скважин жидкостью. Перед моментом проведения взрыва в обсаженную часть горизонтальных скважин опускают пакерное устройство.

*Тепловое воздействие.* Предлагаются различные тепловые методы, обладающие наибольшей эффективностью при добыче газоконденсата. Их идея сводится к помещению источника тепла непосредственно на забой скважины и нагрев последнего до определенной температуры. В этом случае удается избежать непроизводительных потерь тепла, возникающих, например, при подаче тепла с поверхности. Призабойную зону прогревают при помощи глубинных электронагревателей и газонагревателей, нефтепродуктами, водой и паром, а также путем термохимического воздействия.

Все вышеописанные методы воздействия на газоносные пласты приводят к необратимым экологическим последствиям, приводя к выбросам опасных веществ в атмосферу, осаждение их непосредственно в самом пласте. В связи с этим в ОИВТ РАН был разработан волновой способ воздействия на газоконденсатные системы не приводящий к неблагоприятным воздействиям на окружающую среду и в то же время дающий значительный энергетический и экономический эффект.

**Экспериментальные исследования.** Эксперименты по исследованию влияния волновых методов воздействия на газоконденсатные системы проводились на экспериментальном стенде «ПЛАСТ», разработанном в ОИВТ РАН (рис.1, 2).

Рис.1. Экспериментальный стенд «Пласт»

Были проведены серии экспериментов с использованием различных конструкций генераторов высокого давления. В качестве модельной смеси была

выбрана трехкомпонентная смесь метан-пропан-бутан. Были испытаны генераторы трех различных типов - с роторным, поршневым и электромагнитным клапанами.

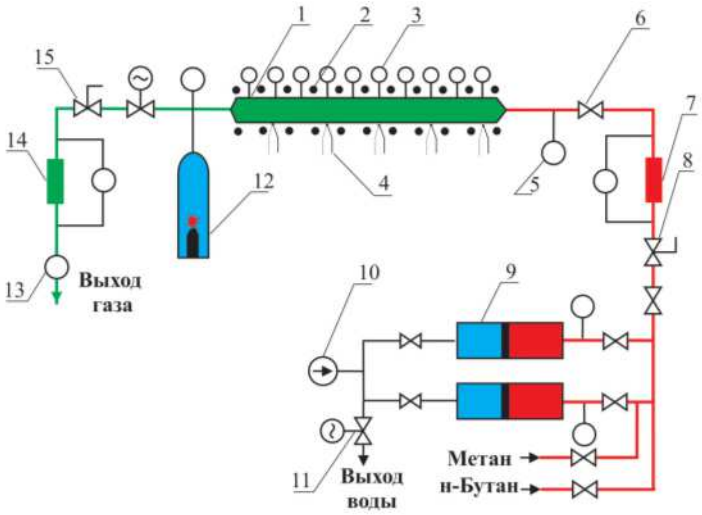



Рис.2. Блок-схема стенда «Пласт» (1-экспериментальный участок , 2-нагреватель , 3-тензодатчики , 4-термопары , 5-датчики давления , 6-вентиль, 7-расходомер, 8-редуктор, 9-разделительный цилиндр, 10-насос-дозатор, 11-вентиль с электроприводом, 12-газодинамическая труба , 13-газовый счётчик , 14-расходомер, 15-генератор высокого давления)

Частота волнового воздействия ограничивалась конструкцией генераторов и возможностями частотного регулятора оборотов двигателя и находилась в диапазоне 0.3-10 Гц. Фотографии генератора с электромагнитным клапаном приведены на рис.3.

Рис.3. Фотография генератора с электромагнитным клапаном

В результате проведенных испытаний для экспериментов по волновому воздействию на газоконденсатную пробку, возникающую в процессе фильтрации модельной смеси метан-пропан-бутан, был выбран генератор с электромагнитным клапаном.

После приготовления в блоке разделительных цилиндров смеси с необходимыми концентрациями компонентов насос-дозатор повышает давление в блоке и в экспериментальном участке до 150 атм, что при выбранной концентрации компонентов (80% метан, 15% пропан, 5% бутан) соответствует закритической области фазовой диаграммы. Затем давление на входе в ЭУ устанавливается равным 100 атм, на выходе - 65атм, перепад давлений

поддерживается постоянным до образования конденсатной пробки и появления автоколебаний общего расхода смеси.

После определения периода собственных колебаний системы в последующих экспериментах, которые проводились при тех же условиях (концентрации компонентов, давление и температура), после образования пробки включался генератор высокого давления. Амплитуда воздействия была связана с частотой генератора и составляла от 30 до 10 атм. Проводилось сравнение расходов смеси до и после волновых воздействий, проводящихся с различными частотами. При выбранных условиях эксперимента период собственных колебаний системы составлял 10 – 40 сек.

Для волнового воздействия были выбраны периоды 60, 40, и 6 с. Результаты представлены на рис.4.

Рис.4. Результат волнового воздействия с периодом 6 секунд

Волновое воздействие с периодами 60 и 40 секунд не вызывает изменения интегрального расхода, выходящего за пределы ошибки эксперимента. Воздействие с периодом 6 секунд вызвало увеличение расхода во время воздействия в 2.5 раза и интегрального выхода смеси на 10%.

**Экономическое обоснование целесообразности применения волнового метода на Вуктыльском газоконденсатном месторождении взамен сайклинг-процесса.** Вуктыльское ГКМ (газоконденсатное месторождение) - расположено в 160 км к В. от г. Ухта; входит в Тимано-Печорскую нефтегазоносную провинцию. Открыто в 1964, разрабатывается с 1968. Запасы газа 339 млрд. м3. Содержание стабильного конденсата 0,35 кг/м3. Эксплуатируется 77 фонтанирующих скважин. Перед транспортировкой газ подвергается первичной переработке и подается в магистральный газопровод Вуктыл - Ухта - Торжок. В настоящее время добыто только 30% газового конденсата и 90% газа. Пластовое давление составляет 2 - 4 МПа.

Эксплуатация Вуктыльского газоконденсатного месторождения с конца 1960-х годов на режиме истощения пластовой энергии привела к значительным потерям высококипящих углеводородов в виде выпавшего в пласте ретроградного конденсата. Ориентировочные оценки этих потерь дают цифру около 100 млн. т, что отражается на формировании конечной конденсатоотдачи, составляющей 33%.

Ежегодный объем закачиваемого сухого газа составляет 2,5 млрд. $м^3$, при этом суммарный отбор газа 2,7 млрд. $м^3$. Газ закачивается из магистрального газопровода «Уренгой-Сосногорск-Торжок», проходящего на территории

Вуктыльского ГКМ. На момент начала закачки сухого газа дебет Вуктыльского месторождения в режиме работы на истощение составлял 2,721 млрд. $м^3$ в год.

Газопровод «Уренгой-Сосногорск-Торжок» входит в газотранспортную систему «Уренгой-Надым-Перегребное-Ухта-Торжок», основной целью которой является обеспечение экспортных поставок по газопроводу «Ямал-Европа». Исходя их этого, можно посчитать стоимость закачиваемого газа

Ц = $2,5*320*10^6$= 800 млн. $ / год, где

320 $ – экспортная стоимость 1000 $м^3$ природного газа.

Второй основной составляющей расходов на осуществление сайклинг-процесса является удельный объем природного газа, затрачиваемого на работу газовых турбин в компрессорной станции.

Газ, используемый для закачки в пласт, с давлением $P_2$ порядка 7,5 МПа поступает с выхода КС-3 (компрессорная станция). На входе в КС-3 давление газа $P_2$ составляет 5,5 МПа. В состав КС-3 входят три ГПА 25 (газоперекачивающий агрегат) фирмы GeneralElectric. Запуск турбоагрегатов производится раскруткой газом из магистрали с выбросом в атмосферу, температура на выпуске в рабочем режиме (перед рекуператором) — 500 °C. В качестве привода центробежного компрессора в агрегатах применяются двигатели ПС-90ГП-25 (ОАО «Авиадвигатель»). На ГПА 25 установлены центробежные нагнетатели типа 321ГЦ2 производительностью 46, 44 млн. $м^3$/сутки, степенью сжатия 1,44 и конечным давлением на выходе из нагнетательного патрубка 7,45 МПа. Используя методику определения норм расхода и нормативной потребности в природном газе на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа «РД 153-39.0-112-2001» определим нормативную потребность газотурбинного КЦ (компрессорного цеха) в топливном газе для компримирования.

1). Определим политропную работу сжатия компрессорного цеха по формуле

$L_п=320,25*Z_1*T_1*Q*(e^{0,3}-1)$,

где $Z_1$ – коэффициент сжимаемости природного газа по условиям на входе в КЦ;

$T_1$ – температура природного газа на входе КЦ, К;

Q – объем природного газа, перекачиваемый за планируемый период времени, млн. $м^3$;

$e = P_2/P_1$ – степень повышения давления компрессорного цеха

Учитывая параметры и режим работы КС-3 политропная работа на сжатие газа, применяемого для сайклинг-процесса, составит:

$L_п=320,25*1,7*265*2500*((7,45/5,5)^{0,3}-1)=34377489,62$ кВт*ч

2). Определим потребность в топливном газе для компримирования по формуле

$П=Н*L_п$ ,

где Н – норма расхода топливного газа на компримирование в газотурбинном КЦ, $м^3$/кВт*ч. Для ГПА 25 эта величина составляет 0,376 $м^3$/кВт*ч.

Рассчитаем количество топливного газа, затрачиваемого на компримирование

П=0,376*34377489,62=12,92 млн. $м^3$

Что при стоимости 320 $ за 1000 $м^3$ составит

Ц = 320*12,92*1000 = 4,134 млн. $

Таким образом, суммарные среднегодовые затраты на осуществление данного способа повышения конденсатоотдачи пласта составляют порядка 804 млн. $.

Альтернативой данного метода может быть волновой метод увеличения выхода конденсатоотдачи, при применении которого возможно увеличить выход

конденсата на 15-20 %.

Примем потребляемую мощность акустического генератора 2 кВт. При эффективном коэффициенте преобразования электрической мощности в акустическую 10% и общем количестве генераторов на месторождении 77 шт. величина необходимой электрической энергии в год составит

2кВт*8760час*77/0,1=13,5*$10^6$ кВт*час/год

При стоимости электроэнергии 5 руб/кВт*час работа акустических генераторов в течение года будет стоить 2,25 млн. $.

Таким образом экономия затрат только на энергоресурсы при переходе на волновой метод интенсификации добычи газового конденсата на Вуктыльском ГКМ составит порядка 802 млн. $.

**Выводы.** В работе рассмотрена актуальная проблема повышения добычи углеводородного сырья. Дан обзор методов интенсификации добычи газового конденсата. Представлен метод волнового воздействия, разработанный в Объединённом институте высоких температур РАН. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанных моделей, наличие периодических решений, совпадающих по периоду с расчетными. Измеренные профили давлений на экспериментальном участке показали удовлетворительное согласие с расчетными кривыми. Экспериментальные исследования волнового воздействия на частотах автоколебаний показали увеличение расхода модельной смеси до 220%. Приведен расчет экономической целесообразности замены применяемого на Вуктыльском газоконденсатном месторождении сайклинг-процесса волновым методом интенсификации добычи газового конденсата. Показано, что волновой метод экономичнее и экологичнее, чем существующие другие способы воздействия на углеводородные системы.

**Литература:**

1. *Вяхирев Р.И., Гриценко А.И., Тер–Саркисов Р.М.* «Разработка и эксплуатация газовых месторождений». – М., ООО «Недра – Бизнесцентр», 2002. – 880 с.
2. *Директор Л.Б., Качалов В.В., Майков И.Л., Сковородько С.Н.* «Одномерная нестационарная модель двухфазной фильтрации газоконденсатной смеси» Препринт ОИВТ РАН № 2-441. – М., 2000. 46 с.
3. *Зайченко В.М., Майков И.Л., Смолкин А.К., Сокол Г.Ф., Торчинский В.М.* Экспериментальная установка для исследования двухфазного течения углеводородных смесей в модели газоконденсатного пласта // Приборы и техника эксперимента, 2012, №5, с. 95-98.

# ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОБУТАНА В СИСТЕМАХ ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛА

Алхасова Д.А.

*ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

В работе предложено применение изобутана, обладающего хорошими теплофизическими и термодинамическими показателями в технологии освоения петротермального тепла. Проведен расчет геотермальной скважины с учетом фазовых переходов при движении изобутана вверх по ее стволу.

При разработке технологических схем освоения геотермального тепла важным моментом является выбор рабочего тела. Рабочее тело должно обладать благоприятными физическими, химическими и эксплуатационными свойствами при заданных условиях работы. На основе термодинамического анализа пригодности использования в геотермальных энергоустановках различных низкокипящих рабочих тел установлено, что одним из наиболее перспективных является изобутан [1]. Этот природный газ обладает хорошими теплофизическими и термодинамическими показателями, не является разрушителем озонового слоя и не способствует появлению парникового эффекта, совместим с маслами и не вызывает коррозии оборудования. Изобутан в качестве рабочего тела нашёл широкое применение в холодильной промышленности в качестве хладагента (R600a), в тепловых насосах. Двухкомпонентная смесь, состоящая из 90% изобутана и 10% изопентана, используется в ГеоЭС Хибер (США) с установленной мощностью 70 МВт. Целью использования данной смеси является повышение эффективности преобразования геотермального тепла в электроэнергию.

В данной работе предложено применение изобутана в технологии освоения петротермального тепла, проведен расчет геотермальной скважины с учетом фазовых переходов при движении изобутана по ее стволу.

На рис.1 показаны линии аппроксимации изобутана и воды и их аппроксимации.

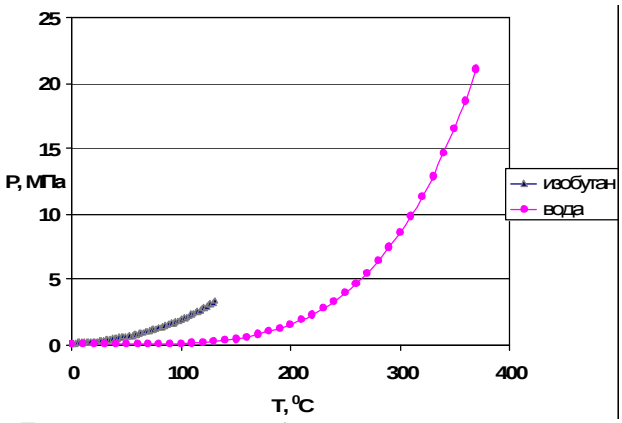



Рис.1. Линии насыщения изобутана и воды и их аппроксимации

Аппроксимация линии насыщения изобутана полиномиальной зависимостью имеет вид

$$p_{нас} = 7 \cdot 10^{-7} T^3 + 5 \cdot 10^{-5} T^2 + 6 \cdot 10^{-3} T + 0{,}15 \quad (0<T<130\ ^{o}\text{C};\ p, \text{МПа})$$

Как видно из графиков фазовый переход изобутана из жидкого в

газообразное состояние происходит при невысоких значениях давления насыщения. Следовательно, при подъеме вверх от забоя скважины до точки насыщения изобутан находится в жидкой фазе. Как только давление в скважине достигнет значения давления насыщения начнется фазовый переход из жидкого в газообразное состояние. От места фазового перехода до устья скважины вверх будет подниматься смесь пара и жидкости.

Снижение давления при движении вверх от забоя скважины можно вычислить по градиенту, состоящему и статической доли и гидравлических потерь, определяемых по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g - \frac{\xi Q^2}{4\pi^2 g R^5} = -\rho g - \frac{\xi M^2}{4\pi^2 \rho R^5},$$

где $\rho$ – плотность изобутана; $R$ – внутренний радиус скважины; $Q$ – объемный дебит скважины; $M$ – массовый расход скважины; z-вертикальная координата, направленная вверх; $\xi$ – коэффициент гидравлического сопротивления, принимаемый равным 0,02.

Распределение давления по стволу скважины для жидкой фазы можно определить следующим образом:

$$p = p_{заб} - \left( \rho g + \frac{\xi M^2}{4\pi^2 \rho R^5} \right) z, \qquad (1)$$

$p_{заб}$ – давление в забое скважины.

Из (1) можно найти точку начала фазового перехода из жидкого в газообразное состояние, место выхода давления на линию насыщения

$$z_{нас} = (p_{заб} - p_{нас}) / \left( \rho g + \frac{\xi M^2}{4\pi^2 \rho R^5} \right) \qquad (2)$$

Определим место фазового перехода в скважине высотой $H$=2500 м для изобутана с температурой $T$=100 ºС. Для расчетов возьмем следующие данные: $\rho$=500 кг/м$^3$; $g$=9,8 м/с$^2$; $R$=0,075 м; $\xi$=0,02; $p_{заб}$=13 МПа; $p_{нас}$=2 МПа; Q=2000 м$^3$/сут. По формуле (2) $z_{нас}$=2219 м, участок движения смеси пара и жидкости L=281 м (≈9-я часть всего пути).

На рис.2 представлены графики градиентов давления в зависимости от плотности среды в скважине при различных дебитах.

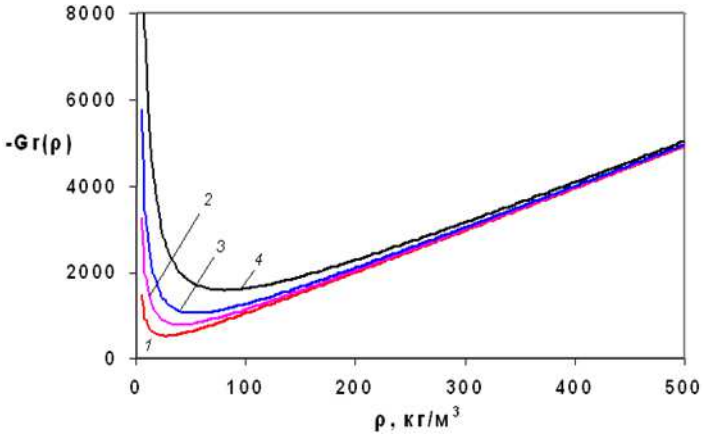



Рис.2. Градиент давления по стволу скважины для различных дебитов (1-М=500 т/сут; 2-М=750 т/сут; 3-М=1000 т/сут; 4-М=1500 т/сут)

Профиль температуры на участке $z < z_{нас}$ (жидкая фаза) можно рассчитать по формуле

$$T(z) = T_{пл} - \Gamma(z - \varphi^{-1} + \varphi^{-1} \exp(-\varphi z));$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_e}{R_i} + \frac{1}{\lambda_\Gamma}\ln\frac{R(t)}{R_e}\right)cQ}$$

$z$ – вертикальная координата, направленная вверх; $R_i$, $R_e$ - внутренний и внешний радиусы скважины; $R(t)$ – условный радиус температурного влияния скважины; $\Gamma$ – геотермический градиент; $\lambda_M$, $\lambda_\Gamma$ – коэффициент теплопроводности металла, горной породы, $c$ – объемная теплоемкость изобутана.

Температура, плотность, энтальпия жидкой и газообразной фазы изобутана на участке движения смеси согласно теории термодинамического равновесия находятся на линии насыщения. На рис.3 представлены графики зависимости энтальпии и внутренней энергии от давления насыщения для каждой из двух фаз [2]. Для жидкой фазы обе линии практически сливаются.

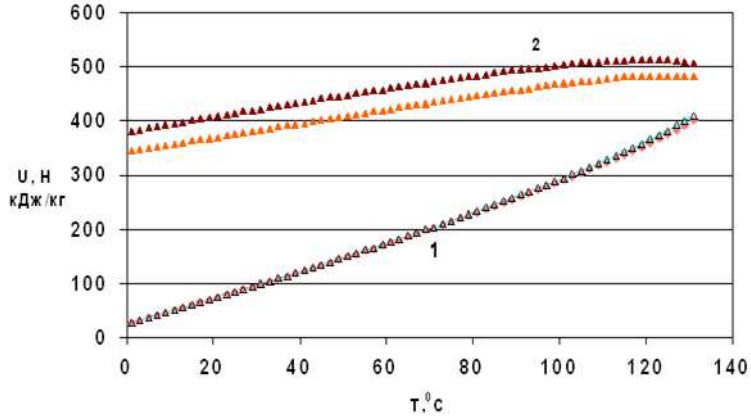



Рис.3. Внутренняя энергия и энтальпия жидкой (1) и газообразной (2) фазы изобутана на линии насыщения

В диапазоне давлений $0{,}2<p<2$ МПа для каждой фазы можно записать следующие аппроксимации: для плотностей (кг/м$^3$)

$$\rho_{ж} = -14{,}1p^3 + 63{,}3p^2 - 156{,}2p + 598{,}4; \quad \rho_{г} = p^3 - 0{,}2p^2 + 24{,}8p + 0{,}4$$

для энтальпий (кДж/кг):

$$h_{ж} = 28{,}4p^3 - 134{,}9p^2 + 308{,}2p - 8{,}3; \quad h_{г} = 17{,}8p^3 - 88{,}4p^2 + 177{,}1p + 362{,}3$$

Как было показано выше длина участка движения смеси невелика, поэтому изменением кинетической и потенциальной энергии на этом участке пути можно пренебречь. Потерями тепла в горную породу также пренебрегаем, считая, что общая энергия смеси не меняется. Тогда согласно первому закону термодинамики для энтальпии на участке движения смеси имеем

$$\frac{dh}{dp} = \frac{1}{\rho_{см}}$$

$$\frac{1}{\rho_{см}(p,\psi)} = \frac{\psi}{\rho_{г}(p)} + \frac{1-\psi}{\rho_{ж}(p)},$$

где $\psi$ – массовая доля газа в смеси, $\rho_г$ и $\rho_{ж}$ – плотности газовой и жидкой составляющей смеси соответственно.

Определение массовой доли пара сводится к решению задачи

$$\psi' = a_{г}(p)\psi + a_{ж}(p)(1-\psi) \qquad \psi(p_{нас}) = 0$$

Тогда $\psi(p) = \exp(A_{г}(p) - A_{ж}(p))p\int_{pнас}^{p} a_{ж}(p)\exp(A_{ж}(p) - A_{г}(p))dp;$

$$A_г(p)=\int_{рнас}^{p} a_г(p)dp,\ A_{ж}(p)=\int_{рнас}^{p} a_{ж}(p)dp$$

$$a_г(p)=\frac{\rho_г^{-1}-h'_г}{h_г-h_{ж}};\ a_{ж}(p)=\frac{\rho_{ж}^{-1}-h'_{ж}}{h_г-h_{ж}}$$

Функции $a_г$ и $a_{ж}$ на линии насыщения изучены с применением данных (2), их аппроксимация функциями давления (МПа) имеет вид

$$a_г(p)=3\cdot10^{-7}p^6-2\cdot10^{-6}p^5+6\cdot10^{-6}p^4-10^{-5}p^3+9\cdot10^{-6}p^2-4\cdot10^{-6}p+6\cdot10^{-7}$$

$$a_{ж}(p)=-10^{-7}p^3+3\cdot10^{-8}p^2+2\cdot10^{-7}p-8\cdot10^{-7}$$

На рис.4 показан рост массовой доли пара в скважине при снижении давления. Как видно из графиков, в скважине наблюдается значительный рост доли пара со снижением давления, при давлении насыщения 1,5 МПа ближе к устью ее значение достигает 0,6. Это говорит о том, что при достижении давления насыщения в скважине изобутан вскипает и далее происходит практически полное превращение его в пар.

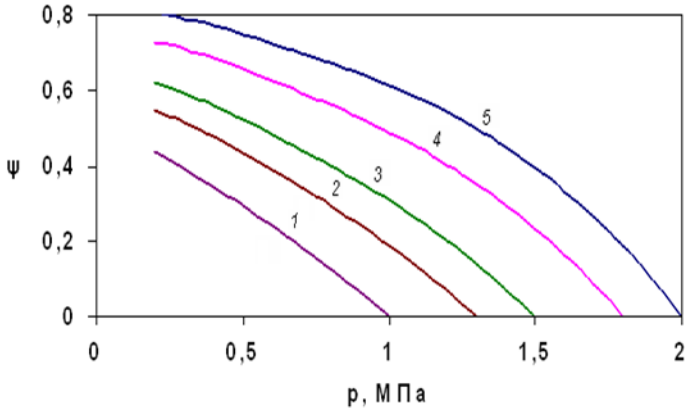



Рис.4. Рост массовой доли пара в скважине при снижении давления (Давление насыщения: 1- 1МПа; 2- 1,3МПа; 3- 1,5МПа; 4- 1,8МПа; 5- 2МПа)

Аналогичный расчет при подъеме термальной воды с высокой температурой с учетом фазовых переходов в скважине, проведенный в работе [3] показал, что полного превращения воды в пар не происходит. Даже при давлении насыщения равном 5 МПа, которое соответствует пластовой температуре 250 ºС, массовая доля пара в устье равнялась 0,25.

Увеличение доли пара в смеси приводит к уменьшению ее плотности, на рис.5 показано снижение плотности смеси в скважине со снижением давления.

Практически полный переход изобутана из жидкого состояния в газообразное ведет к снижению плотности среды в скважине, что влечет за собой рост гидравлических потерь на участке движения смеси. Подобный рост приведет к снижению давления и температуры смеси. Роста гидравлических потерь удастся избежать, увеличив площадь сечения скважины на данном участке.

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, применение изобутана в качестве рабочего тела в системах извлечения геотермального тепла энергетически выгодно. На рис. 6 представлена технологическая схема извлечения петротермального тепла с использованием изобутана. В такой циркуляционной системе в качестве рабочего тела предлагается использовать низкокипящий изобутан. Жидкий изобутан закачивается в нагнетательную скважину (1), где происходит его нагрев за счет съема тепла горных пород в вертикальном стволе скважины. Далее в горизонтальном стволе скважины, а также в трещинах горных пород (3) вокруг скважины происходит

дополнительный отбор тепла, температура поднимается до более высокого уровня. В нагретом состоянии изобутан движется вверх по стволу добычной скважины (2), где по достижении им давления насыщения начинается его превращение в пар. Добычная и нагнетательная скважины расположены на близком расстоянии друг от друга. При бурении горизонтальных стволов этих скважин образуется система трещин в породах, создающая развитую поверхность теплообмена.

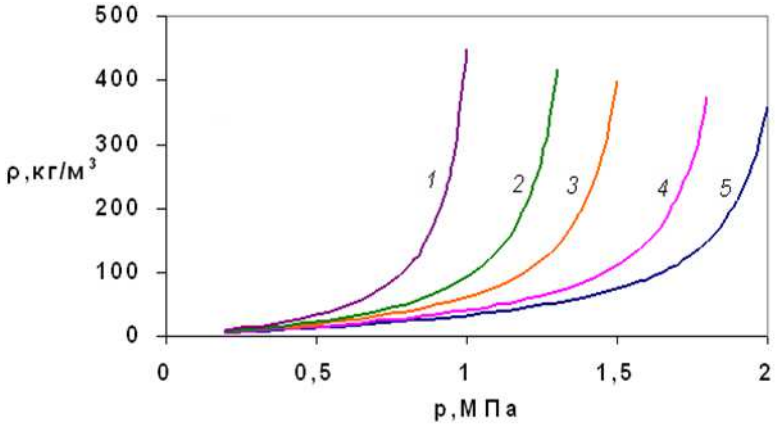



Рис.5. Изменение плотности смеси в скважине при снижении давления (Давление насыщения: *1- 1МПа; 2- 1,3МПа; 3- 1,5МПа; 4- 1,8МПа; 5- 2МПа*)

Как известно, чтобы извлечение энергии из сухих горячих пород было экономически выгодным и происходило достаточно интенсивно, необходимо в породе создать большую площадь теплоотдачи, а также обеспечить закачку, циркуляцию и извлечение теплоносителя [1]. Все эти условия соблюдены в предложенной циркуляционной системе извлечения петротермального тепла.

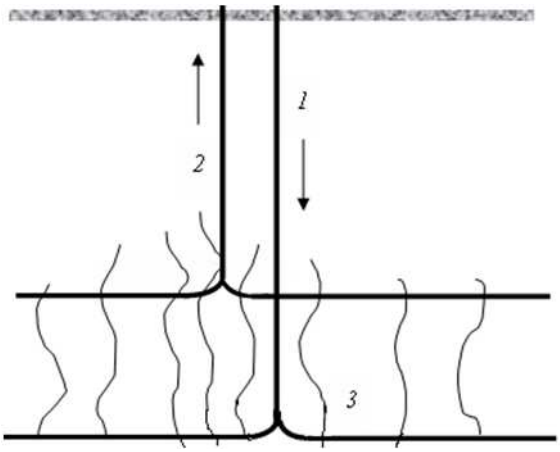



Рис. 6. Технологическая схема извлечения тепла горных пород

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00371-а).

**Литература:**

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 376с.
2. *Waxman M., Gallagher J.S.* Thermodynamic Properties of Isobutane for Temperatures from 250 to 600 K and Pressures from 0.1 to 40 MPa // J. Chem. Eng. Data. 1983. V.28. P.224-241.
3. *Алишаев М.Г., Азизов Г.А.* Термобарический расчет паротермальной скважины // Теплоэнергетика. 2011. №7. С. 50-55.

# К ВОПРОСУ ОБ ИЗВЛЕЧЕНИИ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Алибеков Д. М.

*ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а;e-mail: miglakasi@mail.ru*

Утилизация "сухого" глубинного тепла может открыть для энергетики поистине неисчерпаемые возможности. Когда бурение на глубины 8-10км станет делом, технологически освоенным и экономичным, ГеоТЭС можно будет сооружать в любой географической точке, где возникнет надобность в энергетике. Суть проблемы здесь примерно та же, что и в солнечной энергетике: чтобы повысить единичную мощность станции, необходимо собирать тепло с как можно большей площади. Есть проекты по созданию больших подземных полостей или разветвленных систем трещин в горных породах гидроразрывом или ядерными взрывами. Но для этого требуется тщательно изучить массу вопросов, прежде всего выяснить, не вызовет ли наша столь активная деятельность нежелательных изменений в тектонике земной коры. Особенно нужной петротермальная энергия может оказаться в районах освоения Сибири и Севера.

Рассмотрим пример ГЦС (геотермальная циркуляционная система) с искусственно созданным коллектором. ГЦС состоит из одной пары скважин (ЭС или ДС – эксплуатационная скважина; НС – нагнетательная скважина), наклонные интервалы которых отклонены от вертикали на угол $\alpha = 35^{\circ}$. Коллектор, образованный в гранитной породе, имеет десять вертикальных трещин гидроразрыва $n_{тр.} = 10$, каждая из которых имеет высоту $h_{тр.} = 2a_{тр.} = 300\ м$, ширину $2b_{тр.} = 200\ м$ (см. рис. 1). Расстояния между трещинами $\Delta_{тр.}$, между скважинами $\Delta_{с.}$, между ЭС и первой трещиной $\Delta_{с.тр.}$ принимаются равными $\Delta_{тр.} = \Delta_{с.} = \Delta_{с.тр.} = 50\ м$; среднее раскрытие каждой из трещин $\bar{\omega} = 0{,}00314\ м$. Высота от устья скважин до забоя НС равен $H = H_{в.} + H_{н.} = 3000\ м$.

Наклонные части стволов нагнетательной $L_{с.н.}$ и добычной $L_{с.д.}$ скважин находим по формулам, м:

$$L_{с.н.} = \frac{\Delta_{тр.}(n_{тр.}+1)}{\sin\alpha} = 959\ м; \quad L_{с.д.} = \frac{\Delta_{тр.} n_{тр.}}{\sin\alpha} = 872\ м.$$

Высота наклонной части нагнетательной скважины $H_{н.}$:

$$H_{н.} = L_{с.н.}\cos\alpha = 786\ м.$$

Высота вертикальной части стволов нагнетательной и добычной скважин, м:

$$H_{в.} = H - H_{н.} = 2214\ м.$$

Полные длины НС и ЭС соответственно:

$$L_{нагн.} = L_{с.н.} + H_{в.} = 3173\ м; \quad L_{добыч.} = L_{с.д.} + H_{в.} = 3086\ м.$$

Теплообменная поверхность коллектора $S_к$ включает в себя оба берега всех трещин, $м^2$:

$$S_к = 2n_{тр.}\pi R_{тр.}^2 = 934715 м^2,$$

где радиус трещины по [1] $R_{тр.} \approx 1.22 b_{тр.} = 122\ м$.

При градиенте температуры $Г = 0{,}035\ ℃/м$ и температуре нейтрального слоя $T_0 = 15℃$ температура на горизонтали, проходящей через середину коллектора 2600 м будет составлять

$$T_{2600} = T_0 + Г \cdot H = 106℃$$

Извлекаемая энергия при такой температуре может использоваться на отопление, горячее водоснабжение и т.д.

Следующие параметры изменяются от величины температуры и расхода теплоносителя, их значения занесены в таблицу 1 и определяются по следующим формулам:

- потери давления и мощности по длине НС и ЭС [2]:

$$\Delta P = 0{,}5\xi\rho\left(\frac{G}{\pi r^2}\right)^2\frac{L}{2r}, \qquad (1)$$

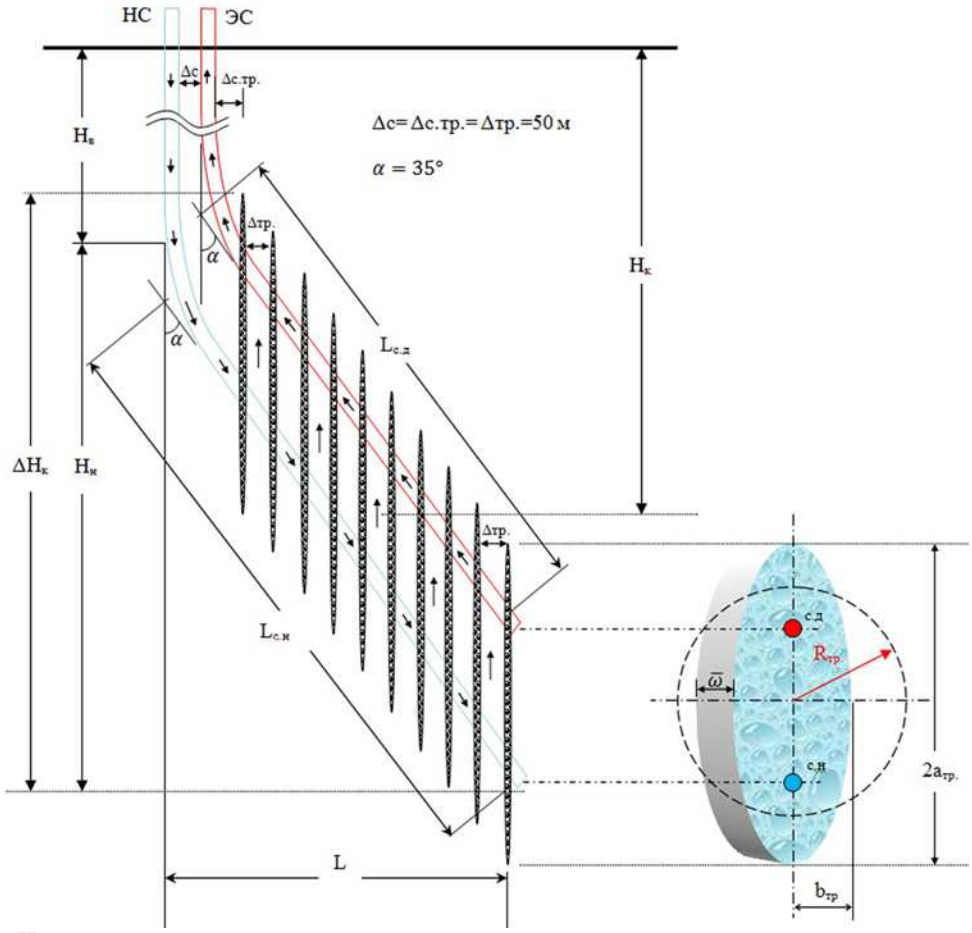



Рис.1. Искусственный геотермальный коллектор из серий вертикальных трещин гидроразрыва

$$\Delta W = \Delta P G, \qquad (2)$$

где $G$ – массовый расход теплоносителя, кг/с; $r$ – радиус скважины, м; $\xi = 0{,}03$ – коэффициент гидравлического сопротивления в скважинах, определяемая по формуле Альтшуля (турбулентный поток) [3]:

$$\xi = 0{,}11\left(\frac{k_э}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0.25}, \qquad (3)$$

где $k_э$ – абсолютная шероховатость труб, мм (для новых стальных бесшовных труб $k_э = 0{,}03$ *мм*); $\rho$ – плотность теплоносителя, кг/м$^3$; $L$ – длина скважины, м;

- радиус зоны инерционных эффектов у НС [4]:

$$R_{и.н} = 2.12\cdot 10^{-4}\frac{G_{тр.}\rho_1}{\mu_1}, \qquad (4)$$

где $\mu_1$ – динамическая вязкость теплоносителя в НС, Па·с; $\rho_1$ - плотность теплоносителя в НС, кг/м$^3$;

- потери давления в прискважинной зоне НС:

$$\Delta P_{и.н} = 8.6\cdot 10^{-4}\frac{\rho_1\cdot G_{тр.}{}^2}{\bar{\omega}_{тр}^3\cdot d_{с.н}}, \qquad (5)$$

где $d_{сн.}$ – диаметр НС, м; $\bar{\omega}_{тр}$ - среднее раскрытие каждой из трещин

гидроразрыва, м;

- потери давления в прискважинной зоне ЭС:

$$\Delta P_{и.д} = 6.04 \cdot 10^{-4} \frac{\rho_2 {G_{тр.}}^2}{\bar{\omega}_{тр}^3 d_{с.д}} \left(1 + 50.4 \frac{\bar{\omega}_{тр}}{d_{с.д}}\right) + \frac{6\mu_2 G_{тр.}}{\pi \bar{\omega}_{тр}^3} \ln \frac{R_{и.д}}{R_{и.д}^I} + 0.168 \frac{\rho {G_{тр.}}^2}{\pi \bar{\omega}^2} \left(\frac{1}{{R_{и.д}^I}^2} - \frac{1}{{R_{и.д}}^2}\right), \quad (6)$$

где $\mu_2$ – динамическая вязкость теплоносителя в НС, Па·с; $\rho_2$ - плотность теплоносителя в ЭС, кг/м$^3$; $G_{тр.}$ – массовый расход через единичную трещину, кг/с; $d_{с.д}$ - диаметр ЭС, м; $R_{и.д}$ - радиус зоны инерционных эффектов у ЭС:

$$R_{и.д} = \left(2.31 \cdot 10^5 \bar{\omega}_{тр} \sqrt{\frac{\mu_2}{G_{тр.}\rho_2}} + 3.63 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{G_{тр.}\rho_2}{\mu_2}}\right)^2; \quad (7)$$

$$R_{и.д}^I = 0.531 \cdot 10^{-4} \frac{G_{тр.}\rho_2}{\mu_2};$$

- потери давления в трещине между НС и ЭС при среднеарифметическом значении динамической вязкости $\mu = 0{,}5(\mu_1 + \mu_2)$ [5], а также при среднеарифметическом $R_и = \frac{1}{2}(R_{и.н} + R_{и.д})$:

$$\Delta P_{трещ.} = \frac{3.82(\mu_1 + \mu_2) G_{тр.}}{\bar{\omega}_{тр}^3} 1.21 + \ln \frac{\bar{\omega}_{тр}}{R_и}; \quad (8)$$

- давление, развиваемое нагнетательным насосом для необходимого расхода воды через скважину находим по формуле:

$$P_{нас.} = \Delta P_{трещ.} + \Delta P_{и.д} + \Delta P_{и.н} + \Delta P_{с.н.} + \Delta P_{с.д.} - \Delta P_{заб.} + \Delta P_{вск.} + \Delta P_{т.о.} + \Delta P_{т.трас.} \quad (9)$$

Расчёты производились для разных диаметров НС и ЭС: d=0,1÷0,25 м.

Таблица 1. Потери давления и мощности в ГЦС

| d, м | $\Delta P_{с.н.}$, МПа | $\Delta P_{с.д.}$, МПа | $\Delta W_{с.н.}$, КВт | $\Delta W_{с.д.}$, КВт | $R_{и.н}$, м | $\Delta P_{и.н}$, кПа | $R_{и.д}$, м | $R^I_{и.д}$, м | $\Delta P_{и.д}$, кПа | $\Delta P_{трещ.}$, кПа | $\sum \Delta P$, МПа | $\sum \Delta W$, кВт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 2 | 1,9 | 40 | 38 | 0,425 | 1,1 | 134 | 0,21 | 2,17 | 2,8 | 3,9 | 78 |
| 0,15 | 0,25 | 0,24 | 5 | 4,8 | | 0,73 | | | 1,47 | | 0,5 | 9,8 |
| 0,2 | 0,057 | 0,053 | 1,1 | 1 | | 0,55 | | | 1,2 | | 0,11 | 2,1 |
| 0,25 | 0,018 | 0,017 | 0,37 | 0,35 | | 0,44 | | | 1 | | 0,04 | 0,72 |

Разность гидростатических давлений на забоях НС и ЭС при плотностях соответственно $\rho_1 = 995$ *кг/м*$^3$; $\rho_2 = 958$ *кг/м*$^3$:

$$\Delta P_{заб.} = \rho_1 g H - \rho_2 g (H - 100) = 2.02 \text{ МПа}$$

При отсутствии наружного оборудования ГЦС (теплообменник, теплотрасса) для необходимого расхода воды понадобится насос только для типа ГЦС с диаметрами скважин НС и ЭС d=0,1 м.

Безразмерная величина температуры [4], определяемая как $\theta = \frac{t_к - t_0}{T_к - t_0}$, где $t_к = 100$ °*C*- температура теплоносителя в добычной скважине, ºС; $t_0 = 20$ °*C*- температура теплоносителя в нагнетательной скважине, ºС; $T_к = 106$ °*C*- температура коллектора, ºС:

$$\theta = 0{,}93$$

Период эксплуатации коллектора из серий вертикальных трещин гидроразрыва определяется по следующей формуле, с:

$$\tau_к = \frac{6 c_n \rho_n b_{тр.}^2 \Delta_{тр.} n_{тр.}}{c_m \rho_m G} \left(1 - 0.129 \frac{K_{тр.}}{b_{тр.}} \sqrt{\frac{c_m \rho_m G \Delta_{тр.}}{\lambda n_{тр.}}}\right)^2, \quad (10)$$

где $c_n\rho_n$ - объёмная теплоёмкость пород, Дж/(м$^3$·К); $c_m\rho_m$ - объёмная теплоёмкость теплоносителя, Дж/(м$^3$К); $\lambda$ – коэффициент теплопроводности пород, Вт/(м·К); $K_{тр.} = 0{,}9$ – коэффицинт, зависящий от $\theta^* = \frac{{t_к}^* - {t_0}^*}{T_к - {t_0}^*} \geq 0.9$ , где $\theta^*$– величина, при

уменьшении значения которого менее 0,9 необходимо прекращать циркуляцию теплоносителя через коллектор.

При дебите G = 0,02 м$^3$/с = 72 м$^3$/ч и условии $\theta^*$ определяем время эксплуатации данной ГЦС по (10):

$$\tau_к = 3{,}1 * 10^8 c = 9{,}8\ лет.$$

Таким образом мы получили мощность на устье ЭС $Q = mc\Delta T = 6{,}7\ МВт.$, без учёта теплопотерь по ЭС.

Для увеличения извлекаемой мощности необходимо бурить скважины кустовым методом (рис.2.) и создавать дополнительную поверхность отбора теплоты. Тогда будем иметь 4 коллектора, и при дебите через каждую из них G = 0,01 м$^3$/с, будем иметь $\tau_к = 29\ лет$ при мощности $Q = 14{,}4$ МВт.

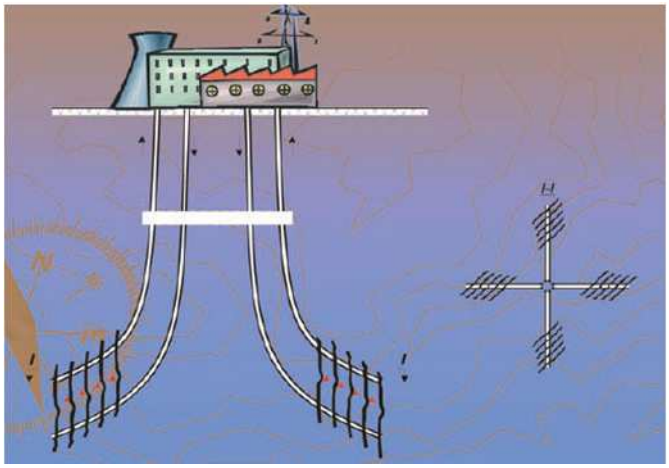


Рис.2. Метод кустового бурения скважин и размещение поверхностного оборудования

**Литература:**

1. *Экономидес М., Олини Р., Валько П.* Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. – 236 с.
2. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. Материалы IV Школы молодых ученых имени Э. Э. Шпильрайна. 19-22 сентября 2011 г. Под ред. д.т.н. А. Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2011. – 358 с.
3. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с. – ISBN 978-5-9221-0976-5.
4. *Дядькин Ю.Д., Алиев М.Г., Богоуславский Э.И., Юсупова М.Е., Гендлер С.Г., Сабанаев К.А., Мусаханов Н.Б.* Методические рекомендации по определению параметров и показателей геотермальных циркуляционных систем теплоснабжения. Ленинград-Махачкала, 1987 г.
5. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98 – М.: Издательство МЭИ. 1999. – 168 с., ил.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВБЛИЗИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

Алхасов А.Б., Мейланов Р.П., Ахмедов Э.Н.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: lanten50@mail.ru*

Исследуется распределение температуры вблизи эксплуатируемой скважины в «сухих» горных породах. Предложено граничное условие на фронте распространения возмущения температуры, учитывающее особенности теплопереноса в геотермальных коллекторах Получено уравнение для определения области возмущения температуры и приводится численное решение.

За последнее время широкое распространение получают скважинные теплообменники позволяющие извлекать энергию из горячих «сухих» пород, которые составляют большую часть земной коры [1-2] . В скважинных теплообменниках нагнетаемая жидкость обратно выкачивается с осуществлением отбора тепла сухого пласта[3]. Актуальность применения скважинных теплообменников связано также и с широким применением тепловых насосов, которые позволяют эффективно использовать низкопотенциальные источники тепла [4-9]. При эксплуатации скважины происходит снятие тепла с горной породы с образованием вокруг нее области возмущения температуры. Кинетика образования зоны возмущения температуры и зависимость границы возмущения от времени представляют интерес для создания научно-технических основ развития энергетики геотермальных систем.

Для определения зависимости границы возмущения от времени используются различные методы приближенного решения уравнений параболического типа [10-15]. Одним из распространенных методов является метод интегральных соотношений [10-11]. Вывод уравнения для определения радиуса области возмущения температуры в методе интегральных соотношений основано на совместном рассмотрении уравнения теплового баланса и первого интеграла уравнения теплопроводности, где используется заданный профиль температурного поля вокруг скважины.

В настоящей работе предлагается другой подход, основанный на математической модели распространения тепла вблизи эксплуатируемой скважины учитывающей особенности распространения тепла в геотермальном коллекторе. Процесс переноса тепла в геотермальном коллекторе медленный процесс, когда справедливо параболическое уравнение теплопроводности где предполагается бесконечная скорость распространения тепла, и не содержат явно границы распространения фронта возмущения температуры. Поэтому предлагают различные приближенные методы, например метод интегральных соотношений [10-11], в которых искусственно вводится граница фронта возмущения температуры без его физического обоснования. В действительности явное введение границы возмущения можно обосновать. Перенос тепла в многофазной, негомогенной среде, каковым является геотермальный коллектор, отличается от процесса переноса тепла в однородной, гомогенной среде. В первом приближении геотермальный коллектор можно представить в виде двух взаимодействующихся подсистем – твердая фаза, и газовая или жидкая фаза. В подсистемах справедливо приближение локального равновесия, когда можно применить уравнения параболического типа, но между ними происходит обмен энергией и они имеют

разные температуры $T_1, T_2$. Тогда для каждой из фаз справедливо уравнение [12]

$$c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \nabla^2 T_i \pm \varsigma (T_2 - T_1) \qquad (1)$$

Где $i = 1,2$, $\varsigma$ - коэффициент обмена энергией между подсистемами. Для каждой из подсистем, а также для средней температуры $\tilde{T} = \frac{c_1 T_1 + c_2 T_2}{c_1 + c_2}$ можно получить следующие уравнения

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + \tau_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial t^2} - l_a^2 \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 T_i = a^* \nabla^2 T_i - a_g l_g \nabla^4 T_i \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}_i}{\partial t} + \tau_i \frac{\partial^2 \tilde{T}_i}{\partial t^2} - l_a^2 \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \tilde{T}_i = a^* \nabla^2 \tilde{T}_i - a_g l_g \nabla^4 \tilde{T}_i$$

Где $\tau_1 = \frac{c_1 c_2}{\varsigma (c_1 + c_1)}$, $l_a^2 = h_1^2 + h_2^2, l_g^2 = h_1 h_2, h_i^2 = \tau_i a_i, a_i = \lambda_i / c_i$

$a^* = (\lambda_1 + \lambda_2)/(c_1 + c_2), a_g = l_g^2 / \tau_1$

Полученные уравнения (2) существенно отличаются от уравнений параболического типа (1), в котором считается, что тепло распространяется с бесконечно большой скоростью. Предварительно заметим, что при отсутствии, третьего слагаемого в левых частях уравнений (2) они становятся гиперболическими уравнения переноса тепла и описывают процесс распространения тепла с конечной скоростью и содержат явно границу фронта возмущения со скачком температуры. Учет же третьего слагаемого в левой части уравнений (2) приводит к сглаживанию скачка температуры, но скачок температуры остается. Для нас важно то, что характерное время существования двухтемпературного режима определяется параметром $\tau_1$. Заметим, что когда между двумя фазами не существует обмен энергий, т.е. они изолированы, $(\varsigma = 0)$ то из (1) следует, что для каждой из подсистем справедливо параболическое уравнение теплопроводности. Если же среда гомогенная, что соответствует пределу $g \to \infty$ то $\tau_1 = \frac{c_1 c_2}{g(c_1 + c_1)} \to 0$, соответственно $h_i, l_a, l_g \to 0$ то в (2) опять имеем параболическое уравнение теплопроводности. При конечном значении $\varsigma$ на фронте распространения возмущения температуры образуется область двухтемпературного режима с характерным временем существования $\tau_1$ и характерным масштабом, $l \approx \tau_1 \frac{R_2}{t}$ где $R_2$ радиус области возмущения. Поскольку характерное время распространения фронта возмущения значительно больше характерного времени выравнивания температур между различными фазами $t >> \tau_1$, то для области, где имеет место двухтемпературный режим, имеем оценку $l << R_2$. Это означает, что особенности распространения тепла в двухтемпературной области можно задать в виде граничных условий к параболическому уравнению переноса. Эти граничные условия должны отображать характер изменения температуры в соответствии с уравнением (2) для которого имеет место скачок температуры. Таким образом, при распространении теплового возмущения в геотермальном коллекторе вначале образуется область двухтемпературного режима, распространяющаяся с конечной скоростью распространения тепла, за этой областью, где отсутствует двухтемпературный

режим справедливо параболическое уравнение распространения температуры. Для определения граничных условий определим поток тепла связанный со скачком температуры на границе возмущения. Линейный размер области скачка температуры (область двухтемпературного режима) равна $\tau_1 \frac{dR_2(t)}{dt}$ при этом объем вовлеченный в образовании теплового потока равен, $\tau_1 \frac{dR_2(t)}{dt} 2\pi R_2(t) L$ где $L$ длина скважины. Таким образом, поток тепла, отбираемый на границе возмущения равна $Q = \tau_1 \frac{dR_2(t)}{dt} 2\pi R_2(t) L \cdot \rho \cdot \tilde{C} \cdot \Delta T$. Здесь $\rho$ - средняя плотность, $\tilde{C}$ - средняя теплоемкость, $\Delta T = f(R_2) - T(R_2, t)$ ( $f(r)$ - начальная температура геотермального коллектора) - скачок температуры в области двухтемпературного режима. При этом граничное условие можно взять в виде $\lambda \left( \frac{dT(r)}{dr} \right)_{r=R_2} = \gamma (f(R_2) - T(R_2, t)) R_2(t) \frac{dR_2}{dt}$ ,где $\gamma = 2\pi L \rho \tilde{C} \tau_1$

Рассматривается мощный пласт с одной геотермальной скважиной для плоско-радиального случая. Считаем, что выполнены условия пренебрежения краевыми эффектами ( $L >> R_1$ $L$ - характерная длина скважины, $R_1$ - радиус скважины). Исследуется осесимметричный случай, когда однородная горная порода имеет заданную постоянную начальную температуру *f(r)*. Исходное уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} - a^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = 0 \qquad (3)$$

где $a^2$ – коэффициент температуропроводности, $t > 0, R_1 < r < R_2(t)$. Краевые условия имеют вид

$$T(r,0) = f(r)$$

$$\left. \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \frac{1}{\lambda} q(t) \qquad (4)$$

$$\left. \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right|_{r=R_2(t)} = \gamma \left( f(R_2) - T(R_2, t) \right) R_2(t) \frac{dR_2(t)}{dt}$$

Таким образом, задана начальная температура $f(r)$ пласта, тепловой поток $q(t)$ отбираемый скважиной от пласта, $\lambda$ - теплопроводность сухой породы, $R_1$ - радиус скважины, $R_2(t)$ - радиус возмущенной области пласта, которая является функцией времени, $\gamma$ - параметр, определяющий поток тепла на границе движущегося фронта возмущения температуры..

Для решения задачи (3), (4) используем метод интегральных соотношений в специфическом виде , когда профиль температуры аппроксимируется Бесселевыми функциями

$$\tilde{T}(p,t) = \int_{R_1}^{R_2(t)} T(r,t) M(p,r) r dr \qquad (5)$$

где ядро интегрального преобразования определено следующим образом [13]

$$M(p,r) = \frac{\pi}{2} \left( J_0(pr) \frac{Y_1(pR_1)}{J_1(pR_1)} - Y_0(pr) \right)$$

Здесь $J(pr), Y(pr)$ функции Бесселя первого и второго родов. Параметр $p$ определяется корнями характеристического уравнения

$$J_1(pR_1)Y_1(pR_2) - J_1(pR_2)Y_1(pR_1) = 0 \qquad (6)$$

Уравнение для функции $\tilde{T}(p,t)$ принимает вид

$$\frac{d}{dt}\tilde{T}(t,p) + ap^2\tilde{T}(t,p) = L(p,t) \qquad (7)$$

где $L(p,t) = M(p,R_2(t))T(R_2(t))R_2(t)\dfrac{dR_2(t)}{dt} + a^2 rM(p,r)\dfrac{dT(r,t)}{dr}\Big|_{R_1}^{R_2(t)}$

с начальным условием

$$\tilde{T}(p,0) = \int_{R_1}^{R_2} drrM(r,p)f(r)$$

Решение уравнения ( 7 ) задается выражением

$$\tilde{T}(p,t) = \exp(-ap^2t)\left\{\int_{R_1}^{R_2} drf(r)rM(p,r) + \int_0^t L(p,\tau)\exp(ap^2\tau)d\tau\right\}$$

Обращая преобразования Ханкеля (3), получим

$$T(r,t) = \sum_{p=0}^{\infty}\frac{M(p,r)\exp(-ap^2t)}{\int_{R_1}^{R_2} M^2(p,r)rdr}\left\{\int_{R_1}^{R_2} drf(r)rM(p,r) + \int_0^t d\tau L(p,\tau)\exp(ap^2\tau)\right\} \qquad (8)$$

Используя соотношение $\int_{R_1}^{R_2} M^2(p,r)rdr = \dfrac{1}{2p^2}\dfrac{J_1^2(pR_1) - J_1^2(pR_2)}{J_1^2(pR_1)J_1^2(pR_2)}$

и выделяя в (8) слагаемое с $p = 0$

$$T(r,t) = \frac{2}{R_2^2(t) - R_1^2}\left\{\int_{R_1}^{R_2} drrf(r) + R_1^2\int_0^t d\tau\left(\frac{T(R_2,\tau)}{R_2(\tau)}\frac{dR_2(\tau)}{d\tau}\right) + 2a^2R_1^2\int_0^t\left[\frac{1}{r}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r}\Big|_{r=R_1}^{r=R_2}\right]d\tau\right\} + \qquad (9)$$

$$+2\sum_{p=1}^{\infty}\frac{p^2J_1^2(pR_1)J_1^2(pR_2)\exp(-ap^2t)}{J_1^2(pR_1) - J_2^2(pR_2)}M(p,r)\left\{\int_{R_1}^{R_2} drf(r)rM(p,r) + \int_0^t L(p,\tau)\exp(ap^2\tau)\right\}\cdot$$

В дальнейшем рассмотрим случай когда $f(r) = T_0, q(t) = Q$. Учитывая, что $\int_{R_1}^{R_2} drrM(p,r) = 0$ вместо (9) получим

$$T(r,t) = T_0 - 2\frac{a^2Q}{\lambda}\frac{R_1}{R_2^2(t) - R_1^2}\cdot t + \frac{2R_1^2}{R_2^2(t) - R_1^2}\int_0^t\left[\frac{T(R_2,\tau)}{R_2(\tau)} + a^2\frac{\gamma}{\lambda}(T_0 - T(R_2,\tau))\right]\frac{dR_2(\tau)}{d\tau}d\tau \qquad (10)$$

$$+2\sum_{p=1}^{\infty}\frac{p^2J_1^2(pR_1)J_1^2(pR_2)\exp(-ap^2t)2}{J_1^2(pR_1) - J_2^2(pR_2)}M(p,r)\int_0^t\exp(a^2p^2\tau)L(p,\tau)d\tau\cdot$$

В решении (10 ) неизвестными являются функции $T(R_2(t),t)$ и $R_2(t)$. Для их определения положим в (10) сначала $r = R_1$ затем $r = R_2$. Учитывая равенство $J_\nu(z)Y_{\nu+1}(z) - J_{\nu+1}(z)Y_\nu(z) = -\dfrac{2}{\pi\cdot z}$, получим

$$T(R_1,t) = T_0 - 2\frac{a^2Q}{\lambda}\frac{R_1}{R_2^2(t) - R_1^2}\cdot t + \frac{2R_1^2}{R_2^2(t) - R_1^2}\int_0^t\left[\frac{T(R_2,\tau)}{R_2(\tau)} + a^2\frac{\gamma}{\lambda}(T_0 - T(R_2,\tau))\right]\frac{dR_2(\tau)}{d\tau}d\tau \qquad (11)$$

$$-2\sum_{p=1}^{\infty}\frac{pJ_1(pR_1)J_1^2(pR_2)\exp(-a^2p^2t)2}{R_1(J_1^2(pR_1) - J_2^2(pR_2))}\int_0^t\exp(a^2p^2\tau)L(p,\tau)d\tau\cdot$$

$$T(R_2(t),t)=T_0-2\frac{a^2Q}{\lambda}\frac{R_1}{R_2^2(t)-R_1^2}\cdot t+\frac{2R_1^2}{R_2^2(t)-R_1^2}\int_0^t\left[\frac{T(R_2,\tau)}{R_2(\tau)}+a^2\frac{\gamma}{\lambda}(T_0-T(R_2,\tau)\right]\frac{dR_2(\tau)}{d\tau}d\tau$$

$$-2\sum_{p=1}^{\infty}\frac{pJ_1^2(pR_1)J_1(pR_2)\exp(-ap^2t)2}{R_2(J_1^2(pR_1)-J_2^2(pR_2))}\int_0^t\exp(a^2p^2\tau)L(p,\tau)d\tau\cdot$$

Будем считать, что $T(R_1,t)$ определяется из эксперимента. Тогда (11) представляет собой систему двух уравнений с двумя неизвестными функциями $T(R_2(t),t)$ и $R_2(t)$. Введя безразмерные величины $X(t)=\frac{R_2(t)}{R_1}$, $T_1(t)=\frac{T_0-T(R_1,t)}{T_0}, T_2(t)=\frac{T_0-T(R_2,t)}{T_0}$ $\mu_n=p_nR_1$ вместо (11) получим следующую систему уравнений

$$X(t)=\sqrt{1+\frac{2\frac{a^2Q}{\lambda R_1}t+C(t)}{T_1-A_1(t)+B_1(t)}} \qquad (12)$$

$$T_2(t)=T_1+A_2(t)-B_2(t)$$

Где $C(t)=2\int_0^t\left[\frac{T_0-T_2(\tau)}{X(\tau)}+\frac{a^2\gamma}{\lambda}R_1T_2(\tau)\right]\frac{dX(\tau)}{d\tau}d\tau$

$$A_1(t)=2\frac{a^2Q}{\lambda R_1}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\mu_nJ_1(\mu_n)J_1^2(\mu_nX(t))}{J_1^2(\mu_nX(t))-J_1^2(\mu_n)}\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2t)\int_0^t d\tau\frac{\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2\tau)}{\mu_n(\tau)J_1(\mu_n(\tau))}$$

$$B_1(t)=2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\mu_nJ_1^2(\mu_n)J_1(\mu_nX(t))\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2t)}{J_1^2(\mu_nX(t))-J_1^2(\mu_n)}\int_0^t d\tau\frac{\frac{dX(\tau)}{d\tau}\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2\tau)}{\mu_n(\tau)J_1(\mu_n(\tau)X(\tau))}\left(1-T_2(\tau)(1-\frac{a^2\gamma R_1}{\lambda}X(\tau))\right)$$

$$A_2(t)=2\frac{a^2Q}{\lambda R_1T_0}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\mu_nJ_1(\mu_n)J_1(\mu_nX(t))\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2t)}{X(t)(J_1^2(\mu_nX(t))-J_1^2(\mu_n))}\left[J_1(\mu_n)-X(t)J_1(\mu_nX(t)\right]\int_0^t d\tau\frac{\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2\tau)}{\mu_n(\tau)J_1(\mu_n(\tau))}$$

$$B_2(t)=2\frac{a^2Q}{\lambda R_1T_0}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\mu_nJ_1(\mu_n)J_1(\mu_nX(t))\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2t)}{X(t)(J_1^2(\mu_nX(t))-J_1^2(\mu_n))}\left[J_1(\mu_n)-X(t)J_1(\mu_nX(t)\right]\cdot$$

$$\int_0^t d\tau\frac{\frac{dX(\tau)}{d\tau}\exp(-\frac{a^2}{R_1^2}\mu_n^2\tau)}{\mu_n(\tau)J_1(\mu_n(\tau)X(\tau))}\left(1-T_2(\tau)(1-\frac{a^2\gamma R_1}{\lambda}X(\tau))\right)$$

Здесь $\mu_n$ корни уравнения

$$J_1(\mu_n)Y_1(\mu_nX(t))-J_1(\mu_nX(t))Y_1(\mu_n)=0 \qquad (13)$$

Для дальнейшего исходим из следующих значений параметров среды и скважины:

$$a\cong 6{,}69\cdot10^{-7}\frac{м^2}{сек},\lambda\cong 2\frac{Bm}{м\cdot C^0},Q\cong 10\cdot\frac{kW}{S},S=2\pi R_1L,R_1\cong 0{,}149м,L=100м \quad (14)$$

На рисунке 1 кривая 1 представляет собой численное решение системы по формуле (12). Кривая 2 относится к традиционному расчету. Как видно, в нашем случае радиус области возмущения температуры уменьшается.

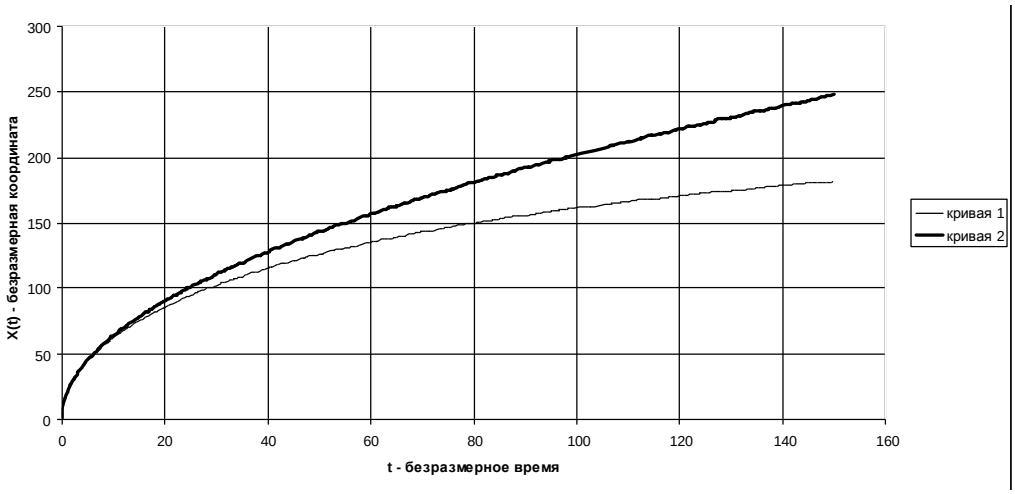



Рис.1. Зависимость координаты от времени

**Литература:**

1. *Берман Э.* Геотермальная энергетика. М.:Мир,1978.- 416с.
2. *Проселков Ю.М.* Теплопередача в скважинах.М.:Недра,1966.-225 с.
3. *Федянин В.Я., Утемесов М.А., Федин Л.Н., Горбунов Д.Л.* Исследование режимов совместной работы теплового насоса с вертикальным грунтовым теплообменником //Теплоэнергетика.1997.№4.С.21-23.
4. *Rafferty K.* Scaling in Geothermal Heat Pump Systems//Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. 2000.Vol.21. № 1.Klamath Falls,OR,p.p..11-15.
5. *Rybach L., Sanner B.* Ground-Source Heat Pump Systems the European Expperience// Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. 2000.Vol.21. № 1.Klamath Falls,OR,p.p..16-26.
6. *Алхасов А.Б.* Теплофизика и теплопередачав системах геотермальной энергетики//Автореф. Дисс. на соискание уч. Ст. доктора технических наук. М., 2003. 40 с.
7. *Шпильрайн Э.Э.* Проблемы и перспективы возобновляемой энергии в России//Перспективы энергетики.2003.Т.7.С.393-403.
8. *Фортов В.Е., Шпильрайн Э.Э.* Возобновляемые источники энергии на энергетической сцене мира.// Материалы Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», г. Махачкала,2005, Т.1, с.14-30.
9. *Алхасов А.Б., Алишаев М.Г.* Скважинный теплообменник для съема тепла с горной породы//Материалы Международной конференции «Возобновляемая энергетики:проблемы и перспективы», г.Махачкала,2005, Т.1, с.263-275.
10. *Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В.* Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений.М.:Недра. 1985. 272 с.
11. *Басниев А.М., Власов А.М., Кочина И.И., Максимов В.М.* Подземная гидравлика. М.: Недра,1986. 394с.
12. *Соболев С.Л.* Локально-неравновесные модели процессов переноса// УФН. 1997.Т.162,№10. С.1095-1106.
13. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Изд. ВШ. 1967. 510 с.
14. *Чекалюк Э.Б.* Термодинамика нефтяного пласта.М.:Недра,1965. 240с.
15. *Алишаев М.Г.* Анализ перехода от постоянного дебита на фиксированное забойное давление при упругом режиме добычи нефти//МЖГ.1985.№2. С.82-87.
16. *Мейланов Р.П.* Обобщенное уравнение одномерной фильтрации с дифференцированием дробного порядка// ИФЖ.2001.Т.74.№2.

# ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ РАСТВОРОВ ВОДААЛИФАТИЧЕСКИЙ СПИРТ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Карабекова Б.К.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: badji@mail.ru*

Обобщены экспериментальные *p, ρ, T, x* - данные растворов вода–спирт (метанол, этанол, н-пропанол) в сверхкритическом состоянии полиномиальным уравнением состояния в виде двойного разложения фактора сжимаемости $Z = p/RT\rho_m$ в ряды по степеням плотности и температуры: $Z = 1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j$, где $\omega = \rho/\rho_{кр}$, $\tau = T/T_{кр}$ Среднее относительное отклонение расчетных значений давления от экспериментальных составило 0.87%.
Уравнение использовано для расчета величины внутреннего давления по выражению $p_в = p - T(\partial p/\partial T)_\rho$.

Достоверные экспериментальные данные о *p, ρ, T, x* - зависимостях двойных систем вода–спирт в сверхкритическом состоянии являются важным инструментом для установления количественной связи между макроскопическими и микроскопическими свойствами их, позволяющей более глубокое понимание особенностей межмолекулярного взаимодействия в растворах полярных компонентов.

Цель данной работы – обобщение экспериментальных *p, ρ, T, x* - зависимостей (*x*– мольная доля спирта) водных растворов алифатических спиртов (метанол, этанол, н-пропанол) в сверхкритическом состоянии уравнением состояния и расчет величины внутреннего давления.

Как известно [1-3], не существует единого уравнения состояния (УС), которое описывало бы термодинамические свойства индивидуальных веществ и тем более растворов (смесей) во всей области параметров состояния. Получение локального уравнения состояния на основе достоверных экспериментальных *p,ρ,T,x* - зависимостей не представляет серьезных трудностей.

Экспериментальные данные о *p,ρ,T,x* - зависимостях сверхкритических смесей вода–спирт [4] адекватно описывает уравнение состояния в виде разложения фактора сжимаемости $Z = pV_m/RT = p/RT\rho_m$ в ряды по степеням плотности и температуры[5]:

$$Z = p/RT\rho_m = 1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j \text{, откуда } p = RT\rho_m \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right), \quad (1)$$

где $\omega = \rho/\rho_{кр}$, $\tau = T/T_{кр}$ – приведенная плотность и приведенная температура соответственно.

Величина относительного отклонения рассчитанных по уравнению (1) значений давления от экспериментальных для исследованных сверхкритических смесей составляет в среднем 0.87 % (рис.1).

Коэффициенты уравнения (1), определенные методом наименьших квадратов [6], и приведенные в соответствие с математическими критериями критического состояния, приведены в таблице 1.

Уравнение (1) может быть использовано для расчета термодинамических свойств данного класса смесей по известным термодинамическим соотношениям, в частности, величины внутреннего давления.

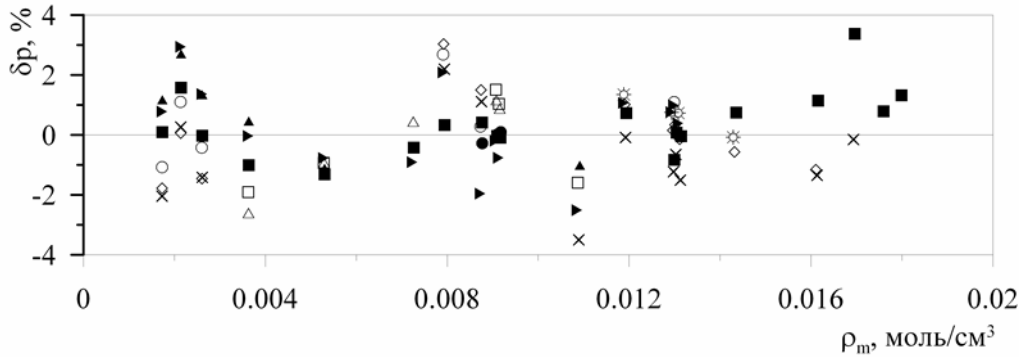



Рис.1. Относительное отклонение рассчитанных величин давления по уравнению (1) от экспериментальных для раствора вода-этанол состава x=0.5 при температурах, К: 557.15(●), 563.15(▲), 573.15(■), 598.15(×), 603.15(Δ), 623.15(◊), 633.15(□), 648.15(○), 653.15(☼),673.15(►)

Таблица1. Значения коэффициентов уравнения (1).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Вода – метанол, *x=0.2* | | | |
| $a_{10}$= | 28.43725762277264 | $a_{11}$= | -30.797133882319507 |
| $a_{20}$= | -76.92765289981017 | $a_{21}$= | 80.4597713315314 |
| $a_{30}$= | 70.00295978493618 | $a_{31}$= | -72.7613222428677 |
| $a_{40}$= | -20.797674537382704 | $a_{41}$= | 21.629044101187997 |
| Вода – метанол, *x=0.5* | | | |
| $a_{10}$= | 12.425949753890844 | $a_{11}$= | -21.88426695248069 |
| $a_{12}$= | 7.7457145218870975 | $a_{20}$= | -16.046493173297808 |
| $a_{21}$= | 25.051581887193876 | $a_{22}$= | -7.415230211991994 |
| $a_{30}$= | 6.377276356201669 | $a_{31}$= | -7.193160062276177 |
| $a_{40}$= | -1.4259725316320448 | $a_{41}$= | 1.6098054723859399 |
| Вода – метанол, *x=0.8* | | | |
| $a_{10}$= | 8.68301041253087 | $a_{11}$= | -10.447442951167638 |
| $a_{20}$= | -20.829452492529562 | $a_{21}$= | 22.48247675877863 |
| $a_{30}$= | 21.05316076551562 | $a_{31}$= | -21.87017511469534 |
| $a_{40}$= | -9.394711546312676 | $a_{41}$= | 9.549392166639375 |
| $a_{50}$= | 1.561119028240323 | $a_{51}$= | -1.5504062140371946 |
| Вода – этанол, *x=0.2* | | | |
| $a_{10}$= | 4.237719611197026 | $a_{11}$= | -9.179925119291012 |
| $a_{12}$= | 3.749332521422394 | $a_{20}$= | 7.1069686737379865 |
| $a_{21}$= | -4.812160113869621 | $a_{22}$= | -2.573570192473953 |
| $a_{30}$= | -24.792743171638303 | $a_{31}$= | 26.80846470927279 |
| $a_{40}$= | 24.701240877870998 | $a_{41}$= | -26.698870033091385 |
| $a_{50}$= | -10.899243770450958 | $a_{51}$= | 11.742827529494559 |
| $a_{60}$= | 1.7889121184107126 | $a_{61}$= | -1.9195138410194885 |
| Вода – этанол, *x=0.5* | | | |
| $a_{10}$= | -25.232796000985996 | $a_{11}$= | 49.69022513046192 |
| $a_{12}$= | -16.234825443056575 | $a_{13}$= | -9.603475441222482 |
| $a_{20}$= | 102.3926918752028 | $a_{21}$= | -227.1128935027806 |
| $a_{22}$= | 125.46273857772522 | $a_{30}$= | -108.08684643398581 |
| $a_{31}$= | 237.27693626356134 | $a_{32}$= | -129.11505037390367 |
| $a_{40}$= | 47.93382992052622 | $a_{41}$= | -104.26871361130974 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a_{42}$= | 56.08764885634984 | $a_{50}$= | -7.59337288657052 |
| $a_{51}$= | 16.433653582350303 | $a_{52}$= | -8.761922528056433 |
| Вода – этанол, *x=0.8* | | | |
| $a_{10}$= | 8.591348842697194 | $a_{11}$= | -15.553627286669611 |
| $a_{12}$= | 8.479076126262527 | $a_{13}$= | -2.4555161230789153 |
| $a_{20}$= | -15.57652820126449 | $a_{21}$= | 15.527739970673187 |
| $a_{22}$= | -1.2589180937157511 | $a_{30}$= | 21.75102724604517 |
| $a_{31}$= | -18.12771718263961 | $a_{40}$= | -16.355502314376995 |
| $a_{41}$= | 13.15739327178962 | $a_{50}$= | 6.021276175170737 |
| $a_{51}$= | -4.757770631848126 | $a_{60}$= | -0.8490362250492852 |
| $a_{61}$= | 0.6657259548332304 | | |
| Вода – н-пропанол, *x=0.2* | | | |
| $a_{10}$= | 13.44749759728329 | $a_{11}$= | -14.761782191789086 |
| $a_{20}$= | -44.50119241473391 | $a_{21}$= | 44.78558310108575 |
| $a_{30}$= | 62.13811259071002 | $a_{31}$= | -61.06770652317352 |
| $a_{40}$= | -42.33022432619132 | $a_{41}$= | 41.09479390291166 |
| $a_{50}$= | 14.086300804082056 | $a_{51}$= | -13.546369283409506 |
| $a_{60}$= | -1.8338896148957067 | $a_{61}$= | 1.7526518756228835 |
| Вода – н-пропанол, *x=0.5* | | | |
| $a_{10}$= | 4.120283156458521 | $a_{11}$= | -3.9843574870311054 |
| $a_{12}$= | -1.4253098449946453 | $a_{20}$= | -8.748644108277908 |
| $a_{21}$= | 9.288901578104017 | $a_{30}$= | 5.934820146070117 |
| $a_{31}$= | -5.660602824554057 | $a_{40}$= | -1.37180294Å03244396 |
| $a_{41}$= | 1.023604862457246 | $a_{50}$= | 0.06061150915228253 |
| $a_{51}$= | 0.0397410748876573 | | |
| Вода – н-пропанол, *x=0.8* | | | |
| $a_{10}$= | 7.17176174413602 | $a_{11}$= | -8.589623742802841 |
| $a_{20}$= | -16.84854830764755 | $a_{21}$= | 17.58623455194697 |
| $a_{30}$= | 17.682877234712876 | $a_{31}$= | -17.480500003675388 |
| $a_{40}$= | -8.117045434332757 | $a_{41}$= | 7.733992965387571 |
| $a_{50}$= | 1.4111563495955068 | $a_{51}$= | -1.2897521554657474 |

Внутреннее давление $p_в$ обусловлено межмолекулярными силами и определяются реакцией этих сил на деформирование объема в равновесном процессе изотермического расширения. Как известно внутреннее давление $p_в$ в реальной системе взаимосвязано с кинетическим $p_к$ (зависящим от температуры) и общим давлением $p$ соотношением [7]:

$$p_в = p - p_к = p - T(\partial p / \partial T)_\rho . \qquad (2)$$

Рассчитанные по выражению (2) значения внутреннего давления в сверхкритических смесях вода–этанол в зависимости от температуры, плотности и концентрации, представлены на рисунках 2 и 3.

Как видно, величина внутреннего давления $p_в$ в смесях вода–спирт отрицательна, от температуры практически не зависит, слабо зависит от состава, и убывает с ростом плотности.

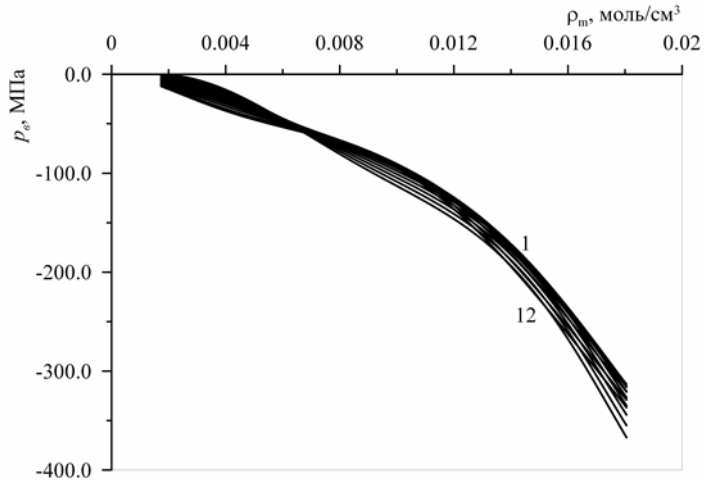



Рис.2. Изотермы (Т, К: 1 – 563.15, 573.15, 583.15, 593.15, 603.15, 613.15, 623.15, 633.15, 643.15, 653.15, 663.15, 12 – 673.15) зависимости $p_в$ от $\rho_m$ системы вода–этанол состава $x=0.5$.

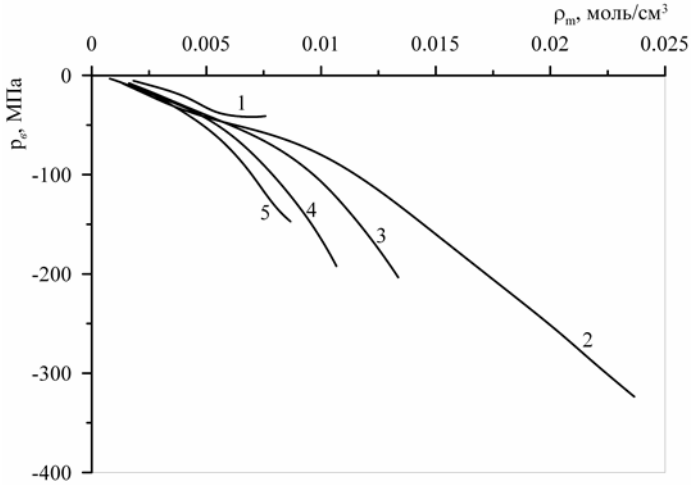



Рис.3. Зависимость $p_в$ от $\rho_m$ и состава смеси (*x:* 1 – 0.0, 2 – 0.2, 3 – 0.5, 4 – 0.8, 5 – 1.0) вода–н-пропанол при 613.15 К

**Литература:**

1. *Каплун А.Б., Мешалкин А.Б.* О термодинамическом обосновании формы единого уравнения состояния жидкости и газа // ТВТ. Т41. 2003. №3. – С.378-380.
2. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч.1. М.: Мир. 1989. 304с.
3. *Новиков И.И.* Уравнения состояния газов и жидкостей. М.: Наука. 1975. 264с.
4. *Базаев А.Р., Базаев Э.А.*. Термодинамические свойства бинарных смесей технологически важных веществ в околокритическом и сверхкритическом состоянии // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2010. Т.5. №3. С.15-30.
5. *Сычев В.В., Вассерман А.А.*, и др. Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов, 1977. 352 с.
6. *Вукалович М.П., Алтунин В.В., Спиридонов Г.А.* Методы построения уравнения состояния веществ по экспериментальным термодинамическим данным с применением электронно-вычислительных цифровых машин // ТВТ. 1967. Т.5. №2. С.265-271.
7. *Карцев В.Н., Родникова М.Н., Бартел Й., Штыков С.Н.* Температурная зависимость внутреннего давления жидкости // ЖФХ. 2002. Т.76. №6. С.1016-1018.

# КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ

Джаппаров Т.А.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: timur507@mail.ru.*

Экспериментально изучен процесс термического разложения алифатических спиртов (метанол, этанол, 1-пропанол и 1-бутанол) методом определения роста давления в диапазоне температур 583.15 – 663.15 К. Оценены значения кинетических и активационных параметров термического разложения исследованных спиртов.

Алифатические спирты широко применяются в качестве добавок к бензиновому топливу, благодаря чему происходит полное сгорание топлива и снижение содержания токсичных продуктов в выхлопных газах. Наиболее перспективной октаноповышающей добавкой являются алифатические спирты (метанол, этанол, 1-бутанол [1]. Поэтому исследование процесса термического разложения спиртов при температурах Т, превышающих температуру начала термического разложения $T_н$ [2,3], представляет как практический и научный интерес. Данные о кинетических параметрах термического разложения спиртов (константа скорости, энергия активации и др.) позволяют точнее описать механизм протекания реакции. Все задачи химической кинетики разделяются на прямые и обратные. Под прямой задачей химической кинетики понимают задачу нахождения концентраций участвующих в реакции веществ в любой момент времени, исходя из известных начальных концентраций, схемы реакции и констант скоростей отдельных стадий. Обратная задача химической кинетики — восстановление по известной зависимости концентрации веществ от времени схемы реакции и констант скорости [4].

Кинетика термического разложения алифатических спиртов подробна исследована в основном в динамическом режиме на струевых установках при высоких температурах $T>>T_н$. В данной работе исследована обратная задача разложения спиртов в статическом режиме в реакторе (пьезометре) постоянного объема методом определения роста давления в диапазоне температур 573.15 – 663.15 К.

Реакции термического разложения алифатических спиртов относятся к реакциям первого порядка [5-12], т.е.:

$$dp/d\tau = k \cdot p\ , \quad k = 1/p \cdot dp/d\tau \qquad (1)$$

где $k$ – константа скорости, $P$ – давление в системе при температуре Т, $dp/d\tau$ - изменение давления в единицу времени (скорость реакции).

Таблица1.

| Время τ, мин | Метанол | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Температура. К | | | | |
| | Т=583.15 К | Т=603.15 К | Т=623.15 К | Т=643.15 К | Т=663.15 К |
| 0 | 18.241 | 21.315 | 24.302 | 27.875 | 31.044 |
| 60 | 18.334 | 21.525 | 24.782 | 29.115 | 34.082 |
| 120 | 18.427 | 21.735 | 25.262 | 30.355 | 37.12 |
| 180 | 18.52 | 21.945 | 25.742 | 31.595 | 40.158 |
| 240 | 18.613 | 22.155 | 26.222 | 32.835 | 43.196 |
| 300 | 18.706 | 22.365 | 26.702 | 34.075 | 46.234 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | этанол | | | | |
| 0 | 13.465 | 15.972 | 18.25 | 21.055 | 24.011 |
| 60 | 13.51 | 16.087 | 18.55 | 21.825 | 25.997 |
| 120 | 13.555 | 16.202 | 18.85 | 22.595 | 27.983 |
| 180 | 13.6 | 16.317 | 19.15 | 23.365 | 29.969 |
| 240 | 13.645 | 16.432 | 19.45 | 24.135 | 31.955 |
| 300 | 13.69 | 16.547 | 19.75 | 24.905 | 33.941 |
| | 1-пропанол | | | | |
| 0 | 9.461 | 11.478 | 13.31 | 15.184 | 17.114 |
| 60 | 9.482 | 11.534 | 13.47 | 15.574 | 18.094 |
| 120 | 9.503 | 11.59 | 13.63 | 15.964 | 19.074 |
| 180 | 9.524 | 11.646 | 13.79 | 16.354 | 20.054 |
| 240 | 9.545 | 11.702 | 13.95 | 16.744 | 21.034 |
| 300 | 9.566 | 11.758 | 14.11 | 17.134 | 22.014 |
| | 1-бутанол | | | | |
| 0 | 5.562 | 7.014 | 8.58 | 10.311 | 12.124 |
| 60 | 5.575 | 7.044 | 8.665 | 10.512 | 12.594 |
| 120 | 5.588 | 7.074 | 8.75 | 10.713 | 13.064 |
| 180 | 5.601 | 7.104 | 8.835 | 10.914 | 13.534 |
| 240 | 5.614 | 7.134 | 8.92 | 11.115 | 14.004 |
| 300 | 9.587 | 11.814 | 14.27 | 17.524 | 22.994 |

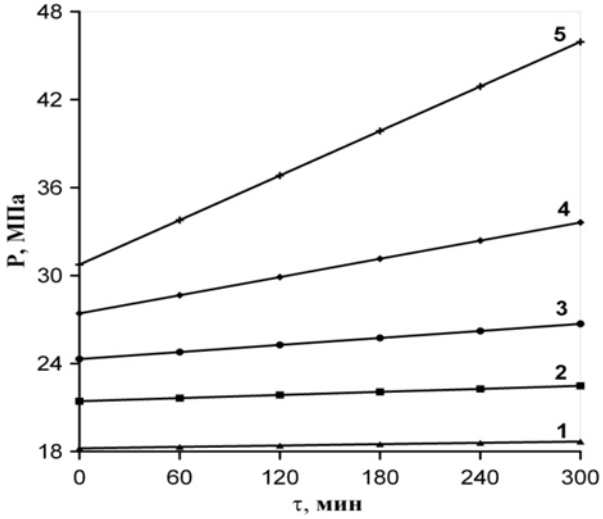



Рис.1. Зависимость давления паров метанола во времени при температурах Т, К: 1 –583.15 К; 2 – 603.15 К; 3 – 623.15 К; 4 – 643.15; 5 – 663.15 К

Для оценки величины константы скорости термического разложения по уравнению (1) необходимы данные по росту давления во времени при различных температурах. В табл.1 приведены значения изменения давления паров спиртов во времени через каждые 60 минут. Характер изменения давления для метанола и 1-пропанола иллюстрируют рис. 1 и 2.

Значение константы скорости разложения молекул исследованных спиртов в диапазоне температур 583.15 – 663.15 К, рассчитанные по уравнению (1), приведены в табл.2.

Зная значение константы скорости разложения спиртов, можно оценить значения их энергии активации по известному соотношению Аррениуса [4,13,14]:

$$k = A \cdot e^{-E/RT}, \quad \ln k = \ln A - E / RT, \qquad (2)$$

где А – предэкспоненциальный множитель; R=8,314 Дж/К*моль; Е – наименьшее

количество энергии, которое требуется сообщить системе, чтобы произошла реакция (энергия активации).

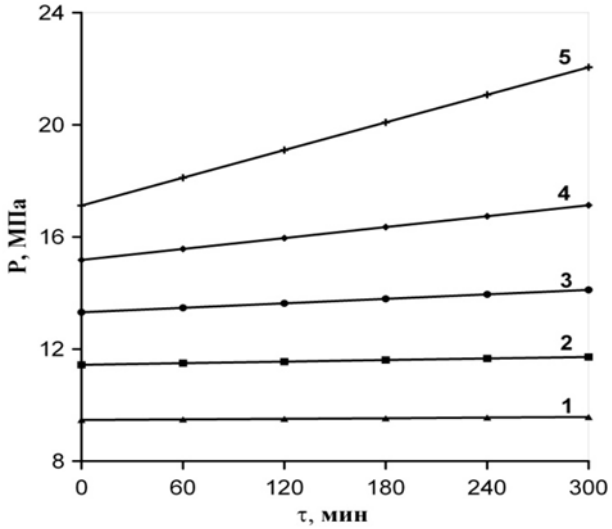


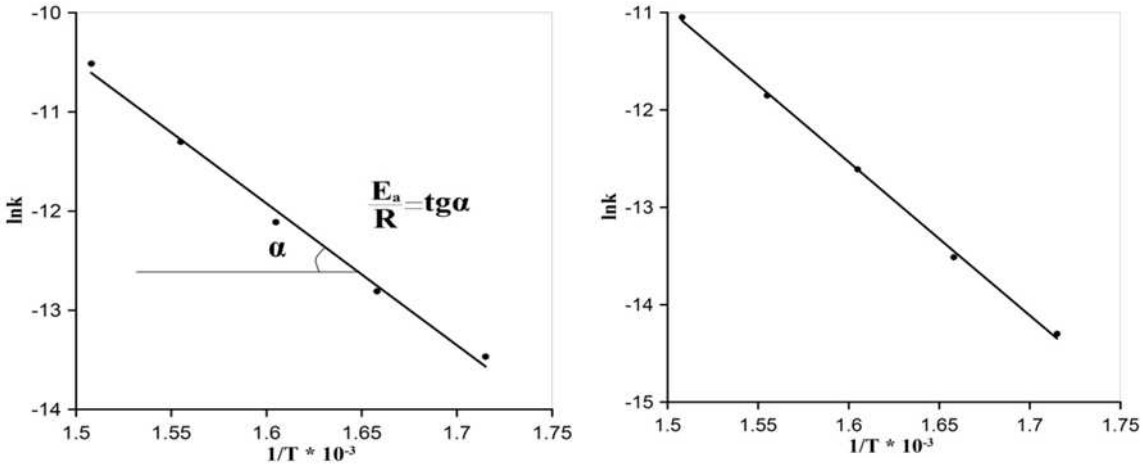

Рис.2. Зависимость давления паров 1-пропанола во времени при температурах Т, К: 1 –583.15 К; 2 – 603.15 К; 3 – 623.15 К; 4 – 643.15; 5 – 663.15 К

Значения энергии активации Е и А спиртов, определенные графическим методом, приведены также в табл.2.

Таблица 2.

| Т, К | $P_0 \cdot 106$, Па | dP/dτ, Па/с | k, $с^{-1}$ | $1/T*10^{-3}$, 1/К | lnk, $с^{-1}$ | Е, КДж/моль | А, $\cdot 10^5$ $с^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Метанол | | | | | | | |
| 583.15 | 18.241 | 25.83 | $1.42*10^{-6}$ | 1.715 | -13.468 | | |
| 603.15 | 21.315 | 58,33 | $2.74*10^{-6}$ | 1.658 | -12.809 | | |
| 623.15 | 24.302 | 133.33 | $5.49*10^{-6}$ | 1.605 | -12.113 | 119 | 0.577 |
| 643.15 | 27.875 | 344.44 | $1.24*10^{-5}$ | 1.555 | -11.301 | | |
| 663.15 | 31.044 | 843.88 | $2.72*10^{-5}$ | 1.508 | -10.513 | | |
| Этанол | | | | | | | |
| 583.15 | 13.465 | 12.50 | $9.28*10^{-7}$ | 1.715 | -13.890 | | |
| 603.15 | 15.972 | 31.94 | $2*10^{-6}$ | 1.658 | -13.122 | | |
| 623.15 | 18.250 | 83.33 | $4.57*10^{-6}$ | 1.605 | -12.297 | 129,1 | 3.219 |
| 643.15 | 21.055 | 213.89 | $1.02*10^{-5}$ | 1.555 | -11.497 | | |
| 663.15 | 24.011 | 551.66 | $2.3*10^{-5}$ | 1.508 | -10.681 | | |
| 1-пропанол | | | | | | | |
| 583.15 | 9.461 | 5.83 | $6.17*10^{-7}$ | 1.715 | -14.299 | | |
| 603.15 | 11.478 | 15.55 | $1,36*10^{-6}$ | 1.658 | -13.512 | | |
| 623.15 | 13.310 | 44.44 | $3.34*10^{-6}$ | 1.605 | -12.61 | 124.5 | 0.989 |
| 643.15 | 15.184 | 108.33 | $7.14*10^{-6}$ | 1.555 | -11.851 | | |
| 663.15 | 17.114 | 274.17 | $1.59*10^{-5}$ | 1.508 | -11.049 | | |
| 1-бутанол | | | | | | | |
| 583.15 | 5.562 | 3.61 | $6.5*10^{-7}$ | 1.715 | -14.247 | | |
| 603.15 | 7.014 | 8.33 | $1.19*10^{-6}$ | 1.658 | -13.643 | | |
| 623.15 | 8.580 | 23.61 | $2.75*10^{-6}$ | 1.605 | -12.803 | 114.6 | 0.111 |
| 643.15 | 10.311 | 55.83 | $5.42*10^{-6}$ | 1.555 | -12.126 | | |
| 663.15 | 12.124 | 130.55 | $1.08*10^{-5}$ | 1.508 | -11.439 | | |

На рис 3, 4 представлена зависимость lnk от 1/T для метанола и 1-пропанола. Аналогичная же зависимость для этанола и 1-бутанола.




(а) (б)

Рис.3. Зависимость lnk от 1/T : а – метанол; б – 1-пропанол

По найденным значениям констант скоростей термического разложения молекул спиртов для различных температур из уравнения Эйринга [14]:

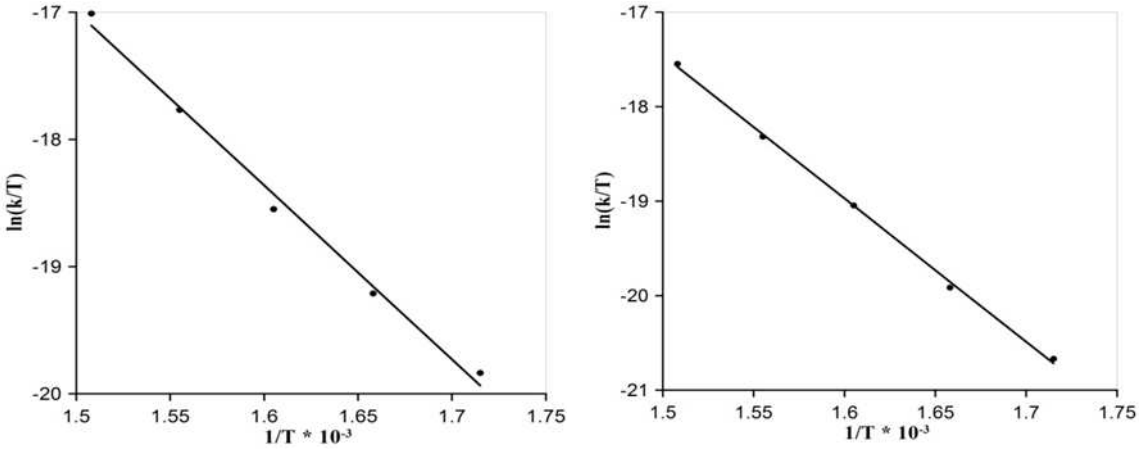
$$\ln(k/T) = \ln(k_b/\mathrm{h}) + \Delta S^{\neq}/R - \Delta H^{\neq}/RT \qquad (3)$$

где $k_b$ – постоянная Больцмана ($1.38065*10^{-23}$ Дж/К), h – постоянная Планка ($6{,}626*10^{-34}$ Дж*с), R – газовая постоянная (8,314 Дж/К*моль), можно определить значения $\Delta S^{\neq}$ - энтропии активации и $\Delta H^{\neq}$ - энтальпии активации.

Таблица 3. Значения активационных параметров термического разложения спиртов

| T, K | $1/T\cdot10^{-3}$, 1/K | ln(k/T) | $\Delta S^{\neq}$, Дж/мольК | $\Delta H^{\neq}$, кДж/моль |
|---|---|---|---|---|
| Метанол | | | | |
| 583.15 | 1.715 | -19.836 | -201.401 | |
| 603.15 | 1.658 | -19.211 | -202.674 | |
| 623.15 | 1.605 | -18.548 | -203.216 | 113.8 |
| 643.15 | 1.555 | -17.768 | -202.406 | |
| 663.15 | 1.508 | -17.01 | -201.441 | |
| Этанол | | | | |
| 583.15 | 1.715 | -20.258 | -187.398 | |
| 603.15 | 1.658 | -19.525 | -188.347 | |
| 623.15 | 1.605 | -18.732 | -188.352 | 124 |
| 643.15 | 1.555 | -17.964 | -188.154 | |
| 663.15 | 1.508 | -17.178 | -187.437 | |
| 1-пропанол | | | | |
| 583.15 | 1.715 | -20.668 | -187.363 | |
| 603.15 | 1.658 | -19.914 | -188.26 | |
| 623.15 | 1.605 | -19.045 | -187.738 | 119.3 |
| 643.15 | 1.555 | -18.317 | -187.976 | |
| 663.15 | 1.508 | -17.546 | -187.472 | |
| 1-бутанол | | | | |
| 583.15 | 1.715 | -20.616 | -215.35 | |
| 603.15 | 1.658 | -20.045 | -216.828 | |
| 623.15 | 1.605 | -19.238 | -215.939 | 109.4 |
| 643.15 | 1.555 | -18.593 | -216.034 | |
| 663.15 | 1.508 | -17.936 | -215.704 | |

В табл.4 приведены значения энергии активации термического разложения спиртов вычисленные в нашей работе, а также данные из литературных источников.




(а) (б)

Рис.4. Зависимость ln(k/T) – 1/T : а – метанол; б – 1-пропанол

Таблица.4. Значения энергии активации термического разложения спиртов

| Авторы | Метанол | Этанол | 1-пропанол | 1-бутанол |
|---|---|---|---|---|
| Fletcher C. J. M. | 284,2 [11] | – | – | – |
| Barnard J. and Hughes H. | – | 193,11 [12] | – | – |
| Barnard J. and Hughes H. | – | – | 208,8 [17] | – |
| Barnard J. and Hughes H. | – | – | – | 237 [18] |
| Aronowitz D. и др. | 376,2 [8] | – | – | – |
| Li, J., Kazakov, A. и др | – | 132,27 [9] | – | – |
| G. Rotzoll | – | 232,4 [16] | – | – |
| W H. David и Steven J.B. | 167 [15] | 145 [15] | – | – |
| Данные нашей работы | 119 | 129,1 | 124,5 | 114,6 |

Как видно энергии активации термического разложения спиртов, приведенные в таблице, существенно отличаются друг от друга. Вероятно, это связано с тем, что поведение кинетического эксперимента при решении обратной задачи сопряжено с рядом особенностей. Так, в отличие от синтетического и термодинамического эксперимента, когда для описания реакции достаточно знания количественных характеристик реакции в начальный и конечный моменты времени, в кинетическом эксперименте необходимо получить оценки откликов в промежуточные моменты времени. Так как в химической кинетике изучается течение реакции во времени, то для одних и тех же конечных и начальных реактантов возможно течение реакции по различным механизмам, для каждого из которых можно постулировать свое кинетическое уравнение или систему уравнений.

Другой особенностью кинетического исследования является неединственность решения обратной задачи кинетики, т.е. возможность получения множества наборов кинетических параметров (кинетических констант, энергий активаций и т.д.), удовлетворяющих принятому кинетическому уравнению.

**Литература:**

1. *Матиевский Д.Д., Кулманаков С.П.* Применение смесевых спиртовых топлив в дизелях автотракторного типа // http: // aomai.secna.ru: 8080/Books/Files/ Vestn_2000_02/11/11.htm.
2. *Джаппаров Т.А.* Температуры термического разложения алифатических спиртов в их водных растворах // Естественные и технические науки, № 3 ,

2012. С. 49-50.
3. *Джаппаров Т.А., Базаев А.Р.* Исследование термической стабильности водных растворов алифатических спиртов. // Теплофизика и аэромеханика. (В печати..)
4. *Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г.* Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1984. С.463.
5. *Johnson W.D.* Thermal decomposition of alcohols. I. 2-Methylbutan-2-ol (t-Pentyl alcohol). // Australian Journal of Chemistry. V 27. 1975. p. 1047 - 1052
6. *Garnett J.L., Johnson W.D. and Sherwood J.E.* Thermal decomposition of alcohols. III. 1-Methylcyclohexanol.// Australian Journal of Chemistry . 1975. V 29. p. 589.
7. *Жоров Ю.М.* Кинетика промышленных органических реакций. М., 1989. С.384.
8. *Aronowitz D., Naegeli D.W., Glassman I*. Kinetics of the pyrolysis of methanol.// J. Phys. Chem. - 1977. – V. 81. № 25. - P.2555 – 2559.
9. *Juan Li., Kazakov A., Dryer F.L.* Ethanol pyrolysis experiments in a variable pressure flow reactor.// Int. J. of Chemical Kinetics. - 2001.- V.33. № 12. - P.859-867.
10. *Juan Li. Kazakov A., Dryer F.L.* Experimental and Numerical Studies of Ethanol Decomposition Reactions.// J. Phys. Chem. A. - 2004. - V 108. № 38. – p. 7671 – 7680.
11. *Fletcher C.J.M.* The Thermal Decomposition of Methyl Alcohol.// Proc. R. Soc. Lond. A – 1934. № 147 – P. 119-128.
12. *Barnard J.A. and Hughes H.W.D.* The pyrolysis of ethanol.// Trans. Faraday Soc. - 1960. № 56 - P. 55 – 63.
13. *Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е.* Кинетика и механизм газофазных реакций. М.:Наука, 1974. С.558.
14. *Семиохин И.А., Страхов Б.В., Осипов А.И.* Кинетика химических реакций. М.: МГУ. 1995. С. 351.
15. *Walter H., David A., Steven J.* Methanol and Ethanol Decomposition in Supercritical Water //Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 2005. – Vol.219,№ 3. - p. 367 – 378
16. *Rotzoll G.* High-temperature pyrolysis of ethanol // Journal of Analytical Pyrolysis. 1985. V. 9. №1. P.43-52.
17. *Barnard J.A. and Hughes H.W.D.* The pyrolysis of n-propanol // Trans. Faraday Soc., 1960,V 56. P. 64-71.
18. *Barnard J.A. and Hughes H.W.D.* The pyrolysis of n-butanol // Trans. Faraday Soc. 1957. V. 53, P.1423-1430.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Зейналов М.Ш, Дибиров Я.А.

*Филиал ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: jakhya@yandex.ru*

**Актуальность.** Одной из динамично развивающих отраслей возобновляемой энергетики во всем мире в последние годы стала энергия биомассы.

Биомасса как источник энергии играет существенную роль в мировом энергетическом балансе. Сегодня вклад биомассы в мировой энергетический баланс оценивается в 12-13% [1].

Ежегодно в мире образуется около 220 млрд. т биомассы (по сухому веществу), что по теплотворности эквивалентно около 4000 ЭДж. (Для сравнения общее годовое потребление энергии в мире составляет около 500 ЭДж) [1].

Биогаз – газ, получаемый метановым брожением биомассы. Разложение биомассы происходит под воздействием трёх видов бактерий. В цепочке питания последующие бактерии питаются продуктами жизнедеятельности предыдущих. Первый вид – бактерии гидролизные, второй — кислотообразующие, третий – метанобразующие. В производстве биогаза участвуют не только бактерии класса метаногенов, а все три вида.

Человечество научилось использовать биогаз давно. В 1 тысячелетии до н.э. на территории современной Германии уже существовали примитивные биогазовые установки (БГУ).

Среди промышленно развитых стран ведущее место в производстве и использовании биогаза по относительным показателям принадлежит Дании – биогаз занимает до 18 % в её общем энергобалансе. По абсолютным показателям по количеству средних и крупных установок ведущее место занимает Германия – 8000тыс.шт. В Западной Европе не менее половины всех птицеферм отапливаются биогазом [2].

В Индии, Вьетнаме, Непале и других странах строят малые (односемейные) биогазовые установки. Получаемый в них газ используется для приготовления пищи.

Больше всего малых БГУ находится в Китае — более 10 млн (на конец 1990-х). Они производят около 7 млрд м³ биогаза в год, что обеспечивает топливом примерно 60 млн крестьян. В конце 2010 года в Китае действовало уже около 40 млн БГУ. В биогазовой индустрии Китая заняты 60 тысяч человек [3].

Россия находится в зоне рискованного земледелия и по климатическим условиям, и по характеристике большая часть почв - малоурожайные подзолистые почвы, требующие постоянного внесения органических удобрений. Поэтому во всех регионах России потребность в органических удобрениях будет постоянной и она будет определяющей в развитии биогазовых технологий. Использование таких технологий и созданного на их основе оборудования позволит в ближайшие годы: полностью решить в сельской местности проблему всех органических отходов, обустроить дома сельских жителей современными санитарно-гигиеническими системами европейского типа и оказать существенную помощь в решении проблем энергосбережения.

Большой практический интерес представляет проектирование и создание

новых высокоэффективных биогазовых установок для потребителей, расположенных вне зоны централизованного энергоснабжения.

В подавляющем большинстве в действующих во всем мире в настоящее время БГУ реализован мезофильный режим со средним сроком сбраживания исходной биомассы 25 ÷ 30 дней при оптимальных температурах 30 ÷ 37 $^{o}$C. Реализация термофильного режима сбраживания (средний срок сбраживания исходной массы 12 ÷ 15 дней при оптимальных температурах 50 ÷ 55 $^{o}$C) в БГУ затруднена из-за больших энергетических затрат, необходимых для поддержания изотермического режима в биореакторах, и значительного снижения производительности газа при отклонении температуры на 2 ÷ 3 $^{o}$C от оптимума.

Данная задача эффективно решена в предлагаемой нами гелиобиогазовой установке термофильного режима сбраживания с применением фазопереходных тепловых аккумуляторов с температурой плавления, равной температуре оптимума для термофильного типа сбраживания, т.е. в диапазоне температур 50 ÷ 55 $^{o}$C.

**Цель работы:** расчет и конструирование гелиобиогазовой установки термофильного сбраживания с применением фазопереходного теплового аккумулятора.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. определение объема реактора и размеров БГУ;
2. выбор исходного материала для сбраживания;
3. выбор теплоаккумулирующего материала и расчет его количества;
4. определение площади солнечных коллекторов.

*Определение объема реактора и размеров биогазовой установки*. Объем биореактора, занятого субстратом, рассчитывается по формуле [4]:

$$V_{реакт.} = V_f \cdot t_r,$$

где $V_{реакт.}$ – объем субстрата в биореакторе, м$^3$, $V_f$ – скорость подачи сбраживаемого сырья в биореактор, м$^3$/сут, $t_r$ – время полного сбраживания исходного сырья, сут. Для определения скорости подачи сырья в биореактор ($V_f$) необходимо знать суточное потребление биогаза для конкретного потребителя (в м$^3$). Для этого исходили от условного частного дома с площадью 60 м$^2$, где проживают 4 человека, с полным теплоснабжением в отопительный период, горячим водоснабжением и газоснабжением (для одной кухонной плиты) в круглый год только энергией биогаза.

По нормативному показателю максимального теплового потока на отопление (65 Вт/м$^2$, при расчетной температуре наружного воздуха -5 $^{o}$C) [5] определено суточное количество тепловой энергии, необходимой для теплоснабжения жилого дома с площадью 60 м$^2$:

$$Q_{от.} = 65 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 60 = 337 \text{ МДж}.$$

Определение суточного количества тепловой энергии, необходимой для горячего водоснабжения четырех человек производилось, исходя от нормативного показателя максимального теплового потока - 247 Вт/чел., при среднем расходе воды 85 л в сутки на 1 чел. [5]:

$$Q_{г.в.} = 247 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 4 = 85 \text{ МДж}.$$

Нормативный суточный расход природного газа для жилых домов на приготовлении пищи в тепловом эквиваленте составляет 15 МДж [6].

Суммарное суточное потребное количество тепловой энергии для жилого дома площадью 60 м$^2$ и количеством жильцов 4 чел в отопительный период составит:

$Q_{сум.}$ = 337 + 85 +15 = 437 МДж.

Теплота сгорания биогаза с 70% -м содержанием метана равна 25,2 МДж/м$^3$.

Суточное потребление биогаза в отопительный период равно

$V_{сут.}$ = 437 : 25,2 = 17,4 м$^3$,

а в неотопительный период – 100 : 25,2 = 4 м$^3$.

Суточная порция объема субстрата, загружаемого в биореактор равна [4]:

$V_f = m_f/\rho_m$,

где $m_f$ –масса сухого ежесуточно добавляемого исходного сырья, кг, $\rho_m$ – плотность сбраживаемого материала, кг/м$^3$ (примерно 70 кг/м$^3$). Если в качестве сбраживаемого материала использовать растительную массу с выходом с одного кг сухого вещества исходного сырья 700 л биогаза, то масса сухого ежесуточно добавляемого в биореактор исходного сырья в отопительный сезон составит

$m_f$ = 17,4/0,7 = 24,9 кг, а $V_f$ = 0,36 м$^3$ (360 л)

и в неотопительный сезон –

$m_f$ = 4/0,7 = 5,7 кг, а $V_f$ = 0,082 м$^3$ (82 л).

Объем биореактора, занятого субстратом, с учетом времени полного сбраживания при термофильном режиме – 12 дней, составит

$V_{реакт.}$ = 0,36·12 = 4,32 м$^3$.

С учетом части объема биореактора для образовавшегося биогаза (примерно 700 л) полный объем биореактора составит 5 м$^3$. Предлагаем исполнить биореактор в виде цилиндрической емкости из нержавеющей стали (δ = 1 мм) с радиусом основания 80 см и высотой 250 см и рубашку БГУ - в виде цилиндра с радиусом основания 90 см и высотой 260 см (по 10 см вокруг биореактора для воды и размещения контейнеров с теплоаккумулирующим материалом).

*Выбор исходного материала для сбраживания*. В качестве исходного выбран тростник (в обиходе камыш), достигающий в высоту до 5 м и распространенный почти по всей территории России, часто образуя обширные заросли. Урожайность зеленой массы 8 ÷ 20 т с гектара [7] с ориентировочным выходом с одного кг сухого вещества тростника 700 л биогаза.

*Выбор теплоаккумулирующего материала*. После проведенного литературного обзора в качестве теплоаккумулирующего материала для биореактора была выбрана смесь кристаллогидратов ацетата натрия и тиосульфата натрия. Для получения необходимого для этого состава была исследована дифференциально-термическим анализом (ДТА) [8] двойная система: кристаллогидрат ацетата натрия - кристаллогидрат тиосульфата натрия, в результате которого получен теплоаккумулирующий состав с температурой плавления 53 $^o$C и теплотой плавления, равной 208 кДж/кг.

После проведенных более 80 циклов «плавление – кристаллизация» существенно не изменилась ни температура плавления, ни энтальпия фазового перехода полученной смеси. Кроме того, не было выявлено и существенной потери массы.

*Определение необходимого количества фазопереходного теплоаккумулирующего материала для БГУ* исходило из следующего соображения: тепловая энергия разовой разрядки аккумулятора тепла должна быть больше максимального трехсуточного расхода теплоты, необходимого для поддержания фиксированного температурного режима в биореакторе с учетом всех тепловых потерь. Для этого составим тепловой баланс БГУ. Расходную часть баланса определяется тепловыми потерями БГУ, а приходную часть представляет

собой тепловой эффект реакций брожения исходного сырья.

Максимальные тепловые потери БГУ при расчетной температуре наружного воздуха -5 $^oC$ в зимние месяцы через 1 $м^2$ теплоизолированного корпуса рубашки (фиксированная температура внутри рубашки +53 $^oC$) рассчитывали по формуле [9]:

$Q_{пот.} = \lambda \cdot \Delta T/\delta$,

где $Q_{пот.}$ – тепловые потери, $Вт/м^2$, $\lambda$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала снаружи рубашки, Вт/(м·К), $\Delta T$ – разность температур внутри и снаружи корпуса рубашки, К, $\delta$ – толщина теплоизоляционного материала, м.

В качестве наружной тепловой защиты для БГУ эффективнее всего можно использовать инновационный жидкий теплоизоляционный материал - *Re-therm* с коэффициентом теплопроводности 0,0011 Вт/(м·К)! Разность температур ($\Delta T$) равна 60 К. Толщина теплоизоляции принята равной 3 мм (0,003 м). Площадь поверхности рубашки БГУ (цилиндр с радиусом основания 0,9 м и высотой 2,6 м) равна 19,8 $м^2$. Тогда максимальные теплопотери БГУ за три сутки (72 ч) составят

$Q_{пот.} = 19{,}8 \cdot 72 \cdot 3600 \cdot 0{,}0011 \cdot 60/0{,}003 = 112{,}9$ МДж.

Определим изменение энтальпии в результате реакций брожения углеводов, являющейся основой растительной массы (около 80% сухого вещества растений приходится на долю углеводов). Эти реакции экзотермичны с тепловым эффектом примерно 1,5 МДж на 1 кг сухой массы исходного вещества для сбраживания [10]. Если учесть, что обычно сбраживается около 60% исходного продукта, то тепловой эффект реакций сбраживания за три сутки в отопительный период соответствует величине

$\Delta H_{р.бр.} = 3 \cdot 25 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}5 = 67{,}5$ МДж.

Разность между тепловыми потерями БГУ и тепловым эффектом реакций сбраживания за три сутки равна

$\Delta Q = 112{,}9 – 67{,}5 = 45{,}4$ МДж.

Энтальпия фазового перехода теплоаккумулирующего материала - 208 кДж/кг. Необходимое количество теплоаккумулирующего материала должно быть не менее

$m_{ТАМ} = 45{,}4:208 = 219$ кг.

Таким образом, в водяной рубашке размещаются три пластинчатых контейнера с общей массой теплоаккумулирующего материала 219 кг и объемом 152 л. Контейнера изготавливают из нержавеющей стали ($\delta$ = 1 мм) высотой 3 см со сквозными круглыми отверстиями (d = 3 см и шагом 6 см по центру осей по большей поверхности (грани) контейнеров) для лучшего теплообмена с водой в рубашке БГУ.

*Определение площади солнечных коллекторов.* Площадь солнечных коллекторов для БГУ определяется из условия: чтобы минимальная за месяц однодневная тепловая энергия, вырабатываемая всеми коллекторами, была больше тепловой энергии, необходимой для разовой зарядки массы теплоаккумулирующего материала во всех трех контейнерах, размещенных вокруг биореактора. Наиболее высокий КПД (80%) имеют плоские солнечные коллекторы из вакуумированных труб с селективным покрытием, работающие как при прямом, так и при рассеянном (тучи) солнечном излучении.

Минимальная за месяц (декабрь) среднедневная суммарная солнечная радиация на неподвижную наклонную поверхность с оптимальным углом наклона к горизонту в Махачкале составляет 1,6 кВт·ч/($м^2$ день), а максимальная за месяц (июнь) – 5,6 кВт·ч/($м^2$ день) [11]. Минимальная однодневная тепловая энергия,

вырабатываемая коллектором с КПД 80%, равна

$Q_{мин.} = 1,6 \cdot 3,6 \cdot 0,8 = 4,61$ МДж/м$^2$.

Общая площадь солнечных коллекторов должна быть более 10 м$^2$:

$S_{кол.} = 45,4/4,61 = 9,85$ м$^2$.

*Ориентировочный расчет экономической эффективности внедрения гелиобиогазовой установки с тепловым аккумулятором*

1. Общая потребная масса тростника в год 25·365 = 9125 кг;
2. Стоимость тонны тростника 200 р;
3. *Расходы на приобретение тростника 9,125·0,2 = 1,825 тыс. р./год;*
4. Выход биогаза с 1 кг тростника 0,7 м$^3$;
5. Общий выход биогаза в год 9125·0,7 = 6388 м$^3$;
6. Доля метана в биогазе 70%;
7. Общий выход метана в год 6388·0,7 = 4471 м$^3$;
8. Стоимость единицы метана 3,24 р/м$^3$;
9. **Стоимость метана в денежном выражении 4,471·3,24 = 14,5 тыс. р.;**
10. Выход кормовых добавок для животных в год 9125 кг;
11. Стоимость единицы кормовых добавок 15 тыс. р./тонн
12. **Объем производства кормовых добавок для**
13. **животных в денежном выражении в год 9,125·15 = 137 тыс. р.;**
14. *Стоимость БГУ 260 тыс. р.;*
15. *Расходы на содержание БГУ в год 20 тыс. р.;*

**ИТОГО доходов в первый год 14,5 + 137 = 151,5 тыс. р.**

*ИТОГО расходов в первый год 1,825 + 260 + 20 = 281,825 тыс.р*

***Срок окупаемости БГУ 281,825:(151,5:12) = 23 месяца.***

Экономический расчет произведен по укрупненным показателям: по минимальной производительности установок, по стоимости изготовления единичного опытного образца, без учета совершенства технологии производства.

Даже укрупненный расчет экономического эффекта показывает, что применение гелиобиогазовых установок целесообразно, экономически и экологически эффективно.

**Литература:**

1. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. – М: Физматлит, 2010. - 256 с.
2. http://lenagro.org/biogaz/855-o-biogaze.html
3. http://www.biogas-rcb.ru/about/a
4. Экологическая биотехнология/ Под ред. К.Ф. Форстера и А.А. Дж. Вейза. Л.: Химия, Лен. Отд. 1990.
5. СНиП 2.04.07-86. Тепловые сети. - М. 1988.
6. СНиП 42-01-2002. Газораспределительные системы. – М. 2004.
7. *Губанова И.А., Киселева К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н.* Иллюстрированный определитель растений средней России. Т. 1. – М.: Т-во научных изданий КМК, Ин-т технологических исследований, 2002. – 526 с.
8. *Егунов В.П.* Введение в термический анализ. Самара: Сам-й гос. тех. ун-т, 1996. - 270 с.
9. *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: пер. с англ./ Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
10. *Бабаев Б.Д., Данилин В.Н.* Энергоаккумулирующие установки: Учебное пособие. –Махачкала: ИПЦ ДГУ, 2002. -119 с.
11. *Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Д., и др.* Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. – М.: ООО «Печатный салон ШАНС», 2010.- 54 с.

# ВЫБОР СОЛНЕЧНЫХ И ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОЙ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Гаджимурадов Р.Н.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: ipg_sun@mail.ru*

В данной статье рассматривается выбор солнечных и гибридных солнечных станций с учётом особенностей Республики Дагестан. Рассмотрены возможные варианты гибридных станций, их достоинства и недостатки, рассчитано оптимальное соотношение мощностей энергоустановок.

Во всём мире растут объёмы использования возобновляемых источников энергии и их доля относительно традиционных источников энергии. Республика Дагестан обладает огромными ресурсами возобновляемых источников энергии – большим количеством дней солнечной видимости в году и объемом солнечной инсоляции [1], значительный потенциал энергии ветра [2], большими запасами геотермальной и гидравлической энергии и т.д.

Несмотря на значительные запасы традиционных источников энергии (природного газа, нефти и т.д.) объёмы потребления превышают объемы добычи, возобновляемые источники энергии достаточно освоены только гидроэлектростанциями, остальные энергоресурсы широко не представлены и не вносят заметного вклада в энергетическую карту региона.

Из основных особенностей республики необходимо упомянуть большое количество мелких потребителей энергии (сельское население), удаленных от основных источников энергии и линий электропередач и газопроводов, особенно недостаточное покрытие газопроводами горных районов республики. Следствием этого является то, что до сих пор во многих районах республики для теплоснабжения и других хозяйственных нужд используются дрова (по некоторым данным, за последние 100 лет площадь, покрытая лесами сократилась втрое). Также отметим, что в горных районах республики продолжительность солнечного сияния составляет и интенсивность солнечной радиации выше, чем в равнинных районах.

Объем ветроэнергетических ресурсов, рассчитанный на основе наблюдений метеорологических станций [2], [3], составляет более 50 млрд. кВтч/год.

Несмотря на большие ресурсы геотермальной и гидравлической энергии, они доступны не на всей территории республики, а для их использования требуются большие инвестиции, что не позволяет их использовать мелким потребителям энергии.

Использование солнечной энергии для энерго- и теплоснабжения имеет общеизвестную сложность – зависимость энергии от времени года (в период с ноября по февраль объемов энергии недостаточно), а также времени суток и погоды. Энергии ветра не только доступна для использования и ночью, но даже находится в т.н. «противофазе» с энергией солнца, т.е. приходится на различное время суток и года – когда светит яркое солнце, обычно нет ветра, а если дует сильный ветер, то нет солнечной видимости и как следствия низкая солнечная радиация. Поэтому оптимальным выбором гибридной электростанции является солнечно-ветровая электростанция.

Карты распределения среднегодовой скорости ветра и

продолжительности солнечного сияния приведены ниже [1], [2]:

Кроме того, солнечно-ветровая электростанция будет иметь дополнительное преимущество за счёт отсутствия необходимости дублирования составляющих элементов – аккумуляторных батарей, блока контроля и управления зарядом аккумуляторных батарей, инвертора и т.д.

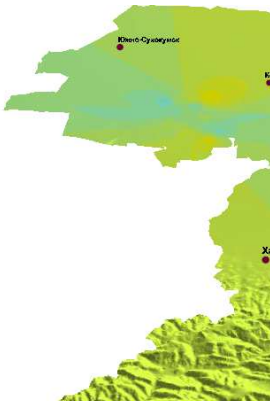


Рис.1. Карта среднегодовой продолжительности солнечного сияния на территории Республики Дагестан

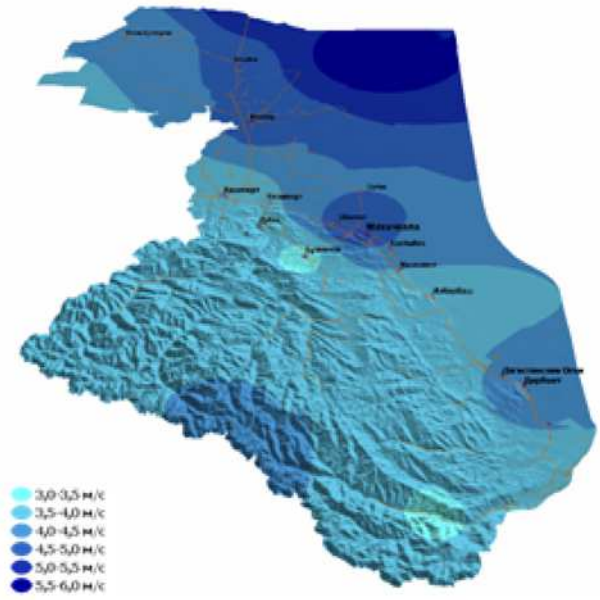



Рис.2. Карта распределения среднегодовой скорости ветра на территории Республики Дагестан

Наиболее популярным и распространенным соотношением мощностей гибридной солнечно-ветровой электростанции является один к трём и более – мощность ветроэлектрической установки обычно в 3 и более раз превышает

мощность фотоэлектрического модуля. В то же время, у большинства мелких потребителей энергии (частные домашние хозяйства) пик потребления приходится днём и вечером, а ночью и утром – минимум, поэтому соотношение солнечной и ветровой электроустановок должно быть обратным или хотя бы равным, особенно с учётом запаса по времени потребления, обеспечиваемого аккумуляторными батареями.

Кроме того, необходимо учитывать, что мощность ветрогенератора электростанции, согласно классической формуле, зависит от скорости ветра в кубе, и соответственно, будет сильно колебаться. В то же время мощность фотоэлектрического модуля зависит от КПД фотоэлектрических пластин и солнечной радиации, но более стабильна и легко наращиваема (путём простого увеличения количества пластин).

Побочным эффектом перераспределения энергии внутри гибридной электростанции с ветровой на электрическую послужит снижение стоимости монтажа и снижение уровня шума (за счёт снижения требуемой мощности ветрогенератора).

В качестве ориентировочного примера для типового домашнего хозяйства с дневным энергопотреблением 15-20 кВтч можно использовать гибридную солнечно-ветровую энергетическую установку суммарной мощностью 2 кВтч.

**Литература:**

1. *Гаджимурадов Р.Н.* Построение карт продолжительности солнечного сияния на территории Дагестана // III Школа молодых ученых им.Э.Э.Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», 2010.
2. *Камилова А.М.* Исследование ветровой активности на территории Дагестана с помощью геоинформационного моделирования // III Школа молодых ученых им.Э.Э.Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», 2010.
3. Сервер «Погода России» // http://meteo.infospace.ru.
4. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Коллектив авторов. – СПб.: Наука, 2002.

# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Магомедов М.М-Ш.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru*

Представлена обобщённая формула для получения значений теплопроводности водных растворов неорганических веществ вблизи линии насыщения. Оценочная погрешность значений теплопроводности водных растворов солей по формуле составляет 1,3 %.

Горячие подземные воды находят широкое применение в теплоснабжении жилых и не жилых помещений. Вода является лучшим средством для транспортировки тепла или холода, т.к. обладает высокой теплоемкостью и является достаточно дешевым в экономическом плане. Для большинства водно-солевых систем теплопроводность минерализованной воды ниже, чем чистой воды в интервалах температур 273–473 К и давлений 0,1–100 МПа.

Для оптимизации технологических процессов по использовании тепла геотермальных вод необходимо иметь достоверные данные о теплофизических свойствах минерализованных вод.

Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности водных растворов солей вблизи линии насыщения при температурах 273–473 К и концентрациях 0–25 % (масс.)

$$\lambda^{Э}_{(Ps,T,c)} = \lambda^{B}_{(Ps,T)}\left[1.000 - \sum_{j,i=1}^{n} A_j\left(c_i + 2.000\times10^{-4}c_i^3\right)\right]$$

где $\lambda^{Э}_{(Ps,T,c)}$ – теплопроводность, Вт/(м · К) водного раствора электролита при давлениях $P$s=0,1–2 МПа, температурах $T$=274–473, К и концентрации $c_i$ – концентрация $i$-й системы, % (масс.); $\lambda^{B}_{(Ps,T)}$ – теплопроводность воды при давлении $P$s и температуре $T$; $A_i$ –коэффициенты, характерные для каждой бинарной системы водных растворов неорганических веществ, которые были представлены в [1–4].

Таблица 1. Теплопроводность системы NaCl + $H_2O$ вблизи линии насыщения по обобщённой формуле

| $T$, К | $\lambda\cdot10^3$, Вт/(м · К) системы NaCl + $H_2O$ при $c$, % (масс.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 293.15 | 600 | 597 | 595 | 590 | 584 | 578 | 571 |
| 313.15 | 631 | 628 | 626 | 620 | 614 | 608 | 601 |
| 333.15 | 652 | 649 | 646 | 641 | 635 | 628 | 621 |
| 353.15 | 669 | 666 | 663 | 657 | 651 | 645 | 637 |
| 373.15 | 679 | 676 | 673 | 667 | 661 | 654 | 647 |
| 393.15 | 685 | 682 | 679 | 673 | 667 | 660 | 652 |
| 413.15 | 686 | 683 | 680 | 674 | 668 | 661 | 653 |
| 433.15 | 682 | 679 | 676 | 670 | 664 | 657 | 650 |
| 453.15 | 674 | 671 | 668 | 662 | 656 | 649 | 642 |
| 473.15 | 663 | 660 | 657 | 652 | 645 | 639 | 632 |

На основе анализа данных различных экспериментальных работ по теплопроводности водных растворов неорганических веществ [1, 6–9, 11–22] получена формула. Расчетные значения теплопроводности водных растворов солей по формуле согласуются с данными [1, 6–9, 11–22] в пределах 1.4 %.

Таблица 2. Теплопроводность системы $KCl + H_2O$ вблизи линии насыщения по обобщённой формуле

| *T*, К | $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м · К) системы $KCl + H_2O$ при *c*, % (масс.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 293.15 | 600 | 595 | 590 | 581 | 570 | 559 | 547 |
| 313.15 | 631 | 626 | 621 | 611 | 600 | 588 | 575 |
| 333.15 | 652 | 647 | 642 | 631 | 620 | 608 | 594 |
| 353.15 | 669 | 664 | 658 | 647 | 636 | 623 | 610 |
| 373.15 | 679 | 674 | 668 | 657 | 645 | 633 | 619 |
| 393.15 | 685 | 680 | 674 | 663 | 651 | 638 | 624 |
| 413.15 | 686 | 681 | 675 | 664 | 652 | 639 | 625 |
| 433.15 | 682 | 677 | 671 | 660 | 648 | 636 | 621 |
| 453.15 | 674 | 669 | 663 | 652 | 641 | 628 | 614 |
| 473.15 | 663 | 658 | 652 | 642 | 630 | 618 | 604 |

Необходимые значения теплопроводности воды вблизи линии насыщения для формулы использованы из [5], а Aj – характерные коэффициенты для каждой бинарной системы неорганических веществ получены из экспериментальных данных, так для водных растворов: NaCl, KCl, CaCl2, MgCl 2 получены соответственно значения 0,00169; 0,00315; 0.00187; 0.00384. Представленная формула проверялась для многих водно-солевых систем, в том числе и в последние годы [23, 24].

Таблица 3. Теплопроводность системы $CaCl2 + H_2O$ вблизи линии насыщения по обобщённой формуле

| *T*, К | $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м · К) системы $CaCl_2 + H_2O$ при *c*, % (масс.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 293.15 | 600 | 597 | 594 | 589 | 582 | 576 | 568 |
| 313.15 | 631 | 628 | 625 | 619 | 612 | 605 | 598 |
| 333.15 | 652 | 649 | 646 | 640 | 633 | 626 | 618 |
| 353.15 | 669 | 666 | 663 | 656 | 649 | 642 | 634 |
| 373.15 | 679 | 676 | 673 | 666 | 659 | 652 | 643 |
| 393.15 | 685 | 682 | 679 | 672 | 665 | 657 | 649 |
| 413.15 | 686 | 683 | 680 | 673 | 666 | 658 | 650 |
| 433.15 | 682 | 679 | 676 | 669 | 662 | 654 | 646 |
| 453.15 | 674 | 671 | 668 | 661 | 654 | 647 | 638 |
| 473.15 | 663 | 660 | 657 | 650 | 644 | 636 | 628 |

Таблица 4. Теплопроводность системы $MgCl2 + H_2O$ вблизи линии насыщения по обобщённой формуле

| *T, K* | $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м · К) системы $MgCl_2 + H_2O$ при *c*, % (масс.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 293.15 | 600 | 594 | 588 | 577 | 564 | 550 | 535 |
| 313.15 | 631 | 625 | 619 | 606 | 593 | 579 | 563 |
| 333.15 | 652 | 646 | 639 | 626 | 613 | 598 | 582 |
| 353.15 | 669 | 663 | 656 | 643 | 629 | 614 | 597 |
| 373.15 | 679 | 672 | 666 | 652 | 638 | 623 | 606 |
| 393.15 | 685 | 678 | 672 | 658 | 644 | 628 | 611 |
| 413.15 | 686 | 679 | 673 | 659 | 645 | 629 | 612 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 433.15 | 682 | 675 | 669 | 655 | 641 | 625 | 608 |
| 453.15 | 674 | 668 | 661 | 648 | 633 | 618 | 601 |
| 473.15 | 663 | 657 | 650 | 637 | 623 | 608 | 591 |

**Литература:**

1. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния. В сб.: Геотермия. Геологические и теплофизические задачи. Махачкала: Изд-во Даг. НЦ РАН, 1992. С. 168–187.
2. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность бинарных и многокомпонентных водных растворов неорганических веществ // ТВТ. 1998. Т. 36. № 1. С. 48–54.
3. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность высокоминерализованных растворов воды при высоких давлениях и температурах // Докл. на международной конф. – Тепловое поле Земли и методы его изучения. Москва, Россия. 2000. С. 254–258.
4. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность бинарных и многокомпонентных водных растворов неорганических веществ при высоких параметрах состояния // ТВТ. 2001. Т. 39. № 2. С. 241–245.
5. *Александров А.А.* Международные таблицы и уравнения для теплопроводности воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1980. № 4. С. 70–74.
6. *Riedel L.* Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Natron- und Kalilauge verschiedener Konzentration und Temperatur // Chem. Ing. Techn. 1950. № 3. S. 54–56.
7. *Riedel L.* Wärmeleitfähigkeit von wäßrigen Lösungen starker Elektrolute // Chem. Ing. Techn. 1951. № 3. S. 59–64.
8. *Капустинский А. Ф., Рузавин И.И.* Теплопроводность водных растворов электролитов // ЖФХ. 1955. Т. 29. № 12. С. 2222–2229.
9. *Варгафтик Н.Б., Осминин Ю.П.* Теплопроводность водных растворов солей, кислот и щелочей // Теплоэнергетика. 1956. № 7. С.11–16.
10. *Бретшнайдер С.* Свойства газов и жидкостей / Перевод с польского. Под ред. Романкова П.Г. М. – Л.: Химия, 1966. 540 с.
11. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Государственной Службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776–98. М.: Издательство МЭИ. 1999.168 с.
12. *Юсуфова В.Д., Пепинов Р.И., Николаев В.А., Гусейнов Г.М.* Теплопроводность водных растворов хлорида натрия // ИФЖ. 1975. Т. 29. № 4. С. 600–605.
13. *Эльдаров В.С.* Теплопроводность водных растворов солей // ЖФХ. 1980. Т. 54. № 3. С. 606–609.
14. *Alloush A., Gosney W.B., Wakeham W.A.* A. Transient Hot- Wire Instrument for Thermal Conductivity Measurements in Electrically Conducting Liquids at Elevated Temperatures // Int. J. Thermophys. 1982. V. 3. № 3. P. 225–235.
15. *Nagasaka Y., Okada H., Suzuki J., Nagashima A.* Absolute Measurements of the Thermal Conductivity of Aqueous NaCl Solutions at Pressures up to 40 MPa // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1983. V. 87. № 10. P. 859–866.
16. *Rastorguyev Yu. L., Grigoryev B.A., Safronov G.A., Ganiyev Y.A.* Thermal Conductivity of Aqueous Solutions of Alkali Metals Halides // Proc. 10 th Intern. Conf. on the Properties of Steam. Moscow, USSR. 1984. V. 2. P. 210–218.
17. *Эльдаров В.С.* Теплопроводность водных растворов натриевых солей // ЖФХ. 1986. Т. 60. № 3. С. 603–605.
18. *Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С.* Исследование теплопроводности водных растворов нитратов натрия, калия и серебра // Изв. вузов. Энергетика. 1988. №

6. С. 78–84.

19. *Сафронов Г.А., Косолап Ю.Г., Расторгуев Ю.Л.* Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности бинарных растворов электролитов. М.: 1990. 28 с. – Деп. ВИНИТИ 26.07.90., № 4262–В 90.
20. *Пепинов Р.И., Гусейнов Г.М.* Экспериментальное исследование теплопроводности водных растворов хлористого калия при высоких температурах // ТВТ. 1991. Т. 29. № 3. С. 605–607.
21. *Вахабов И.И., Эльдаров В.С., Якубова И.Н.* Теплопроводность растворов системы $H_2O + MgCl_2 + MgSO_4$ при высоких давлениях // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 5. С. 51–53.
22. *Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Ахмедова Р.Э.* Исследование теплопроводности трехкомпонентных водных растворов солей $MgCl_2$ и $MgSO_4$ // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 3–4. С. 65–68.
23. *Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.* Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния // Естественные и технические науки. 2011. № 1(51). С. 23–26.
24. *Магомедов М.М-Ш., Магомедов У.Б.* Теплопроводность воды и водных растворов солей // Естественные и технические науки. 2011. № 3(53). С.54–56.

# ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕПЛО КОНЦЕНТРИРУЮЩИМИ СОЛНЕЧНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ

Шапиев Г. Ш.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: shguseyn@mail.ru*

Использование солнечной энергии в технических приложениях часто ограничены его низкой плотностью по сравнению с традиционными источниками энергии. Оптическое концентрирование - один из вариантов увеличения плотности энергии солнечного излучения, позволяющий использовать абсорберы с небольшими поверхностями. При этом могут быть достигнуты более высокие температуры и КПД, потому что теплопотери пропорциональны поверхности абсорбера. Если конечная цель заключается в преобразовании солнечной энергии в работу, термодинамика показывает, что чем выше температура, тем это может быть сделано более эффективно.

При анализе преобразования энергии излучения в тепло, представлено уравнение производительности концентрирующего коллектора и обсуждаются влияние коэффициента концентрации, температуры и свойства абсорбера.
*Ключевые слова*: оптический коэффициент концентрации, селективная поверхность, изображающие/неизображающие концентраторы.

**Введение.** Идеи высокотемпературного солнечного концентратора уже были известны древним грекам, которые использовали зажигательное зеркало, чтобы зажечь олимпийский огонь. В 15 веке Леонардо да Винчи предложил метод сварки меди концентрированным солнечным излучением. В 18 веке были использованы первые технические прототипы параболических тарельчатых концентраторов для выработки пара для паровозов. Однако когда нефть и природный газ стали доступны в качестве топлива для работы двигателя, интерес к высокотемпературным солнечным концентраторам по понятным причинам исчез [4]. В конце 1960 и начале 1970-х годов, когда стало ясно, что запасы ископаемого топлива ограничены, и их неравномерное распределение привело к сильной энергетической зависимости, в ряде промышленно развитых стран были начаты исследования. Сегодняшние концепции основаны на опыте, накопленном на различных научно-исследовательских установках, которые в основном были построены в 1970-х и 1980-х годов. Первые коммерческие системы были введены в эксплуатацию в начале 21-го века [1,2].

**Концентрирование излучения.** Плотность энергии $E$ измеряемый в Вт·м$^{-2}$ снижается с увеличением расстояния, так как излучаемая энергия распределяется на большую площадь поверхности. Концентрирование излучения позволяет повысить плотность лучистой энергии $E$ для его лучшего использования.

Рис.1. Схема обобщённого концентратора показывающая соответствующие площади апертур $A$ и $A'$, плотности излучения ($E$ и $E'$), и половинные углы конуса излучения (θ и θ') [2]

Обобщённый концентратор (рис.1) состоит из входной апертуры концентратора площадью $A$ (м$^2$), через которую поступает лучистая энергия и

выходной апертуры $A'$.

При отсутствии потерь в концентраторе, коэффициент концентрации $C$, определяется как [4]:

$$C = \frac{E'}{E} = \frac{A}{A'} \quad (1)$$

Простым примером концентратора является зажигательное стекло (линза). Входной апертурой является круглая площадь, описываемая диаметром линзы. Выходная апертура может быть выбрана произвольно, например, отверстие под линзой, проходя через которую излучение будет использовано, например, фотоэлементом. Идеальная линза будет концентрировать входящие параллельные лучи в одной точке, с бесконечным коэффициентом концентрации. Однако, в действительности фокальная точка имеет конечные размеры (фокальное пятно). Одним из важных причин этого является то, что лучи падающего излучения, как правило, не параллельны и описываются конусом с половинным углом θ=0,267°. Законы термодинамики устанавливают теоретический предел максимальной концентрации солнечного света. Из термодинамических соображений, для идеальных концентраторов можно показать, что

$$A \cdot \sin^2\theta = A' \cdot \sin^2\theta' \quad (2)$$

Применяя этот закон к коэффициенту концентрации [2-6]

$$C = \frac{A}{A'} = \frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta'} \quad (3)$$

Для линзы, используемого для концентрирования солнечного света, θ равен половинному углу солнца, а θ'описывается крайними лучами линзы до фокальной точки. Для данного угла раскрыва θ максимальная концентрация достигается, если $\sin^2\theta' = 1$ или $\theta' = 90°$. Таким образом, для половинного угла солнца в θ=0,267° теоретический максимум коэффициента концентрации составляет 46 200. Это означает что интенсивность света на Солнце больше, чем на Земле, в число раз, определяемое множителем $(D/R)^2$, равным $1/\sin^2\theta$ (R-радиус Солнца, D- расстояние от Земли до Солнца), или 46 200 раз [6].

При анализе концентраторов важно различать изображающие и неизображающие системы. В изображающих конструкциях, как линзы, телескопы, микроскопы и параболические зеркала все лучи, исходящие из точек объекта и попадающие в апертуру отображаются в одной точке выходной апертуры, независимо от их пути через оптические системы [4]. Как показывает приведенный выше пример линзы, присущие оптические ошибки не позволяют изображающим системам достичь максимального теоретического коэффициента концентрации. Например, простая и часто применяемая конструкция идеального 3D концентратора может достичь одной четверти теоретического предела [5].

Можно найти обходной путь, если концентрирующий прибор сделать из вещества с показателем преломления $n$, большим единицы; максимальная концентрация возрастет в $n^2$ раз до $n^2/\sin^2\theta$ [2,6].

Неизображающие системы только требуют, чтобы все лучи, падающие на входную апертуру попали на приёмник, после выходной апертуры. Не удивительно, что меньшие ограничения неизображающих систем приводят к большей гибкости конструкции концентратора. Следовательно можно достичь более высоких коэффициентов концентрации. Простой пример - усеченный конус с отражающей внутренней поверхностью, где излучение проникает через открытое основание и выходит через вершину. Очень эффективную конструкцию неизображающего концентратора представляет собой конус в форме сегмента параболы. Такой концентратор называют составным параболическим

концентратором (CPC) (см.рис.2). Такая конструкция может очень близко приблизиться к теоретическому пределу концентрации.

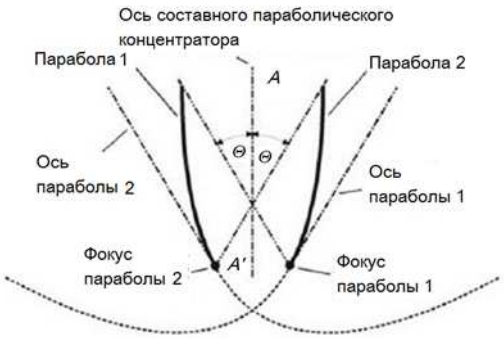



Рис.2. Составной параболический концентратор (CPC)

Для достижения высоких температур автономный CPC не очень хорошо подходит, потому что его длина должна быть намного больше диаметра его апертуры для достижения высоких коэффициентов концентрации [1].

Рис.3. Распределение Гаусса показывающее относительную плотность излучения (плотность излучения $E'$ по отношению к его максимуму) как функция расстояния до пиковой точки

На практике в качестве первичного концентратора солнечных высокотемпературных систем применяются изображающие зеркальные концентраторы. Их конструкция обычно бывает параболической формы со сплошным или сегментированным отражателем. Полученное изображение, в частности, если оно состоит из накладывающихся изображений от отдельных сегментов концентратора, часто аппроксимируется гауссовым распределением (см.рис.3). Таким образом, плотность энергии на выходе изображающего концентратора не постоянна, а меняется от пикового значения до нуля в бесконечности. Для практического применения, имеет смысл использовать только центральную часть гауссиана и отказаться от остальных. Величина отбрасываемой при этом энергии часто составляет от 2% до 10%.

**Преобразование излучения в тепло.** "Приемник" высокотемпературного солнечного концентратора предназначен для поглощения концентрированного солнечного излучения и передачи энергии рабочей жидкости. Поглощающая поверхность не может быть совершенно черной. При повышенной температуре она испускает тепловое излучение в окружающую среду, происходит конвекция. Из-за этого происходят теплопотери. Предполагая, что приемник не имеет прозрачное покрытие полезное тепло $Q$ может быть рассчитано как

$$Q = A_{Ap} \cdot [\alpha \cdot C \cdot E^S - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_A^4 - U_L \cdot (T_A - T_a)] \quad (4)$$

где $A_{Ap}$ - площадь апертуры, $\alpha$ - средняя поглощательная способность абсорбера по отношению к солнечному спектру, $C$ - коэффициент концентрации, $E^S$ -

плотность прямого солнечного излучения и $\varepsilon$- средняя излучательная способность (коэффициент черноты) абсорбера по отношению к излучения абсолютно черного тела при температуре абсорбера $T_A$, σ - постоянная Стефана- Больцмана. $U_L$- коэффициент теплопотерь за счет конвекции и теплопроводности, $T_a$- температура окружающего воздуха [1-5].

Учитывая, что для передачи тепла от абсорбера к теплоносителю требуется разница температур, для полезной энергии справедливо следующее выражение:

$$Q = A_{\mathrm{Ab}} \cdot U_I \cdot (T_A - T_F) \quad (5)$$

где $U_I$ - коэффициент теплоотдачи от абсорбера к теплоносителю, $T_F$ - средняя температура жидкого теплоносителя и $A_{Ab}$- площадь абсорбера. Заменив температуру абсорбера температурой жидкости, уравнение баланса энергии можно переписать:

$$Q = A_{\mathrm{Ap}} \cdot [F \cdot \alpha \cdot C \cdot E^S - F \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_F^4 - U_L \cdot (T_F - T_a)] \quad (6)$$

где F- коэффициент отвода тепла, такой же, как и для энергетического баланса плоского коллектора, который определяется как [1-5]

$$F = \frac{A_{\mathrm{Ab}} \cdot U_I}{A_{\mathrm{Ab}} \cdot U_I + A_{\mathrm{Ap}} \cdot U_L + A_{\mathrm{Ap}} \cdot 4 \cdot \sigma T_F^3} \quad (7)$$

Тепловой КПД приемника $\eta_т$ определяется отношением полезного тепла к приходящей на апертуру солнечной радиации.

$$\eta_{\mathrm{т}} = \frac{Q}{A_{\mathrm{Ap}} \cdot C + A_{\mathrm{Ap}} \cdot E^S} = F \cdot \alpha - \frac{F \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_F^4}{C \cdot E^S} - \frac{F \cdot U_L \cdot (T_F - T_a)}{C \cdot E^S} \quad (8)$$

На рисунке 4 приведены графики зависимости КПД от температуры жидкости $T_F$ для нескольких коэффициентов концентрации.

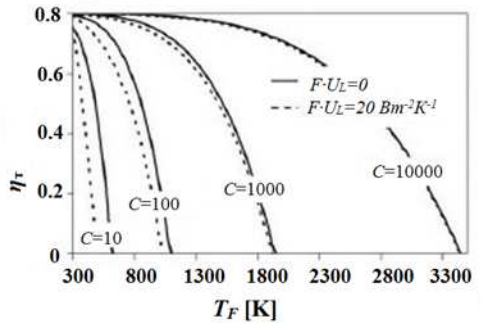



Рис.4. Тепловой КПД приемника $\eta_т$ в зависимости от температуры жидкости и коэффициента концентрации C ($F \cdot \alpha$ =0.8, $F \cdot \varepsilon$=0.8, $E^S$= 800 Вт/м$^2$

Из этого рисунка можно сделать некоторые выводы:

- Более высокие температуры жидкости приводят к снижению КПД
- Более высокие коэффициенты концентрации приводят к повышению ПД
- При высоких коэффициентах концентрации потери конвекцией и теплопроводностью имеют второстепенное значение.

В высокотемпературных солнечных концентраторах не так часто применяются прозрачные покрытия абсорберов из-за температурных нагрузок и других ограничений на покрытия. Из (9) следует, что наивысшего КПД можно достичь при α =1, ε =0 и $U_L$ = 0. Так как $U_L$ имеет второстепенное значение для высокотемпературных концентраторов, решающее значение имеет выбор α и ε. Тем не менее, выбор обеих величин ограничен законом Кирхгофа, который требует, чтобы для конкретной длины волны λ, при термическом равновесии поглощательная способность равнялась излучательной способности (коэффициенту черноты):

$$\alpha\ (\lambda) = \varepsilon\ (\lambda) \quad (9)$$

Если солнечный спектр и спектр теплового излучения достаточно отличаются, существует возможность использовать сильную зависимость характеристик α от длины волны для достижения высоких значений усредненной общей поглощательной способности α и низких значений среднего коэффициента черноты ε.

Для того, чтобы найти оптимальную спектральную характеристику для данного высокотемпературного концентратора, полезно рассчитать яркостную температуру $T$ в зависимости от длины волны λ для обоих спектров. $T(\lambda)$ определяется как

$$T(\lambda) = \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2}{E_\lambda \cdot \lambda^5}\right)} \qquad (10)$$

где $h$ - постоянная Планка, $k$ -постоянная Больцмана, $c$- скорость света в вакууме и $E_\lambda$ спектральная плотность энергии излучения [1-5]. Для излучения абсолютно черного тела яркостная температура постоянна по всем длинам волн и равна температуре черного тела.

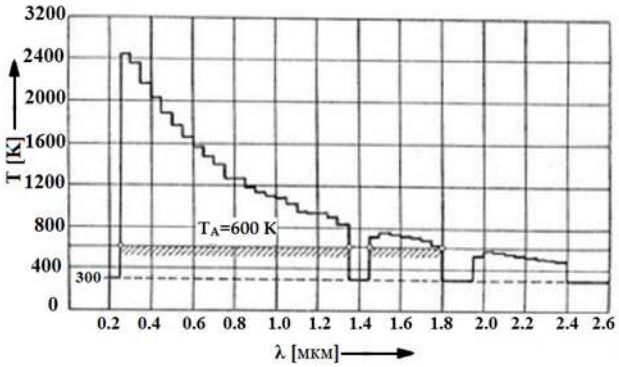



Рис.5. Распределение яркостной температуры [4]

На рисунке 5 показано распределение яркостной температуры для солнечного спектра при нормальном падении построенное в зависимости от длины волны и сравниваемое с яркостной температурой черного абсорбера $T_A$ = 600 K. В области спектра, где яркостная температура солнечного спектра находится выше яркостной температуры абсорбера, спектр излучения может равняться единице, поскольку поглощаемое солнечное излучение выше, чем потери от теплового излучения. Во всех остальных областях ситуация противоположна.

Даваемый солнечным концентратором спектр можно приближенно считать спектром излучения абсолютно черного тела с температурой 5700 К умноженный на коэффициент дилюции $f$ (коэффициент «ослабления» излучения) принимая во внимание, что плотность энергии уменьшается с увеличением расстояния от источника излучения [4]:

$$f = \frac{C}{C_{\max}} = \frac{C}{46200} = C \cdot 2.165 \cdot 10^{-5} \qquad (11)$$

Применяя концепцию яркостной температуры к этому распределению и сравнивая её с излучением черного тела, температура абсорбера приводит к ограничению длины волны $\lambda_C$, где поглощательная способность абсорбера падает от $\alpha(\lambda<\lambda_C) = 1$ до $\alpha(\lambda>\lambda_C) = 0$ для достижения наилучшей производительности.

Используя рисунок 6, КПД такого селективного абсорбера можно сравнить с КПД абсолютно черного абсорбера для различных коэффициентов концентрации и как функция температуры абсорбера. Здесь теплопотери конвекцией не учтены. Из этого рисунка можно сделать вывод, что селективные свойства абсорбера значительно увеличивают производительность приемника,

особенно в системах с низким концентрированием и при высоких температурах.

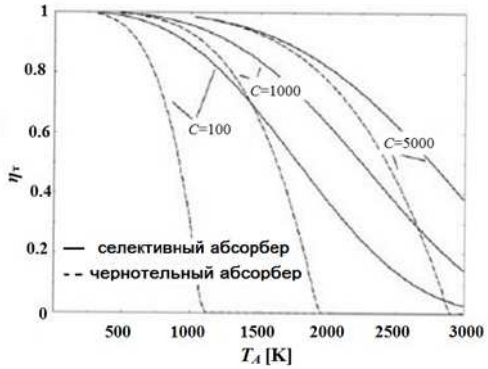



Рис.6. Тепловой КПД приемника $\eta_т$ в зависимости от температуры жидкости и коэффициента концентрации *C*, учитывающий использование селективного абсорбера и чернотельного абсорбера соответственно. Теплопотери конвекцией не учтены [4]

На практике селективные покрытия пригодны только до температуры 800 К. Кроме того устойчивость к атмосфере, содержащей кислород при высокой температуре ограничен, поэтому на сегодняшний день селективные покрытия неуместны для высокотемпературных солнечных концентраторов[1].

Наконец, влияние коэффициента отвода тепла F, который обсуждался в уравнении (7). F в идеале должен приближаться к 1. Это может быть достигнуто только, если произведение внутреннего коэффициента теплоотдачи $U_I$ и площади абсорбера в формуле (8), на порядок больше, чем произведение площади апертуры с суммой коэффициента конвективных теплопотерь $U_L$ и коэффициента потерь излучением $4 \cdot \sigma \cdot T_F^3$. Последний резко возрастает с температурой. Если площади апертуры и абсорбера одинаковы, для высокотемпературных солнечных концентраторов это налагает серьезные ограничения на F.

Одним из возможных решений является использование полого приемника. Концентрированное излучение входит через малое отверстие в теплоизолированную полость. Абсорбером является внутренние стенки полости, так что площадь апертуры и площадь абсорбера имеют разные значения. Хотя полости уменьшают проблему достижения достаточно высокого коэффициента F, они лишают возможности воспользоваться селективными абсорберами, из-за того что характеристики их приёмных апертур приближены к свойствам черного тела, независимо от конкретных свойств их внутренней поверхности.

**Литература:**

1. *Duffie, John A., and Beckman, William A.,* Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition. Wiley, New Jersey, 2006. 908 p
2. *Goswami, D. Yogi, Kreith, Frank, and Kreider, Jan F.,* Principles of Solar Engineering, 2nd edition. Taylor and Francis, Philadelphia, PA, 2000. 694 p
3. *Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota*. Solar energy : renewable energy and the environment. CRC Press, Boca Raton , 2010. 352 p
4. *Robert Pitz-Paal* - High Temperature Solar Concentrators, Solar energy conversion and photoenergy systems – Vol. I - Institute of Technical Thermodynamics, German Aerospace Center (DLR), Germany.
5. *Soteris A.* Kalogirou Solar energy engineering : processes and systems, 1st edition. Academic Press. 2009. 850 p.
6. *Роланд Уинстон* - Неизображающая оптика. В мире науки (Scientific American). Издание на русском языке. Перевод с англ. М.; «МИР» № 5 май 1991. С 44.

# ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Кобзаренко Д.Н.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru*

**Введение**. одной из важнейших научно-технических проблем народного хозяйства в энергетической отрасли является обеспечение информацией и поддержка принятия управленческих решений государственных органов в сфере планирования развития сектора энергообеспечения на основе ВИЭ. Стратегия развития энергетики для любого региона России и вовлечение ВИЭ в его энергетический баланс напрямую зависят от имеющегося потенциала, как по отдельным видам, так и по совокупности видов ВИЭ (комплексного потенциала).

Изучение неравномерностей пространственного распределения потенциала ВИЭ и выявление наиболее перспективных районов под строительство энергогенерирующих объектов в совокупности с анализом инфраструктуры в данных районах эффективно при использовании специализированных технологий геоинформационного моделирования.

Целью данной работы является разработка информационных технологий и программного обеспечения геоинформационного моделирования для решения задач оценки пространственного распределения возобновляемых энергоресурсов и определения пространственного распределения плотности геотермальных ресурсов Дагестана. Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

- разработка основы построения специализированной системы трехмерного геоинформационного моделирования (СТГМ);
- разработка системы организации данных в СТГМ;
- разработка функциональных модулей и модулей визуализации данных в СТГМ;
- разработка алгоритмического и программного обеспечения СТГМ;
- моделирование пространственного распределения плотности геотермальных ресурсов Дагестана.

Для принятия решений о возможности и целесообразности строительства энергетических объектов на конкретной площади необходимо провести комплекс научно-исследовательских работ (в том числе проведение измерений ресурсных параметров), позволяющий оценить экономический и экологический эффект от внедрения в энергетический баланс новых объектов. Покрыть всю территорию рассматриваемого региона такими работами с определенным шагом не представляется возможным. Поэтому важнейшая роль инструмента геоинформационного моделирования в развитии возобновляемой энергетики видится том, чтобы с его помощью оконтурить перспективные районы, которые могут быть приняты к подробному исследованию на предмет строительства энергетических объектов.

**Система трехмерного геоинформационного моделирования**. Существующие методы оценки потенциала ресурсов ВИЭ без применения геоинформационных технологий позволяют получать точечные результаты либо на основе данных для исследуемой площадки, либо на основе усредненных

данных для какой либо территории (города, района, республики или страны в целом). Результаты таких расчетов отражены в многочисленных справочниках. Они дают общую оценку наличия ресурсного потенциала ВИЭ. Такая оценка важна с точки зрения определения энергетических перспектив региона, и дает ответ на вопрос: «есть ли смысл развивать тот или иной сектор нетрадиционной энергетики?». Однако, ответа на вопрос: «где конкретно следует разместить энергетические установки для достижения максимального экономического и экологического эффекта?» из справочников получить не возможно.

Для принятия решений о возможности и целесообразности строительства энергетических объектов на конкретной площади необходимо провести комплекс научно-исследовательских работ (в том числе проведение измерений ресурсных параметров), позволяющий оценить экономический и экологический эффект от внедрения в энергетический баланс новых объектов. Покрыть всю территорию рассматриваемого региона такими работами с определенным шагом не представляется возможным. Поэтому важнейшая роль инструмента геоинформационного моделирования в развитии возобновляемой энергетики видится том, чтобы с его помощью оконтурить перспективные районы, которые могут быть приняты к подробному исследованию на предмет строительства энергетических объектов.

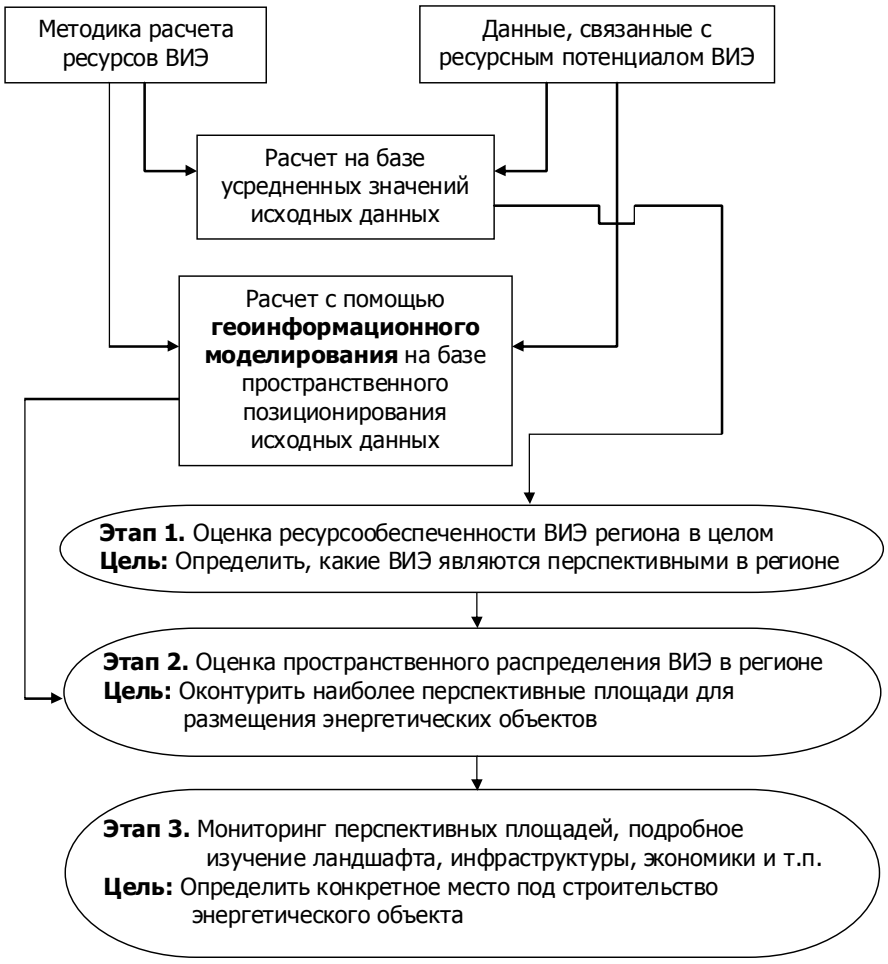



Рис.1. Роль ГИС в принятии решения о строительстве энергетических объектов на основе ВИЭ

Работы по обоснованию и принятию решения о строительстве энергетических объектов ВИЭ на территории регионов России можно разделить на три этапа (рис.1): 1 – средняя оценка ресурсобеспеченности региона, 2 –

выделение перспективных площадей, 3 – выбор конкретного участка (в рамках перспективных площадей) с учетом требований к энергетическому объекту. Применение геоинформационных технологий максимально необходимо и эффективно на втором этапе.

Предлагаемые технологии геоинформационного моделирования позволяют решать задачи по оценке всех видов возобновляемых энергоресурсов региона. Но упор сделан на моделирование пространственного распределения геотермальных ресурсов. Здесь трехмерное моделирование в большей мере позволяет получить адекватные результаты, нежели при моделировании других ВИЭ.

Решение задач по расчету пространственного распределения потенциала возобновляемых энергоресурсов можно описать следующим образом. Имеется объект моделирования (территория), который задается границами и уровнем генерализации или разрешением модели (точность представления информации). Имеется методика расчета (математическая модель) задачи, которая, в свою очередь, может предполагать разбиение задачи на подзадачи. Расчетная модель имеет свои параметры, варьируя которыми можно получать разный результат. Решение задачи предполагает набор исходных данных. Естественно, все исходные данные имеют пространственное позиционирование.

Возьмем модель расчета плотности потенциальных геотермальных ресурсов. Согласно [1] потенциальные геотермальные ресурсы характеризуют тепловой потенциал толщи пород на прогнозируемую глубину бурения. Плотность распределения ресурсов определяется, исходя из предпосылки, что массив можно охладить до температуры окружающей среды:

$$Q^P = kC_V(H_{ПР} - h_{НС})(t_{ИЗ} - t_{ОС}), \quad (1)$$

где $Q^P$ – плотность распределения ресурсов, т у.т./м$^2$; $k$ – коэффициент пересчета, т у.т./Дж; $C_V$ – объемная теплоемкость пород, Дж/(м$^3\cdot$ºС); $H_{ПР}$ – прогнозная глубина бурения, м; $h_{НС}$ – мощность нейтрального слоя, м; $t_{ОС}$ – температура окружающей среды, ºС; $t_{ИЗ}$ – средняя температура массива, ºС; $t_{ИЗ} = 0{,}5(t_{ПР} + t_{НС})$; $t_{ПР} = G(H_{ПР} - h_{НС}) + t_{НС}$; $t_{НС}$ – температура нейтрального слоя, ºС; $t_{ПР}$ – температура пород на прогнозируемой глубине, ºС; $G$ – геотермический градиент, ºС/м.

Из приведенной модели следует, что для полноценного выполнения расчета плотности распределения потенциальных геотермальных ресурсов необходимо вначале построить геологическую модель, чтобы рассчитать объемную теплоемкость пород, а затем и модель распределения температурного поля для расчета геотермического градиента.

При этом анализ показывает, что разрабатываемые геоинформационные технологии должны отвечать трем основным требованиям. Первое требование – обеспечение единого информационного поля для определенного объекта моделирования. Оно заключается в создании собственной системы координат объекта моделирования (с привязкой к географическим координатам) и в создании собственных банков данных. Второе требование – унифицированные структуры данных, позволяющие хранить разнородную информацию и оперировать в рамках любого объекта моделирования для решения любой пространственной задачи. Третье требование – единые унифицированные правила функционирования системы по управлению объектом моделирования, библиотеками данных, визуализацией и операционными модулями, решающими задачи.

Опираясь на вышеизложенное, можно предложить следующую

концепцию построения специализированной ГИС в виде системы трехмерного геоинформационного моделирования [2] (рис.2). Обозначения на рис.2: ГД – генераторы данных, БРД – библиотека расчетных данных, БВД – библиотека визуализируемых данных, ГИД – генераторы-импортеры данных, ГРД – генераторы расчетных данных, ГВД – генераторы визуализируемых данных, ПР – проект. На схеме разными цветами показана последовательность решения задачи в рамках геоинформационного моделирования, начиная от выбора объекта моделирования и заканчивая визуализацией результата.

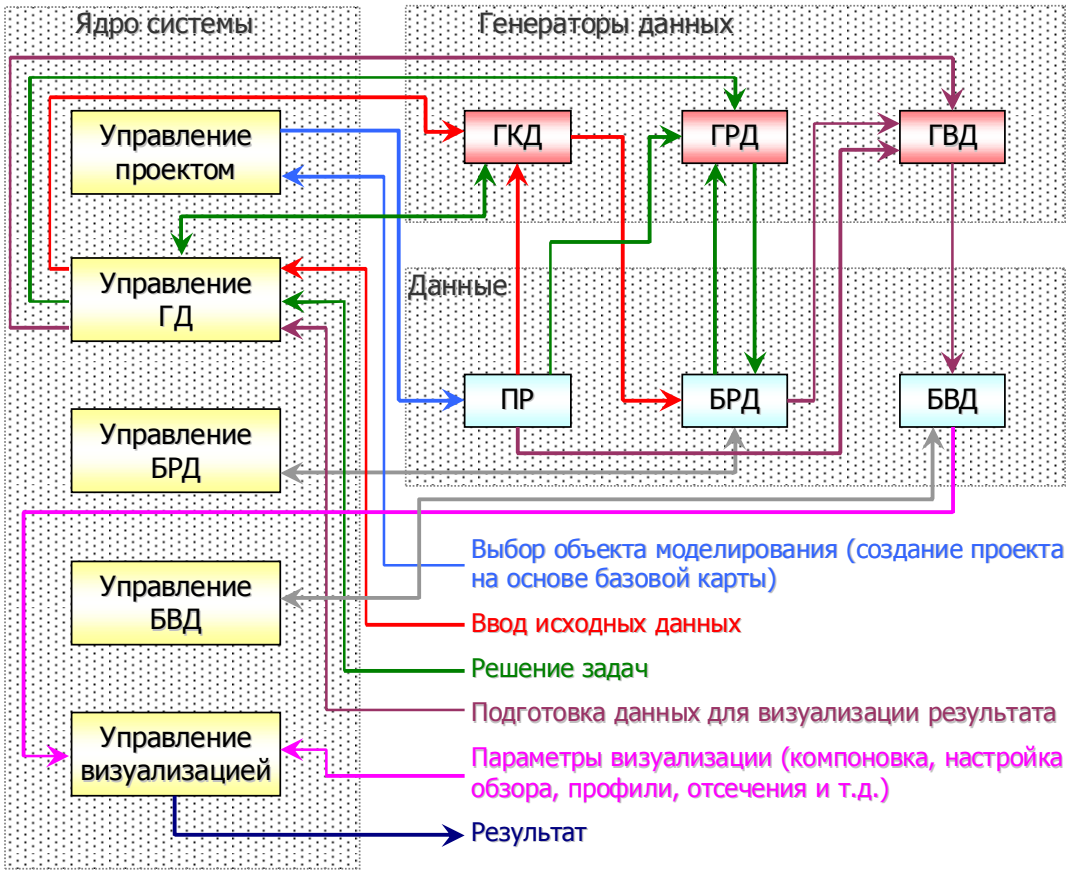



Рис.2. Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования

**Программное обеспечение СТГМ**. В основную оболочку ПО встроены базовые функции управления проектом (создание, некоторое редактирование, удаление), функции визуализации и функции работы с библиотеками данных и генераторов. Наличие собственного векторизатора не предусматривается, поскольку по этой части уже имеется хороший задел у отечественных и зарубежных ГИС. В единицу времени система работает с одним проектом. Проект может быть либо загружен из имеющегося файла, либо создан с нуля. Для создания проекта требуется задать: 1) идентификатор проекта, 2) заголовок проекта, 3) название базовой карты и ее масштаб, 4) контур модели, 5) опорные узлы привязки к географическим координатам. Формирование собственной системы координат проекта и его границ происходит, исходя из заданного контура модели и с учетом того, что единица в координатах проекта соответствует 0,1мм на базовой карте.

*Функциональная часть ПО СТГМ* состоит из четырех разделов. За разделами функциональной части СТГМ можно условно закрепить следующие названия: «Геометрия», «Структуры данных», «Визуализация» и «Обработка

данных». Раздел «Геометрия» сосредоточен в одном программном модуле. Он объединяет глобально объявленные геометрические типы данных, такие как 2D/3D-узлы, треугольники, векторы, матрицы, массивы и т.д. Раздел «Структуры данных» также сосредоточен в одном программном модуле. Здесь разработан базовый класс-родитель, имеющий общие свойства, методы и события для всех структур данных СТГМ. Потомками базового класса являются классы, реализованные под каждую из имеющихся структур расчетных и визуализируемых данных, а также класс управления структурой проекта. Раздел «Визуализация» представлен одним программным модулем, содержащим объектную структуру визуализируемой модели. Здесь все возможности визуализации сосредоточены в двух программных классах: первый – для объемного представления всей модели, второй – для плоского представления профиля модели. В обоих классах полностью реализованы функции, связанные с подключением и инициализацией графической библиотеки *OpenGL*. Раздел «Обработка данных» состоит из нескольких программных модулей. Он представлен набором классов, оформленных в виде невизуальных компонентов среды *Delphi*. Эти компоненты выполняют определенные задачи системы, такие как: построение триангуляционной сети методом Делоне, построение регулярной сети с помощью двумерной интерполяции, обеспечение поточных вычислений на основе введенной математической формулы и т.п. Они используются преимущественно при разработке генераторов расчетных данных.

*Интерфейсная часть основного приложения ПО СТГМ* базируется на многооконном *MDI*-интерфейсе. Он выполнен таким образом, что в единицу времени пользователь работает с одним распахнутым во весь экран окном. Каждое окно представляет собой отдельный раздел работы с проектом. Предусмотрено шесть разделов: «параметры проекта», «библиотека расчетных данных», «библиотека визуализируемых данных», «библиотека генераторов», «визуализация», «менеджер сечений».

**Результаты моделирования**. Расчет *потенциальных геотермальных ресурсов* выполнен по формуле (1). Для расчета необходимо наличие в формате непрерывной регулярной сети следующих данных: средняя объемная теплоемкость массива пород, температура на прогнозируемой глубине бурения, температура нейтрального слоя и температура окружающей среды. Температура на прогнозируемой глубине берется из трехмерной модели распределения температурного поля. Расчет потенциальных геотермальных ресурсов выполнен для прогнозных глубин бурения 3000м и 5000м. Все регулярные сети, участвующие в расчете, созданы с уровнем генерализации по $XY$ – 250м.

На рис.3 представлена карта распределения потенциальных геотермальных ресурсов до прогнозной глубины бурения 5000м. Согласно ей области красного цвета являются наиболее перспективными с точки зрения общего потенциала геотермальной энергии. Примерами являются районы: окрестности населенного пункта Буйнакск, северо-западная часть Дагестана к юго-западу от населенного пункта Южно-Сухокумск, район к северо-западу от населенного пункта Кизляр. Сравнить полученные результаты с какими-либо аналогичными работами не представляется возможным, поскольку такого рода карты для Дагестана по другим методикам расчета ранее не строились. Что касается общероссийских карт распределения потенциальных геотермальных ресурсов, то согласно карте технического потенциала геотермальных энергоресурсов России [3] Дагестан обладает потенциалом более 20млн т у.т., что подтверждается картой ресурсов до 5000м.

Расчет *технически доступных геотермальных ресурсов* выполнен для режимов горячего водоснабжения и отопления [1]. Все регулярные сети, участвующие в расчете, созданы с уровнем генерализации по *XY* – 250м. Для режима горячего водоснабжения в расчете используются геоизотермы 30 и 130°С, которые задают глубину верхней и нижней границ ресурсного интервала соответственно. Для режима отопления расчет аналогичный, за исключением того, что вместо температуры извлечения 80°С задается температура 100°С, а для задания верхней и нижней границ ресурсного интервала используются геоизотермы 50 и 150°С.

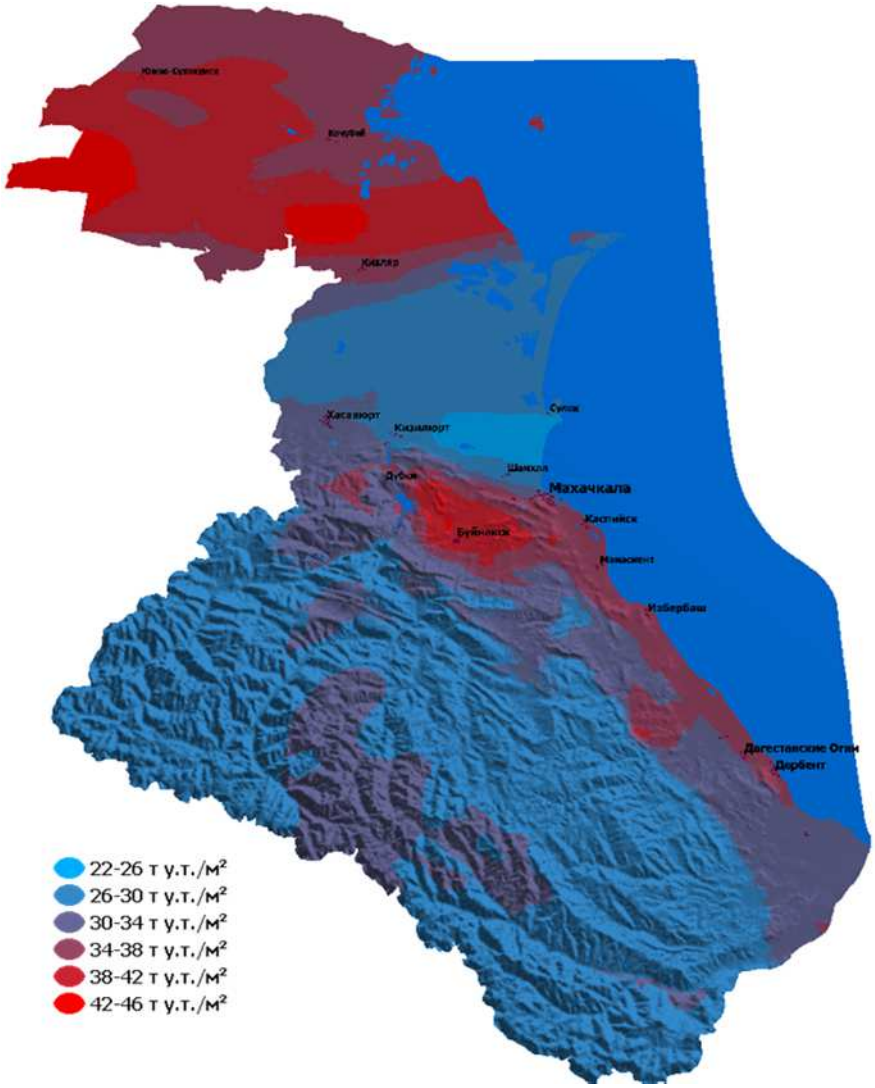



Рис.3. Потенциальные геотермальные ресурсы (прогнозная глубина бурения – 5000м)

На рис.4 представлена карта распределения технически доступных геотермальных ресурсов для отопления. На ней выявлены области, которые являются наиболее перспективными с точки зрения технического потенциала использования геотермальной энергии в коммунальном секторе. Для горячего водоснабжения перспективными являются районы Центрального Дагестана, окрестности населенных пунктов: Кизилюрт, Шамхал, Сулак, Хасавюрт и Кизляр. Для отопления перспективными являются: вся зона Предгорного Дагестана с севера на юг и северная часть республики, начиная с населенного пункта Кизляр.

Согласно общероссийской карте распределения технически доступных геотермальных ресурсов [1], горная часть Дагестана обладает потенциалом

технически доступных геотермальных ресурсов для режима горячего водоснабжения 4-6 т у.т./м$^2$ и для отопления 2-4 т у.т./м$^2$. Предгорные, центральные и северные районы республики на тех же картах отмечены потенциалом выше 6 т у.т./м$^2$ для горячего водоснабжения и 4-6 т у.т./м$^2$ для отопления. Сопоставив результаты полученных расчетов с оценкой технически доступных ресурсов Дагестана, нетрудно увидеть приблизительно двукратную разницу. Причиной этого, по-видимому, является использование совершенно разных масштабов для исследования: всероссийского и регионального. Но главным в проведенных исследованиях является не столько количественная оценка геотермальных ресурсов, сколько выявление наиболее перспективных зон.

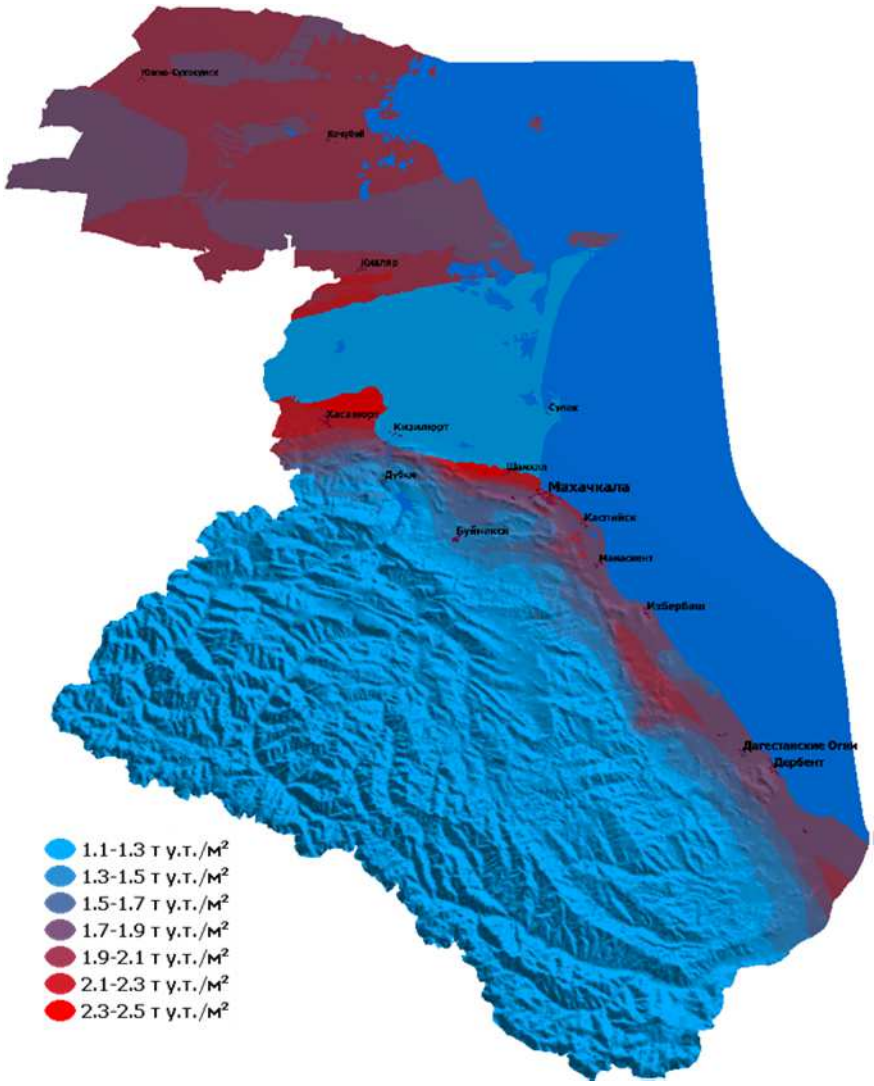



Рис.4. Технически доступные геотермальные ресурсы для режима 90/40°С (отопление)

**Литература:**

1. *Богуславский Э.В.* Тепловые ресурсы недр России // Теплоэнергетика №6, 2004, С.25-32.
2. *Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Гаджимурадов Р.Н.* Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии, №11, 2009. С.32-36.
3. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Под ред. П.П. Безруких. СПб.: Наука, 2002. 314с.

# СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХЛАДАГЕНТОВ ПРОПАНОВОГО РЯДА

Дворянчиков В.И.

*ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: vasiliy_dv01@ mail.ru*

Проведен анализ закономерностей термодинамических свойств хладагентов пропанового ряда в широкой области параметров состояния, включая критическую область.

Появление новых рабочих веществ потребовало исследований их теплофизических свойств и создания банка данных о свойствах хладагентов. Эти исследования носят как экспериментальный, так и расчетный характер [1–4].

Анализ закономерностей термодинамических свойств хладагентов и возможных альтернативных смесевых вариантов – важная практическая задача. Экологически безопасные фреоны нового поколения метанового, этанового и пропанового рядов, также их смеси (табл.1) рассматриваются как наиболее перспективные заменители традиционных хлорсодержащих фреонов [5].

Цель настоящей работы – проведение анализа закономерностей термодинамических свойств хладагентов пропанового ряда.

На основе данных об энтропии фреона HFC 227ea [6] рассчитаны значения изохорной теплоемкости и вдоль линии фазового равновесия в интервале температур 245.15–375.04 K и плотностей 5.17–589.99 кг/м$^3$ по уравнению изохоры в системе координат T–S.

$S_2 - S_1 = C_V \ln(T_2/T_1)$.

Таблица 1. Озонобезопасные хладагенты пропанового ряда

| Хладагенты | Формула | $t_{кип}$, °C | $t_{кр}$, K | $P_{кр}$, МПа | $\rho_{кр}$, кг/м$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| R 218 | $CF_3–CF_2–CF_3$ | –36.1 | 345.05 | 2.677 | 628.0 |
| R 227ea | $CF_3–CHF–CHF_3$ | –17.3 | 375.04 | 2.930 | 589.99 |
| R 227ca | $CF_3–CF_2–CHF_3$ | –16.0 | - | - | - |
| R236ea | $CF_3–CHF–CHF_2$ | 6.5 | 412.4 | 3.412 | - |
| R236fa | $CF_3–CH_2–CF_3$ | –0.7 | - | - | - |
| R245ca | $CF_3–CF_2–CF$ | 25.0 | - | - | - |
| R290 | $C_3H_8$ | –41.6 | 369.85 | 4.248 | 227 ± 2 |
| R1270 | $C_3H_6$ | –47.73 | 365.05 | 4.640 | 230.0 |
| Ethyl methyl ether | $C_3H_8O$ | 7.45 | 437.8 | 4.430 | 272.0 |
| Trimethyl amine | $C_3H_9N$ | 3.0 | 432.79 | 4.087 | 232.72 |

Рассчитанные значения изохорной теплоемкости $C''_V$ $C'_V$ вдоль линии фазового равновесия (табл.2) представлены на (рис.1). Линия фазового равновесия фреона HFC 227ea представлена на (рис.2).

Критические параметры системы $T_к$ = 375.04 K, $\rho_к$ = 589.99 кг/м$^3$.

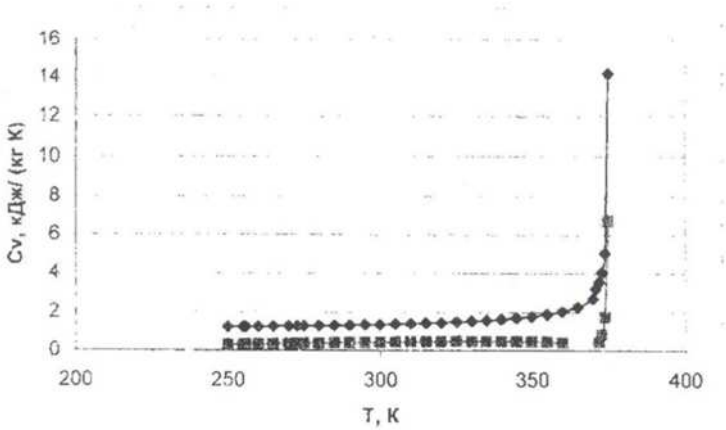



Рис.1. Рассчитанные значения теплоемкости фреона HFC227ea на линии фазового равновесия

Таблица 2. Термодинамические свойства фреона HFC 227ea

| T, K | $\rho' \times 10^{-3}$, кг/м$^3$ | $\rho'' \times 10^{-3}$, кг/м$^3$ | $C'_V$,кДж/(кг· К) | $C''_V$,кДж/(кг· К) |
|---|---|---|---|---|
| 245.15 | 1.5842 | 0.0051675 | 1.210 | 0.2669 |
| 250.15 | 1.5677 | 0.0064448 | 1.219 | 0.2893 |
| 255.15 | 1.5508 | 0.0079646 | 1.228 | 0.3093 |
| 256.728 | 1.5454 | 0.0084998 | 1.236 | 0.3229 |
| 260.15 | 1.5336 | 0.0097594 | 1.241 | 0.3308 |
| 265.15 | 1.5158 | 0.0118630 | 1.249 | 0.3431 |
| 270.15 | 1.4977 | 0.0143120 | 1.261 | 0.3398 |
| 273.15 | 1.4866 | 0.0159650 | 1.271 | 0.3695 |
| 275.15 | 1.4791 | 0.0171480 | 1.278 | 0.3743 |
| 280.15 | 1.4601 | 0.0204110 | 1.288 | 0.3843 |
| 285.15 | 1.4405 | 0.0241510 | 1.303 | 0.3969 |
| 290.15 | 1.4204 | 0.0284210 | 1.318 | 0.4091 |
| 295.15 | 1.3997 | 0.0332800 | 1.336 | 0.4203 |
| 300.15 | 1.3785 | 0.0387970 | 1.355 | 0.4317 |
| 305.15 | 1.3566 | 0.0450500 | 1.376 | 0.4419 |
| 310.15 | 1.3349 | 0.0521060 | 1.399 | 0.4510 |
| 315.15 | 1.3102 | 0.0601560 | 1.426 | 0.4596 |
| 320.15 | 1.2857 | 0.0692520 | 1.455 | 0.4670 |
| 325.15 | 1.2600 | 0.0795870 | 1.488 | 0.4737 |
| 330.15 | 1.2329 | 0.0913680 | 1.528 | 0.4784 |
| 335.15 | 1.2043 | 0.1048600 | 1.572 | 0.4810 |
| 340.15 | 1.1737 | 0.1204400 | 1.626 | 0.4815 |
| 345.15 | 1.1405 | 0.1385900 | 1.692 | 0.4770 |
| 350.15 | 1.1041 | 0.1600600 | 1.774 | 0.4663 |
| 355.15 | 1.0632 | 0.1860000 | 1.883 | 0.4458 |
| 360.15 | 1.0155 | 0.2184000 | 2.035 | 0.4049 |
| 365.15 | 0.9566 | 0.2613000 | 2.269 | – |
| 370.15 | 0.8739 | 0.3258600 | 2.714 | – |
| 371.15 | 0.8512 | 0.3258600 | 3.231 | – |
| 372.15 | 0.8243 | 0.3663200 | 3.555 | 0.4276 |
| 373.15 | 0.7905 | 0.3945300 | 4.058 | 0.8279 |
| 374.15 | 0.7417 | 0.4360300 | 5.039 | 1.7346 |
| 375.04 | 0.58999 | 0.5899900 | 14.215 | 6.6801 |

Интерес к изучению калорических и объемных свойств пропана не ослабевает [7–11]. При этом используют различные методы измерений, которые дают при сравнении удовлетворительные результаты. Особый интерес представляют смеси пропана с изобутаном, пропиленом (в качестве

теплоносителя в тепловых насосах) и другими хладагентами, R402A, R402B, R403A, R403B (в качестве хладагента в холодильных агрегатах).

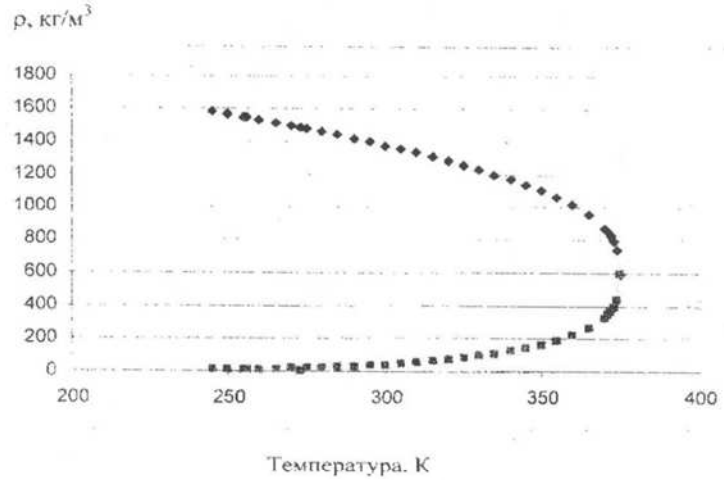



Рис.2. Линия фазового равновесия фреона HFC227ea [6]

Природные хладагенты должны придти на смену R404A, R134a, R407C и др., снизить заправку хладагентом и обеспечить экономию электроэнергии.

Существующие экспериментальные данные по термодинамическим и свойствам переноса смесевых хладагентов ограничены и часто противоречивы [5].

Измерения изохорной теплоемкости $C_V$ пропана были проведены М.А. Анисимовым и др. на кафедре физики МИНХ и ГП им. Губкина. Чистота пропана составляла 99.98%. Измерения теплоемкости проведены на шести изохорах: 0.159, 0.224, 0.229, 0.306, 0.436, 0.531 г/см$^3$ в интервале температур 80–374 К. Максимальная относительная погрешность полученных значений теплоемкости составила 0.48% вдали и 1.5% в окрестности точки перехода через кривую сосуществования. При плотности ρ = 0.159 г/см$^3$ максимальная относительная погрешность значений теплоемкости возрастает до 0.68%, а в окрестности точки перехода – до 2% [8]. В работе [9] ошибка определения теплоемкости составила ±3.2% на линии фазового равновесия и ±4.8% в критической области. Измерения теплоемкости проведены в интервале температур 270–425 К. На (рис. 3) дано сравнение результатов зависимости плотности от температуры пропана в приведенных координатах [8]. Результаты сравнения измерений изохорной теплоемкости приведены в (табл.3).

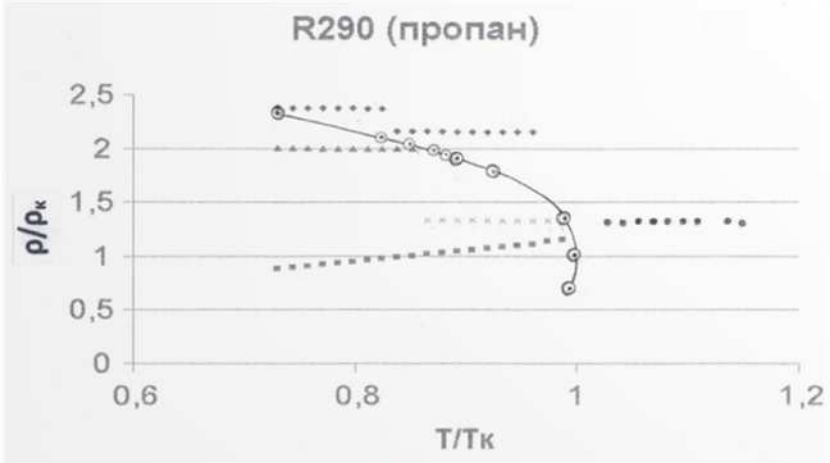



Рис.3. Линия фазового равновесия R290 (пропан) в приведенных координатах:
⊙ - результаты работы [8]; •; x ; ■ ; ◆; ▲ - результаты работы [9]

Таблица 3. Термодинамические и калорические свойства пропана (ρ, кг/м$^3$)

| Т, К | Р, МПа | ρ' [9] | ρ'' [9] | ρ' [8] | ρ'' [8] | $C_V$, Дж/(г ·К) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | [9] | [8] |
| 270.15 | 4.427 | 539.9 | | | | 1.627 | |
| 270.67 | – | – | | 531 | | - | 1.645 |
| 275.15 | 7.953 | 539.6 | | | | 1.616 | |
| 280.15 | 11.458 | 539.3 | | | | 1.617 | |
| 285.15 | 14.939 | 539.0 | | | | 1.647 | |
| 290.15 | 18.398 | 538.7 | | | | 1.666 | |
| 295.15 | 21.836 | 538.4 | 454.8 | | | 1.691 | |
| 300.15 | 25.251 | 538.1 | 454.6 | | | 1.692 | |
| 305.15 | 28.640 | 537.8 | - | 436 | | 1.686 | |
| 310.15 | 6.561 | 490.3 | 454.3 | | | 1.691 | |
| 315.15 | 9.049 | 490.1 | 454.1 | | | 1.706 | |
| 320.15 | 11.532 | 489.8 | 453.9 | 306 | | 1.727 | |
| 325.15 | 14.008 | 489.6 | 453.7 | 229 | 224 | 1.732 | |
| 330.15 | 16.475 | 489.3 | 453.5 | | 159 | 1.738 | |
| 330.59 | – | – | - | | | - | 1.828 |
| 335.15 | 18.934 | 489.1 | - | | | 1.744 | |
| 340.15 | 21.386 | 488.9 | | | | 1.751 | |
| 345.15 | 23.827 | 488.6 | | | | 1.731 | |
| 350.15 | 26.253 | 488.4 | | | | 1.758 | |
| 355.15 | 28.668 | 488.2 | | | | 1.756 | |
| 366.66 | – | – | | | | - | 2.192 |
| 369.86 | – | – | | | | - | 3.323 |
| $T_{кр}$= | $P_{кр}$= | $\rho_{кр}$= 227 | | | | | |
| 369.95 | 4.200 | ± 2 | | | | - | 4.052 |
| 369.88 | – | – | | | | - | 2.903 |
| 368.28 | – | – | | | | 2.236 | |
| 375.15 | 5.095 | 301.1 | | | | 2.110 | |
| 380.15 | 5.744 | 301.0 | | | | 2.032 | |
| 385.15 | 6.404 | 300.9 | | | | 1.952 | |
| 390.15 | 7.072 | 300.8 | | | | 1.924 | |
| 395.15 | 7.746 | 300.7 | | | | 1.824 | |
| 400.15 | 8.425 | 300.6 | | | | 1.788 | |
| 405.15 | 9.109 | 300.5 | | | | 1.814 | |
| 410.15 | 9.795 | 300.4 | | | | 1.810 | |
| 420.15 | 11.176 | 300.2 | | | | 1.854 | |
| 425.15 | 11.869 | 300.1 | | | | | |

Исследования теплофизических свойств хладагентов и возможных альтернативных их смесевых вариантов важны при подборе теплоносителя, построения диаграммы и расчета параметров цикла, оптимизации функционирования холодильной машины или теплового насоса. Данные об изохорной теплоемкости фреонов могут быть использованы для оптимизации при эксплуатации тепловых насосов, имеющих в качестве теплоносителей хладагенты во вторичном контуре отбора тепла при использовании геотермальных источников [12].

**Литература:**

1. *Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.* // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. Приложение к спецвыпуску 2002. № 10. С.54.

2. *Magee J.W.* // Intern. Thermophysics. 2000. V. 21. №1. P. 151.
3. *Багинский А.В., Станкус С.В., Кошелева А.С.* // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 4. С.647.
4. *Дворянчиков В.И., Рабаданов Г.А.* // Журн. физ. химии. 2010. Т. 84. № С.1009.
5. *Станкус С.В., Багинский А.В., Верба О.И. и др.* / Тез. докл. XII Российской конф. по теплофизическим свойствам веществ. 2008. С.41.
6. *Chen Z.S., Hu P., Cheng W.L.* Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties. Boulder. Colorado. USA. 2003. P. 398.
7. *Амирханов Х.И., Левина Л.Н., Закарьяев З.Р.* // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Издво стандартов. 1982. С.24.
8. *Анисимов М.А., Бекетов В.Г., Воронов В.П. и др.* // Там же. 1982. С.48.
9. *Kitajima H., Kagawa N., Tsuruno S., Magee J.W., Watanabe K.* Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties. Boulder. Colorado. USA, 2003. P.567.
10. *Lim J.S., Ho Q.N., Park J.Y., Lee B.G.* // Ibid. P.3597.
11. *Higashi Y.* // Ibid. P.467.
12. *Дворянчиков В.И.* // Тепловое поле Земли и методы его изучения. Сб. науч. тр. РГГРУ, 2008. С.79.

# ВАРИАЦИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ВОД ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ

Магомедов Ш.А.

*ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

В докладе приведены результаты экспериментальных данных по изучению изотопного состава вод различных геотермальных месторождений Восточного Кавказа.

Для оценки формирования и генезиса геотермальных вод в настоящее время широко используются изотопные методы и, в частности, определение содержания изотопов водорода и кислорода. Кислород имеет три стабильных изотопа $^{16}O$=99,63%, $^{17}O$=0,0375% и $^{18}O$=0,1995%, а водород два –H=99,9852% и D=0,0148%.

Наибольшую роль в геохимических исследованиях природных вод играют отношения стабильных изотопов водорода (D/H=1/6700) и кислорода ($^{18}O/^{16}O$=1/500). Стабильные изотопы легких элементов (H, O, C и S) характеризуются большими величинами относительных изотопных вариаций, поэтому нашли широкое применение в различных областях геохимических исследований. Широкий диапазон изменений изотопных вариаций водорода ($\delta D$=0÷-150‰) и кислорода ($\delta^{18}O$=-20÷+22‰) и высокая степень точности измерения на масс-спектрометрах позволяет с высокой точностью определять величины естественных изотопных вариаций водорода и кислорода.

Изотопный состав кислорода и водорода в образце выражается с помощью величин $\delta^{18}O$ и $\delta D$, характеризующих разность отношений $^{18}O/^{16}O$ и D/H в образце и в стандарте SMOW. Эти величины измеряются в промилле:

$$\delta^{18}O=\{ [ (^{18}O/^{16}O)_{обр}-(^{18}O/^{16}O)_{ст}]/(^{18}O/^{16}O)_{ст}\}*10^3 \quad (1)$$

$$\delta D= \{[(Д/H)_{обр}-(Д/H)_{ст}]/(Д/H)_{ст}\}*10^3$$

Таким образом, положительные значения $\delta^{18}O$ и $\delta D$ свидетельствуют об обогащении образца $^{18}O$ и D относительно стандарта SMOW, тогда как отрицательные значения этих величин – об обеднении образца этими изотопами по сравнению со стандартом [1-4].

В районах развития современных гидротермальных систем поверхностная вода, проникшая на большую глубину, может потерять кислородную «метку» за счет взаимодействия с нагретыми до высокой температуры магматическими породами, но полностью сохранить при этом изотопное отношение D/H. Эта консервативность изотопии водорода, проявляющаяся при взаимодействии воды с вмещающими породами, и позволяет устанавливать её генетическую принадлежность. Общеизвестно, что минералы пород содержат мало водорода, кроме того, отношения вода/порода в геотермальных системах редко бывают так малы, чтобы водород минералов пород мог значительно повлиять на изотопию водорода воды. По этой причине водородного сдвига метеорной воды в гидротермальных растворах практически нет.

Величина изотопного сдвига по кислороду зависит от начальных концентраций его изотопов в воде и породе, минералогии пород, температуры, отношения вода/порода и времени контакта. Наибольший сдвиг отмечается для воды из систем, содержащих карбонатные породы, начальные значения $\delta^{18}O$ для

которых лежат в пределах +20÷ +30‰. Этот сдвиг достигает максимальных значений при малых отношениях вода/порода, высокой температуре и продолжительном времени контакта.

Фракционирование изотопов происходит в результате различного рода химических реакций и физических процессов:

1. Реакций изотопного обмена, приводящих к перераспределению изотопов некоторого элемента между различными молекулами, содержащими этот элемент. Например, реакции изотопного обмена кислорода между флюидами и карбонатными минералами по типу реакции $CaCO_3 + H_2{}^{16}O \leftrightarrow CaC^{16}O_3 + H_2{}^{18}O$. В случае дегидратации глинистых минералов, выделяющиеся подземные воды тоже обогащаются тяжелым изотопом $^{18}O$.
2. Однонаправленных реакций, скорость которых зависит от изотопного состава участвующих в реакции веществ.
3. Физических процессов, в которых разница в массах играет роль, например, испарения и конденсации, плавления и кристаллизации, адсорбции и десорбции, а также диффузии ионов или молекул, обусловленной наличием градиентов концентрации и температуры.

При испарении воды происходит преимущественное поступление $^{16}O$ и H в фазу пара, а $^{18}O$ и D концентрируются в жидкой фазе. Коэффициент фракционирования выражается через $\alpha=R_в /R_п$ ,(где $R_в$ и $R_п$ – изотопные отношения $^{18}O/^{16}O$ и D/H для воды и пара соответственно) и зависит от температуры. Так при испарении воды в равновесных условиях при 25°C значения коэффициентов разделения изотопов равны [1]:

$\alpha_{18}=(^{18}O/^{16}O)_в/(^{18}O/^{16}O)_п=1,0092$

$\alpha_д=(D/H)_в/(D/H)_п=1,074$

**Применяя изотопные методы, успешно решают вопросы, связанные с выяснением генезиса термальной воды и возобновлением её запасов. Выявляют области питания подземных горизонтов, определяют температуру флюидов в глубинных резервуарах. Кроме того, с помощью изотопных методов контролируют процессы фазового разделения флюидов при подземном кипении и решают много других задач, связанных с поиском, разведкой и эксплуатацией высокотемпературных месторождений термальных вод.**

Подземные термальные, минеральные и промышленные воды представляют собой сложные многокомпонентные физико-химические системы, включающие минеральные и органические вещества, газы, микроорганизмы формирующиеся в определенных структурно-тектонических, литолого - стратиграфических и термодинамических условиях. Воды эти сформированы преимущественно за счет поверхностных (атмосферных и морских) и глубинных (магматических, вулканогенных и метаморфических) растворов, претерпевших различные преобразования в земной коре в периоды геологической истории.

Если нанести экспериментальные данные на график в системе координат δD и $\delta^{18}O$, то все точки ложатся ниже и справа линии Крейга, которая характеризуется уравнением $\delta D=8\delta^{18}O + 10$. Точки, соответствующие водам миоценовых и мезозойских отложений смещены вправо и ниже, что говорит об изменении исходного изотопного состава воды за длительное геологическое время при высоких PT условиях в пласте. Наблюдается значительное смещение вправо изотопного состава по кислороду $^{18}O$. Вода обогащается тяжелым изотопом кислорода $^{18}O$ за счет изотопно-обменных процессов с растворенными и окружающими породами и минералами, которые богаты $^{18}O$.

На рис.1 приведены наиболее важные экспериментальные результаты по определению изотопного состава вод различного генезиса Восточного Предкавказья. Экспериментальные точки ложатся ниже линии Крейга (I) , которая характеризуется уравнением $\delta D=8\delta^{18}O+10$. Точки, соответствующие водам миоценовых и мезозойских отложений смещены вправо и ниже, что говорит об изменении исходного изотопного состава воды за длительное геологическое время при высоких PT условиях в пласте. Наблюдается значительное смещение вправо изотопного состава по кислороду $^{18}O$. Вода обогощается тяжелым изотопом кислорода $^{18}O$ за счет изотопно-обменных процессов с растворенными и окружающими породами и минералами, которые богаты $^{18}O$ .

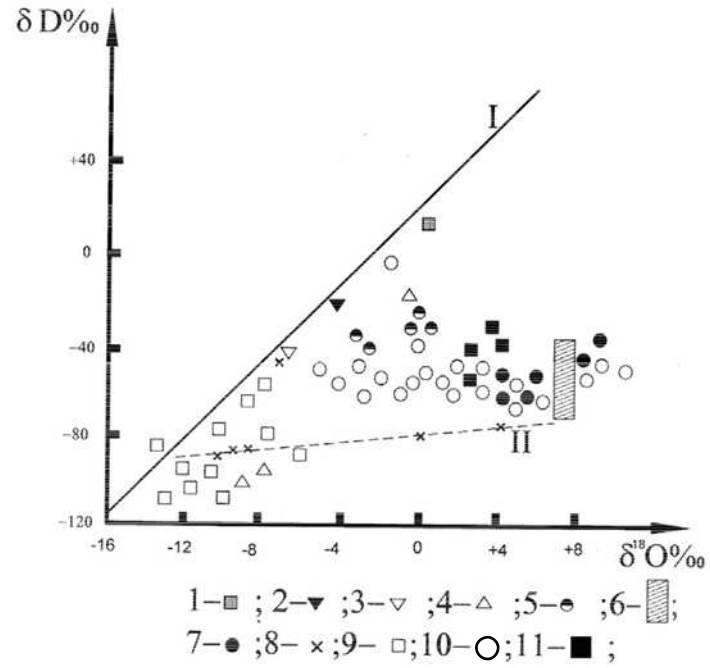



Рис.1. Вариации изотопного состава водорода и кислорода в природных водах Восточного Предкавказья (Воды: 1 – океанические, 2 – Каспийского и Черного морей, 3 – дождевые, 4 – речные, 5 – соляных озер, 6 – ювенильные, 7 – юрских рассолов, 8 – миоценовых рассолов, 9 – плиоцен-четвертичных отложений и источников зоны активного водообмена, 10 – меловые и 11 – пермо-триасовые рассолы)

Усредненные значения вариаций изотопных составов водорода и кислорода геотермальных вод для отложений различных геологических периодов приведены в таблице 2. Воды миоценового комплекса слабоминерализованные (от 3-10 до 30 г/л) термальные воды с температурой 65-120°С. Химический и изотопный состав этих вод свидетельствует об их смешанном генезисе, наряду с седиментационными, в их составе большая доля инфильтрационных вод.

Геотермальные бассейны мезозойских отложений генетически представляют собой захороненные морские седиментационные воды с примесью древней инфильтрационной воды (до 20-30%) и воды, выделяемой при дегидратации глинистых минералов при высоких PT условиях. В Терско-Кумском бассейне воды мезозойского комплекса по изотопному составу водорода и кислорода сильно не отличаются. Так, в водах меловых отложений $\delta^{18}O$ составляет +(5,75±0,35), юрских-+(6,85±0,75), триасовых-+(6,82±1,45)‰, а изотопный состав водорода в этих водах характеризуется довольно узким интервалом значений $\delta D=-(44,27\div48,61)$‰.

Итак, наряду с другими формами проявления зональностей (по площади и глубине, по химическому и газовому составу, по особенностям динамики и

распределения температур и т. д.) в геотермальных системах наблюдается явно выраженная зональность изменения изотопного состава воды в зависимости от глубины и возраста отложений. С ростом глубины и возраста отложений вода обогащается тяжёлыми изотопами D и $^{18}O$.

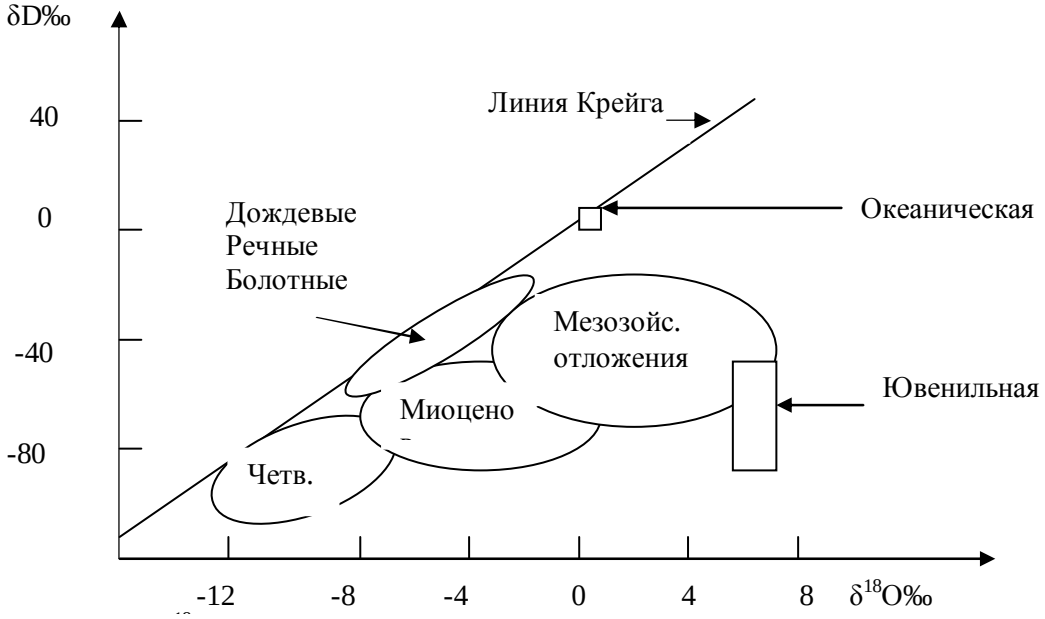



Рис.2. Изменения изотопного состава различных типов вод

Обобщая экспериментальные данные различных геотермальных месторождений можно построить график зависимости δD и $\delta^{18}O$ для вод различных генетических типов.

Обобщенный график приведен на рис.2. По изотопному составу воды неисследованного геологического месторождения по графику на рис.2 можно получить много полезной информации о геотермальном источнике: определить глубину залегания и возраст пласта, установить генетический тип воды и оценить вазобновляемость её запасов, выявить область питания подземного горизонта, определить температуру флюидов в глубинных резервуарах и т.д.

В последние годы в глубоких горизонтах седиментационных бассейнов обнаружено широкое развитие опресненных вод. Суждения о генезисе этих вод остаются пока дискуссионными. Некоторые исследователи считают, что в данном случае изотопная диагностика может существенно помочь, так как уже сейчас она позволяет различать воды современной и древней инфильтрации, дегидратационные воды глинистых минералов, конденсатогенные воды, приуроченные к залежам углеводородов, и флюиды ювенильного происхождения.

**Основные выводы:**

1. Геотермальные бассейны мезозойских отложений генетически представляют собой захороненные морские седиментационные воды с примесью древней инфильтрационной воды (до 20-30%0 и воды , выделяемой при дегидратации минералов при высоких PT- условиях.
2. Определенная доля ювенильной воды может образоваться и за счет восходящих флюидов в форме летучих компонентов, мигрирующих субвертикально вдоль глубинных разломов в фундаменте. По изотопному составу мезозойские воды характеризуются сильным изотопным сдвигом по кислороду ($\delta^{18}O$) вправо- в сторону утяжеления; $\delta^{18}O$ меняется в пределах от

+1,0 до +9‰. Примесные воды как инфильтрационные, магматические, дегидратационные и ювенильные, попадая в пластовые воды морского генезиса, вызывают облегчение изотопного состава по водороду и утяжеление по кислороду.

3. Термальные воды среднемиоценовых отложений являются преимущественно инфильтрационными. При одинаковых физико-химических условиях в пласте, приуроченные к карбонатным коллекторам воды характеризуются относительно высокими значениями $\delta^{18}O$ по сравнению с водами терригенных коллекторов.
4. Подземные воды, зоны активного водообмена плиоцен-четвертичных отложений, по значениям $\delta D$ и $\delta^{18}O$ полностью соответствуют питанию атмосферными и поверхностными источниками.

**Литература:**

1. *Есиков А.Д.* Изотопная гидрология геотермальных систем.М. «Наука». 1989. 195с.
2. *Есиков А.Д.* Масс-спектрометрический анализ природных вод. М. Наука,1980.204с.
3. *Курбанов М.К.* Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья.М. «Наука». 2001. 257с.
4. Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод. Под редакцией С.С.Бондаренко, А.С.Вартаняна- М. «Недра». 1986. 509с.
5. *Магомедов Ш.А., Мамаев О.А., Расулов Г.С.* «Изотопный состав и генетические особенности вод геотермальных месторождений Восточного Предкавказья». Водные ресурсы. 2000. том.27.№2.с.148-151
6. *Магомедов Ш.А., Мамаев О.А.* «Применение изотопного геотермометра углерода «$CO_2$-$CH_4$» для определения призабойных температур геотермальных скважин». //Вестник ДНЦ РАН, 2002,№12
7. *Магомедов Ш.А., Батырмурзаев А.С.* Изотопный состав вод геотермальных месторождений Восточного Предкавказья. //Докл. РАН, 2004, т.396, №5, с.667-669
8. *Магомедов Ш.А., Мамаев О.А.* «Применение изотопного геотермометра углерода «$CO_2$-$CH_4$» для определения призабойных температур геотермальных скважин». //Вестник ДНЦ РАН, 2002,№12
9. *Магомедов Ш.А., Батырмурзаев А.С.* Изотопный состав вод геотермальных месторождений Восточного Предкавказья. //Докл. РАН, 2004, т.396, №5, с.667-669
10. *Фор Г.* Основы изотопной геологии (пер.с английского). М.»Мир». 1989.

# СТРУКТУРНАЯ ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДЫ

Абдуллаев А.А.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а.*

По мнению многих специалистов, нахождение воды в жидком состоянии при комнатной и более высоких температурах обуславливается наличием в ней водородных связей (Н-связей) [1].

Расширение температурного интервала существования воды в жидком состоянии под влиянием сетки Н-связей ниже рассматривается как область структурной термостойкости (СТ) жидкой воды. Исследования [2,3] показывают, что в создании ТС жидкой воды вносят значительный вклад молекулярные структуры (комплексы) (МС) различных форм и размеров.

По данным выполненных исследований в формировании МС в жидкой воде определяющее значение имеют протонные, донорно-акцепторные свойства (ДАС) молекул $H_2O$ и влияния внешних факторов.

Мы полагаем, что ДАС молекул $H_2O$ обуславливает четкую симметрию этапов синтеза и последующего распада МС. В частности, в интервале температуры существования МС и последующего их распада рост МС и последующий их термический распад происходит в режиме роста Т.

Рост МС происходит [2,3] через этапы формирования димеров, сетки Н-связей и объемных молекулярных кластеров.

Основные свойства МС рассмотрены в работах [3,4].

Поэтому здесь ограничимся краткими комментариями результатов упомянутых работ. В терминах проблемы многих частиц водородная связь – это спаренная пара атомов разных молекул, энергетические состояния которой как двухкомпонентной системы лежат в энергетической щели спектра одноатомных колебаний исходных, не связанных молекул $H_2O$.

Синтез сетки Н-связей, по-видимому связан с взаимодействием, которое происходит между Н-связями на плоскости их расположения. Здесь целесообразно обратить внимание на сходство процессов синтеза молекул с Н-связями и слияния мелких капель в крупную каплю. Хорошо известно, что мелкие капли сливаются в крупные с целью достижения более устойчивого состояния жидких капель.

Аналогично система одиночных Н-связей (молекулярных димеров) при температурах, заметно меньших температуры кипения, объединяется в непрерывную сетку, как энергетически более выгодную структуру, обладающую меньшей поверхностью, чем соответствующая система димеров.

Оценим теперь роль динамических факторов в формировании МС в жидкой воде.

Вначале рассмотрим протонные донорно-акцепторные (ПДА) свойства молекул $H_2O$ и их роль в формировании молекулярных структур.

Мы полагаем, что симметрия ПДА свойств молекул $H_2O$ обуславливает аналогию этапов синтеза и последующего распада молекулярных структур (МС). Видимо правильно полагать, что в интервале температуры существования МС и последующего их разрушения, рост МС происходит в режиме роста температуры, а при распаде более термостойкими оказываются наименьшие МС (димеры).

Как показали исследования [4] рост МС происходит через этапы

формирования димеров, сетки Н-связей и объемных молекулярных кластеров.

Термические распады объемных кластеров по расчетам происходят вблизи 62°С, сетки примерно 66°С., а димеры могут существовать и при более высоких температурах.

Поэтому можно полагать, что температурный интервал существования МС с Н-связями практически охватывает область существования жидкой воды.

Зависимость координационного числа $\upsilon$, растущего с ростом Т известна как одна из аномалий жидкой воды. При этом рост $\upsilon(T)$ не ограничивается интервалом: $0 < T \leq 4^oC$, а распространяется до температуры насыщения протонных вакансий объемных кластеров, доля которых в жидкой воде достигает 25% [4].

В динамике Н-связей, основанной на РВ атомов разных молекул рост $\upsilon$ с ростом Т приводит к увеличению локальной плотности жидкой воды с ростом Т.

Учет этого факта для составляющей объемных кластеров позволяет определить их локальные свойства.

Действительно, сейчас выяснилось [3,4], что составляющая объемных кластеров жидкой воды имеет структуру и свойства, отличные от аналогичных характеристик воды с мономерными молекулами. Это обстоятельство дает основание составляющую объемных кластеров рассматривать как определенную фазу жидкой воды.

В качестве примера определения локальных свойств кластеров и учета их вклада в наблюдаемые свойства воды рассмотрим плотность $\rho$ воды в температурном ее существовании как двухкомпонентной системы. Согласно [3,4] вода как двухкомпонентная система существует в интервале: $43 < T \leq 62^oC$.

В системе не взаимодействующих Н-связей (димеров) локальная плотность структурированной компоненты воды пропорциональна параметру $\alpha$ и может быть представлена в виде:

$$\rho_{ст} = 2\alpha\rho_{\mu} \qquad (1)$$

где $\rho_{\mu}$ - плотность мономолекулярной воды, а цифра 2 связана с двумя молекулами молекулярной матрицы Н-сетки.

Для определения плотности воды как двухкомпонентной системы должна быть задана доля кластерной компоненты n, образованной за счет синхронных переходов протонов от мономерных молекул к сетке Н-связей.

Сейчас достаточно надежно установлено [4], что доля кластерной компоненты не превышает 25%. Поэтому плотность воды с кластерной компонентой представляется в виде:

$$\rho_{см} = \frac{3}{4}\rho_{\mu} + \frac{1}{4}\rho_{ст} = (\frac{3}{4} + \frac{1}{2}\alpha)\rho_{\mu} \qquad (2)$$

Здесь $\rho_{\mu}$ - плотность воды с мономерными молекулами. В интервале существования составляющей объемных кластеров изменения плотности $\rho_{см}$ определяется таблицей:

Таблица 1.

| $\alpha$ | 0,72 | 0,74 | 0,76 | 0,78 | 0,79 |
|---|---|---|---|---|---|
| **T, °C** | 42,68 | 47,24 | 52,56 | 58,85 | 62,44 |
| $\rho_{см}/\rho_{\mu}$ | 1,110 | 1,120 | 1,130 | 1,140 | 1,145 |

Рассмотрим теперь вопросы динамики формирования МС.

Как показано в работах [3-5] в основе процесса синтеза молекул $H_2O$ и образования МС лежит резонансное взаимодействие (РВ) атомов разных молекул, растущее с ростом температуры Т.

Хорошо известно, что воздействие слабого фактора на параметр $\alpha$ РВ может стать существенным. Сейчас уже выявлено, что воздействие слабого фактора (КВЧ – излучения, постоянного магнитного поля и т.д.) может значительно изменить локальную структуру и свойства жидкой воды.

Ниже предполагается, что проникновение влияния внешнего воздействия в водную систему происходит через ее поверхность.

Поэтому внешнее воздействие в первую очередь оказывает влияние на поверхностные характеристики, а именно на поверхностное натяжение $\sigma$, сетку Н-связей и особенно на параметр $\alpha$ РВ атомов разных молекул.

Для описания влияния слабого внешнего фактора на водную систему целесообразно использовать понятие глубины проникновения $\lambda$.

Так, например, глубина проникновения через кожу КВЧ-излучения в живой организм, содержащий до 60% воды, составляет: 0,7÷1 мм.

Подчеркнем, что КВЧ-излучение относится к классу сверхслабых факторов воздействия: энергия его кванта меньше тепловой энергии при Т=1$^o$С.

Как показывают исследования, КВЧ-излучение может оказать заметное воздействие на изменение параметра $\alpha$ РВ. Вода является сильным поглотителем миллиметровых волн КВЧ-излучения.

Другим удобным фактором внешнего воздействия на водную систему с кластерной компонентой является постоянное магнитное поле.

В последние годы выяснилось, что магнитное поле оказывает стабилизирующее влияние на молекулярные структуры в жидкой воде [2].

Для оценки изменений магнитных характеристик воды с молекулярными структурами удобно использовать величину локальной восприимчивости $\chi$, выраженную через параметр $\alpha$ РВ атомов разных молекул, т.е. величину:

$$\chi = \frac{1}{4\pi}\alpha(2\alpha - 1) \qquad (3)$$

Используя установленную ранее зависимость параметра $\alpha$ от Н: $\alpha_H = \frac{h^2}{1-2h^2}$, где $h = \frac{H}{H_o}$, $H_o = \frac{4\pi\sigma_o}{L}$, Здесь L – периметр области синхронных переходов протонов от мономерных молекул к сетке Н-связей.

После использования значения $\alpha_H$ равенство (3) перепишется в виде:

$$\chi(h) = \frac{h^2(4h^2-1)}{(1-2h^2)^2} \qquad (4)$$

Согласно формуле (4) локальная магнитная восприимчивость содержит параметр магнитного поля h до четвертой степени включительно. Это обусловлено квадратичной зависимостью сил Н-связей от параметра $\alpha$ резонансного взаимодействия атомов разных молекул. Для полей порядка 7-9кэ ($560\frac{КА}{м}$) и меньше значение величины h достаточны малы по сравнению с единицей и количественно вполне можно пренебречь. Однако этого нельзя делать из-за того, что при этом из метода исследования водной системы полностью исчезает динамика Н-связей. Результаты расчета локальной магнитной структуры водной системы на основе формул приведены в таблице 2.

Таблица 2. Изменение структуры воды в магнитном поле

| $\mathbf{h^2}$ | **H,** $\frac{КА}{м}$ | $\alpha$ | $\chi \cdot 10^3$ |
|---|---|---|---|
| 0,015 | 149,99 | 0,117 | - 7,125 |
| 0,10 | 153,78 | 0,175 | - 7,460 |
| 0,20 | 217,63 | 0,330 | 8,846 |
| 0,27 | 252,86 | 0,589 | 809 |
| 0,28 | 257,43 | 0,636 | 13,82 |
| 0,29 | 262 | 0,690 | 20,94 |
| 0,30 | 266 | 0,750 | 29,85 |

По-видимому, в определении пространственной структуры сетки водородных связей определяющее значение имеют характеристики внешнего воздействия. В этом можно убедиться на примере анализа образования кластеров путем синхронных переходов протонов.

Более полно магнитные свойства составляющей объемных кластеров будут исследованы в отдельной работе автора.

**Литература:**

1. *Чанг Р.* «Физическая химия с приложениями к биологическим системам» Изд. «Мир», Москва, 1980, 662с.
2. *Цундель Г.* Гидратация и межмолекулярное взаимодействие, М. Мир, 1972
3. *Абдуллаев А.А.* Расчет динамики аномалий жидкой воды. Естественные и технические науки. М. 2011г. №6, С.59-61.
4. *Абдуллаев А.А.* Влияние сетки водородных связей на теплоемкость жидкой воды. Естественные и технические науки, 2012, №3, 46-48с.
5. *Омаров М.А., Абдуллаев А.А.* Структура жидкой воды и водоподготовка для заводнения поровых нефте- и водоносных сред. Изд. Юпитер. Махачкала, 2003г., 251с.

# НОВОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ЕГО МОЛЕКУЛЯРНЫЙ УПРАВЛЯЮЩИЙ ПАРАМЕТР

Петрик Г.Г.

*ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а; e-mail: galina_petrik@mail.ru*

**Введение.** Известно, что теплофизические свойства системы могут быть рассчитаны при наличии адекватного уравнения состояния. В этой связи фундаментальное и прикладное значение проблемы получения и применения адекватных уравнений состояния не требуют обоснований. В то же время проблема далека от решения, несмотря на многочисленные разрозненные исследования в этом направлении, ведущиеся долгие годы. Напомним, что в следующем, 2013 г. у нас будет возможность отметить знаменательную дату: исполнится 140 лет уравнению состояния (УС) вещества, предложенному молодым голландским ученым Ван-дер-Ваальсом в его диссертации. За прошедшее время было предложено множество эмпирических модификаций уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, т.е. новых моделей состояния вещества. Однако предлагая новые формы УС, авторы ссылаются на ту же молекулярную модель, сохраняя смысл двух параметров (a,b) различных УС таким же, как в УС Ван-дер-Ваальса. Основанием этому служит подчеркиваемая ее простота и физическая наглядность. В то же время модель, которая была предложена самим Ван-дер-Ваальсом (в оригинале объекты - это жесткие сферы, между которыми действует настолько слабое притяжение, что оно не изменяет расстояний между их центрами, об отталкивании речь не шла), представляет весьма частный вариант соотношения между действующими межчастичными силами. Проблема заключается в том, чтобы построить УС на основе более общей модели, где будут отражены реалистичные характеры отталкивания и притяжения.

Уточним используемые термины и определения. Термическое уравнение состояния (УС) будет адекватным в том случае, если в его основу будет заложена достаточно адекватная молекулярная модель, свойства которой удастся достаточно реалистично отразить на термодинамическом уровне. Последнее означает решение проблем, относящихся к выбору (определению, заданию) структуры УС, формы отдельных вкладов, числа, смысла и способа определения параметров уравнения. Очевидно, что такой подход сложнее, но гораздо важнее и интереснее стандартного, когда параметры УС (не одна сотня которых получена путем эмпирической модификации оригинального УС Ван-дер-Ваальса) рассматриваются как подгоночные по свойствам веществ.

Мы пытаемся реализовать намеченный подход в рамках самых простых моделей. На первом этапе удалось получить новое УС [1] на основе простой молекулярной модели взаимодействующих точечных центров (ВТЦ). Показано [2], что многие УС ван-дер-ваальсового типа вписываются в рамки этой модели, что открывает новые возможности при работе с ними. В том числе удается ответить на ряд принципиальных вопросов, ответы на которые не могут быть получены при стандартном подходе к этим УС. О некоторых результатах, полученных нами в рамках новой модели, мы уже докладывали в ИПГ на Конференции и Школе 2010 года.

В предлагаемом докладе мы представляем заключительную часть результатов исследования нового УС ВТЦ, (характер отталкивания – жесткий,

притяжение –оптимизировано по сравнению с предположением Ван-дер-Ваальса). Именно они позволяют ответить на давний вопрос известного физика Праузница [3] о смысле и корректном значении параметра *b* УС Редлиха-Квонга, а также объяснить результат, полученный 35 лет назад в работе [4], когда ее авторы, практически найдя фактор, определяющий все параметры УС и критический фактор сжимаемости $Z_C$, не смогли ответить на вопрос о его смысле и отказались от его использования. Попытка получить результаты, относящиеся к управляющему параметру молекулярного уровня, предпринималась нами раньше, и мы сообщали об этом, но считать ее удавшейся было нельзя. Теперь же мы убеждаемся в правильности выбранного направления исследования модели ВТЦ, потому что при этом удается дать ответы на кажущиеся при стандартном подходе «нерешаемыми» вопросы.

**Уравнение состояния ВТЦ. Структура УС, форма вкладов, параметры. Управляющий фактор термодинамического уровня.** УС ВТЦ было получено нами (на основе доваальсовой информации) в виде суммы трех вкладов в давление *P* (для одного моля, обозначения стандартные), где последние два - конфигурационные, учитывающие жесткое отталкивание и «реалистичное» притяжение ТЦ [1,5]:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)}. \qquad (1)$$

*V* – это объем системы, который полностью доступен для ТЦ, когда между ними отсутствует взаимодействие: $V=V_f(no/int)$. Все три коэффициента (параметры) *c, b, a* УС (1) связаны с проявлением сил притяжения и отталкивания на доступный для ТЦ объем; *c>0, b>0,* появление третьего параметра *a* (и отличие его от *c*) вызвано отличием в характере сил притяжения и отталкивания. Смысл параметров выявляется в ходе получения УС: $c=-\Delta V_f(attr)$, $b=\Delta V_f(rep)$- интегральные характеристики - изменения доступного для ТЦ объема, вызванные силами притяжения и отталкивания, соответственно.

Трехпараметрическое УС (1) переходит в ***однопараметрическое семейство уравнений,*** если в рассмотрение вводится [5] физически определенный фактор $\chi=c/b$. Для случая, когда $\chi = const$ (*b, c*=const), удалось получить [6] аналитические выражения в виде функций одной переменной χ для всех приведенных (относительно критических параметров) параметров УС (1) ($\beta=b/V_C$, $\sigma=c/V_C$, $\alpha=a/RT_CV_C$), включая критический фактор сжимаемости (КФС) $Z_C=P_CV_C/RT_C$:

$$\beta = \frac{1}{\chi}\left(\sqrt[3]{(1+\chi)}-1\right), \alpha = \frac{\chi^2}{(\sqrt[3]{(\chi+1)}(\chi-1)+2\chi+1)(\sqrt[3]{\chi+1}-1)}, \sigma = \left(\sqrt[3]{(1+\chi)}-1\right),$$

$$Z_C = \frac{\chi}{\sqrt[3]{(\chi+1)}(\chi-1)+2\chi+1}, \qquad (2)$$

- для $\chi\neq0$; случай $\chi=0$ формирует УС Ван-дер-Ваальса и рассматривается отдельно. На этом основании ***параметр χ был назван*** [5] ***управляющим параметром (или фактором) термодинамического уровня модели***.

Здесь мы продолжаем исследование нового УС ВТЦ.

**Управляющий параметр θ молекулярного уровня модели.** Введем обозначение $\theta$ для выражения, которое входит во все четыре формулы (2) для параметров УС ВТЦ и связывает его с параметром $\chi$:

$$\sqrt[3]{1+\chi} = \theta,\ \theta^3 = 1+\chi. \qquad (3)$$

Приведенные параметры УС (1) в виде функций переменной $\theta$ (при этом

использовано уравнение связи для трех параметров $\alpha\beta=Z_C$) имеют по сравнению с формулами (2) еще более простой и компактный вид:

$$\sigma=\vartheta-1;\ \beta=\frac{1}{1+\theta+\theta^2};\ \alpha=\frac{(1+\theta+\theta^2)^2}{(1+\theta)^3};\ Z_C=\frac{1+\theta+\theta^2}{(1+\theta)^3}. \qquad (4)$$

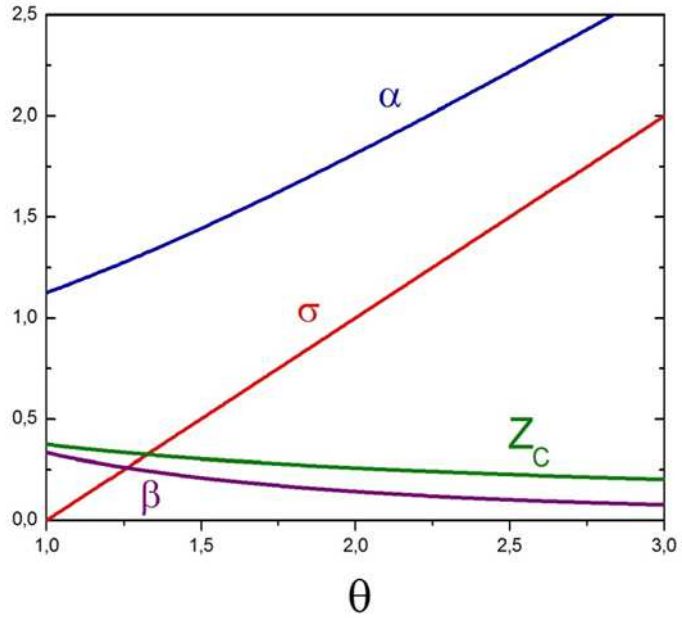



Рис.1. Вид зависимости параметров УС ВТЦ от управляющего параметра

На рис.1 представлен вид зависимости параметров УС ВТЦ от параметра $\theta$ (по формулам (4)). Из (4) следует, что $\theta \geq 1$ (этого требует условие *c* (или σ) >0). Отметим очень интересное почти явное подобие в поведении параметров σ и α. При стандартном подходе, когда (также как у Ван-дер-Ваальса) «за притяжение отвечает» параметр *a*, а третий, эмпирически введенный параметр *c* не имеет смысла, это поведение не объяснимо. В то же время в рамках разрабатываемой модели ВТЦ это объяснимо вполне. Как мы уже не раз отмечали [1,2,5,6], параметр *a* появляется в притягивательном вкладе только потому, что характер сил притяжения отличается от характера сил отталкивания. Если бы они были одинаковы, то в числителе второго вклада (подобно первому конфигурационному, где стоит *RTb*) стояло бы выражение *RTc*, где параметр *c* есть величина, связанная с проявлением сил притяжения в отношении доступного объема.

В таблице 1 приведены результаты расчетов значений параметров УС ВТЦ.

Таблица 1.

| θ | 1 | 1.2 | 1.3 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Z_c$ | 0.375 | 0.34 | 0.328 | 0.304 | 0.294 | 0.284 | 0.275 | 0.267 | 0.259 | 0.245 |
| σ | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.2 |
| β | 1/3 | 0.27 | 0.251 | 0.210 | 0.194 | 0.179 | 0.165 | 0.154 | 0.143 | 0.124 |
| α | 1.125 | 1.24 | 1.309 | 1.444 | 1.515 | 1.587 | 1.661 | 1.738 | 1.815 | 1.969 |
| χ | 0 | 0.73 | 1.197 | 2.375 | 3.096 | 3.912 | 4.834 | 5.86 | 7.00 | 9.65 |
| $\theta^3$ | 1 | 1.73 | 2.197 | 3.375 | 4.096 | 4.912 | 5.834 | 6.86 | 8.00 | 10.65 |

Интервал реалистичных значений $Z_C$ (0.26-0.3) определяется интервалом значений параметра θ (2-1.5). Очевидно, что параметр θ также оказывается управляющим для модели взаимодействующих точечных центров. Требуется выяснить, какой из параметров модели «фундаментальнее» - введенный на первом этапе χ или θ.

**Об уточнении смысла параметра b УС и установлении физического смысла параметра θ.** Управляющий параметр χ (χ>0) был определен нами через изменения доступного объема, связанные с силами притяжения и отталкивания:

$\chi = -\Delta V_f(attr)/\Delta V_f(rep)$. Необходимо решить вопрос о том, как оценить эти изменения.

Очевидно, что для каждого состояния объем моделируемой системы $V$ можно представить в виде суммы двух частей – свободного (или доступного) $V_f$ и запрещенного (или исключенного) $V_{ex}$: $V = V_f + V_{ex}$. Т.к. для каждого состояния $V = const$, имеем: $\Delta V=0=\Delta V_f + \Delta V_{ex}$, откуда следует: $\Delta V_f = -\Delta V_{ex}$. Поскольку в данной модели мы рассматриваем проявление притяжения и отталкивания независимо, то такие же соотношения должны иметь место и для отдельных вкладов: $\Delta V_f(attr) = -\Delta V_{ex}(attr)$, $\Delta V_f(rep) = -\Delta V_{ex}(rep)$. Для нас важно, что по абсолютной величине они равны. Следовательно, мы можем пользоваться в своих рассуждениях представлением о свободном либо исключенном объеме, имея в виду эту связь двух величин.

Напомним ход наших рассуждений при получении УС ВТЦ (1) и уточним смысл параметров УС. Вначале мы имеем систему невзаимодействующих ТЦ, состояние которой описывает УС идеального газа: $P = RT/V$. При этом ТЦ не имеют никаких геометрических характеристик ($V_{ex}=0$, $V_f= V$). Затем между ТЦ системы «включается» жесткое отталкивание (таково было исходное предположение). В результате в приближении касающихся сфер у каждого ТЦ проявляется некий эффективный собственный объем (ЭСО) (равный индивидуальному исключенному объему или связанный с ним по какому-то правилу); теперь $V=V_f+V_{ex}$. Обозначим величину $\Delta V_{ex}$ (интегральная характеристика моля «вещества»), вызванную только отталкиванием, через $b^{et}$: $\Delta V_{ex}(only/rep)=b^{et}$. УС такой системы (точечные центры с жестким отталкиванием) есть:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb^{et}}{V(V-b^{et})}.$$

Далее «включим» притяжение и проследим, к чему это приведет. Его действие уменьшает расстояния между центрами и, следовательно, (в том же приближении касающихся сфер) уменьшит исключенный объем на некоторую величину $\Delta V_{ex}(attr)$:

$\Delta V_{ex}(only/rep) - \Delta V_{ex}(attr) = \Delta V_{ex}(rep \wedge attr)$. Скорее всего, именно эта последняя величина (обозначим ее через $b^{eff}$) и должна играть роль входящего в УС ВТЦ параметра $b^{ÓÑ}$:

$$b^{eff} = b^{et} - \Delta V_{ex}(attr);\ b^{et} = b^{eff} + \Delta V_{ex}(attr). \qquad (5)$$

Соответствующее результирующее УС ВТЦ имеет вид ($c = -\Delta V_f(attr) = |\Delta V_{ex}(attr)|$, c>0):

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb^{eff}}{V(V-b^{eff})} - \frac{a}{V(V+c)}. \qquad (6)$$

Имея в виду установленный смысл параметров и приведенные рассуждения о связи свободного и исключенного объемов, преобразуем выражение, определяющее новую переменную θ:

$$\theta^3 = 1+\chi = 1+\left|\frac{\Delta V_f(attr)}{\Delta V_f(rep\wedge attr)}\right| = 1+\left|\frac{\Delta V_{ex}(attr)}{\Delta V_{ex}(rep\wedge attr)}\right| = \frac{|\Delta V_{ex}(rep\wedge attr)|+|\Delta V_{ex}(attr)|}{|\Delta V_{ex}(rep\wedge attr)|} = \qquad (7)$$

$$= \frac{\Delta V_{ex}(only/rep) - \Delta V_{ex}(attr) + \Delta V_{ex}(attr)}{\Delta V_{ex}(rep\wedge attr)} = \frac{b^{et}}{b^{eff}}$$

Очевидно, оба параметра $b$ в (7) рассчитываются по одинаковой формуле (объем сферы). Кроме того, в выражения для обоих параметров в качестве сомножителя в рассматриваемом приближении входит число Авогадро $N_{AV}$, т.к. они относятся к молярным объемам. Тогда из проведенного анализа и выражения (7) следует вывод, что вновь введенный параметр $\theta$ имеет вполне определенный физический смысл, также связанный с проявлением действующих между ТЦ сил:

$$\theta = (1+\chi)^{1/3} = \frac{d^{et}}{d^{eff}}. \qquad (8)$$

*Определяющий (или управляющий) фактор θ молекулярного уровня модели ВТЦ равен отношению двух характерных размеров - диаметров двух сферических эффективных собственных объемов – один из них проявляет ТЦ, когда в системе действует только жесткое отталкивание и второй – результирующий эффективный собственный объем, который проявляется у ТЦ как результат действия обеих сил – отталкивания и притяжения*. Именно этот параметр молекулярного уровня определяет параметры приведенного УС, что следует из соотношений (4) и (2).

**О включении в модель УС ван-дер-ваальсового типа и ответах на давние вопросы.** Многие УС ван-дер-ваальсового типа вписываются в рамки исследуемой модели ВТЦ. Особенно легко это происходит для большой группы УС, первый вклад которых имеет вид $RT/(V-b)$. Это просто показать, если использовать соотношение: $\frac{RT}{(V-b)} = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)}$. Надо только обязательно иметь в виду, что такой, на первый взгляд, формальной для математики замене, отвечает переход между физически различными моделями – от жестких сфер (с неясными значениями параметров УС при стандартном подходе) к взаимодействующим точечным центрам, где у всех параметров УС смысл установлен.

1. Праузниц заметил [3] четверть века назад по поводу параметра $b$ в известнейшем УС Редлиха - Квонга, что смысл его не ясен, а значение почти точно в два раза меньше, чем значение $b$ для УС Ван-дер-Ваальса. Объяснить этого (как и другие авторы) он не смог. Приведенные выше рассуждения для разрабатываемой модели позволяют сделать это легко. Перепишем соотношение (5) иначе: $b^{ES} = b^{HS} - c$ (*ES* - Equation of State, уравнение состояния; *HS* - Hard Sphere – жесткая сфера). Применим его к УС Ван-дер-Ваальса: $b^{vdW} = b^{HS}$ (согласно предположению самого Ван-дер-Ваальса [7], силы притяжения настолько слабы, что не влияют на трансляцию молекул, $c$=0 и проявляется только жесткое отталкивание). Для УС Редлиха - Квонга: $b^{R-Kw} = b^{HS} - c$. Т.к. согласно оригинальной форме УС Редлиха - Квонга, $c = b^{R-Kw}$, получаем, что $2^* b^{R-Kw} = b^{HS} = b^{vdW}$. Отсюда следует, что такое соотношение между параметрами, имеющими в модели ясный смысл, заложено в самой форме УС, и оно должно выполняться не только для аргона, с критическими изотермами которого Праузниц работал и для которого сделал это важное наблюдение, но и для других веществ.

2. Коротко сошлемся на еще один старый необъясненный результат.

Имея в виду отмеченную возможность переходов между моделями, сравним формулы (4) нашей работы и выражения, полученные Юздином, Макаулифом в [4] для эмпирически предложенного ими трехпараметрического УС ван-дер-ваальсового типа (новый третий параметр смысла у них не имел). Авторы предложили выражения для всех параметров УС в виде обобщенных функций от вновь введенного ими параметра θ (при этом никак не объяснив ни появления θ, ни происхождения формул):

$$D_C = \frac{\theta^3 - 1}{(1+\theta)^3},\ B_C = \frac{1}{(1+\theta)^3},\ A_C = \left[\frac{1+\theta+\theta^2}{(1+\theta)^2}\right]^3,\ Z_C = \frac{1+\theta+\theta^2}{(1+\theta)^3}. \qquad (9)$$

Определение нового параметра в работах ([4] и нашей) совпадает, т.к. $(1+D_C/B_C)^{1/3} = (1+c/b)^{1/3}$. Очевидно, что критический фактор сжимаемости $Z_C$, также как и другие параметры, оказывается функцией новой переменной θ. Несмотря на это, авторы [4] в качестве определяющего параметра все равно выбирают $Z_C$ и не задают принципиального вопроса ни о физическом смысле нового фактора θ, ни о смысле определяющего его отношения параметров УС. ***Полученные выражения (9) авторы рассматривают всего лишь как некий любопытный артефакт.*** С учетом различий, следующих из выбора параметров приведения ($V_C$ у нас и $RT_C/P_C$ в [4]), полученные в двух работах формулы совпадают. Следовательно, именно такие выражения были получены, ***не объяснены и не использованы*** 35 лет назад. Конечно, наука, как и история, не знает сослагательного наклонения, но мы считаем, что если бы много лет назад удалось выйти на модель взаимодействующих ТЦ, которую мы исследуем последние годы, то, вероятно, можно было бы рассчитывать на существенный прогресс в области исследований, связанной с поиском адекватных УС.

Результаты, полученные нами в последнее время в рамках простой модели взаимодействующих точечных центров (многие работы находятся в свободном доступе на сайте www.csmos.ru), связывающие управляющие параметры термодинамического и молекулярного уровней с проявлением сил межмолекулярного взаимодействия, настойчиво выводят в область проблем адекватного моделирования взаимодействий модельных объектов, заменяющих реальные молекулы. Требуется замена примитивной модели молекулы в виде точечного центра на более гибкую реалистичную модель в качестве основы при получении термического УС, более адекватного по сравнению с исследуемым УС взаимодействующих точечных центров.

Часть результатов получена при поддержке РФФИ (проект № 09-08-96521).

**Литература:**

1. *Петрик Г.Г.* // Мониторинг. Наука и технологии. 2009. 1. С. 43-59.
2. *Петрик Г.Г.* // Мониторинг. Наука и технологии. 2011. 1(6). С.87-98.
3. Prausnitz J.M. // Fluid Phase Equilibria. 1985. 24. P. 63-76; Wong J.O., Prausnitz J.M // Chem.Eng. Commun. 1985. 37. P. 41-53.
4. *Usdin E., McAuliffe I.C.* // Chem. Eng. science. 1976. 31. 11. P. 1077.
5. *Петрик Г.Г.* // «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Сб.трудов межд. конф. / Институт физики ДНЦ РАН, Даг. гос. ун-т,Махачкала, 2007, 226-229.
6. *Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р.* // Мониторинг. Наука и технологии. 2010.1(2). С.67-78.
7. *Кипнис А.Я., Явелов Б.Е.* Иоганнес Дидерик Ван-дер-Ваальс. Л.: Наука. 1985. 309с.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК В ДАГЕСТАНЕ

Алхасов А.Б.[1,2], Дибиров М.Г.[2], Дибирова М.М.[2]

*[1]ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

*[2]Филиал ФГУБН Объединенный институт высоких температур РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

Возможности использования экологически чистой и повсеместно доступной возобновляемой энергии солнечного излучения привлекают все большее внимание. В соответствии с прогнозами уже в течение ближайших 15-20 лет возобновляемые источники энергии (энергия Солнца, ветра, биомассы) должны занять заметное место в мировом энергетическом балансе, обеспечивая замещение истощающихся запасов органического топлива и экологическое оздоровление окружающей среды.

Солнечные тепловые установки могут быть использованы для отопления и горячего водоснабжения любых жилищно-коммунальных, сельскохозяйственных и промышленных зданий и сооружений, расположенных в благоприятных климатических условиях, т.е. в районах, где наблюдается относительно большое число солнечных дней в году. Солнечные установки уже находят широкое коммерческое применение во многих странах мира. Они используются для нагрева воды в бассейнах, для горячего водоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей, отопления зданий, сушки сельскохозяйственной продукции.

Суммарная площадь установленных коллекторов в мире уже превышает 200 млн. квадратных метров [1], из них в странах Европы (Германия, Австрия, Греция, Франция, Испания, Дания) общая площадь солнечных коллекторов превышает 20 млн.кв.м. Суммарная тепловая мощность солнечных тепловых установок, действующих в мире, превышает 200Гвт. В европейских странах мощность таких установок составляет около 15Гвт. Мировым лидером по используемой площади солнечных коллекторов является Китай (58%), на страны ЕС приходится 12,7%, в Турции установлено 9% всех солнечных коллекторов.

В ряде стран солнечные водонагревательные установки стали обычным атрибутом жизни. Так, например, в Израиле горячее водоснабжение 80% всех жилых домов обеспечивается солнечными водонагревателями, а с 1980 года дома до 9 этажей обязательно оборудуют установками солнечного горячего водоснабжения. В США эксплуатируются более 800 тыс. жилых домов с солнечным отоплением и горячим водоснабжением, а более 60% частных и общественных плавательных бассейнов обогреваются за счет солнечной энергии. В Японии функционируют более 1миллиона солнечных установок.

В бывшем СССР, несмотря на искусственно устанавливаемые цены на традиционные энергоресурсы, вопросам развития гелиотехники также уделялось определенное внимание со стороны государства, но эти усилия были направлены преимущественно на южные республики (Туркмения, Узбекистан, Грузия, Армения, Украина и др.), где климатические условия являются наиболее благоприятными для использования солнечной энергии. В результате, сегодня в России число действующих солнечных установок весьма ограничено. По оценкам исследователей-гелиоэнергетиков суммарная площадь действующих в России солнечных тепловых установок оценивается всего в 100 тыс.кв.м, что явно не

соответствуют реальным возможностям и потребностям страны.

Многие десятки фирм-производителей различных типов солнечных коллекторов и водонагревательных установок успешно действуют в Европе, Америке, Австралии и других регионах мира.

За последние годы в России также сформировалось около десятка потенциальных производителей солнечных коллекторов, для которых коллекторы являются только дополнительным видом продукции.

Как правило, разработанные российскими производителями солнечные коллекторы отвечают современным техническим требованиям. Они изготавливаются из нержавеющей стали, в ряде случаев имеют селективные покрытия панелей, современную теплоизоляцию. Цена на коллекторы устанавливается довольно высокой – в большинстве случаев от 6000 руб. до 1200 руб. в расчете на 1 кв. м площади коллектора. Высокая цена на изделия в сочетании с относительно низкими внутренними ценами на топливо резко ограничивает спрос. Ситуация усугубляется также слабой информированностью потенциальных потребителей о возможностях практического использования солнечных установок. В отличие от ведущих зарубежных стран у нас пока еще отсутствует законодательство, устанавливающие какие-либо льготы для производителей и потребителей экологически чистых энергетических установок.

Анализ эффективности солнечных водонагревателей применительно к климатическим условиям даже средней полосы России (Москва и московский регион) показывает, что существует большой платежеспособный спрос на такие установки (летние кафе, коттеджи, дачи и т.п.) [2]. Ясно, что для более южных и «солнечных» регионов страны условия использования солнечных водонагревателей будут более благоприятными.

Наиболее благоприятными для использования солнечной энергии регионами России являются Северный Кавказ, Краснодарский и Ставропольский края. Годовое поступление солнечной энергии на горизонтальную поверхность в этих регионах колеблется от 1280 до 1870 квтч на 1кв.м. в год, а продолжительность солнечного излучения составляет от 2000 до 3000 часов в год.

Простейшим и наиболее дешевым способом использования солнечной энергии является нагрев бытовой воды в так называемых плоских солнечных коллекторах. В [2] на основе математического моделирования простейшей солнечной водонагревательной установки показано, что в реальных климатических условиях средней полосы России целесообразно использование сезонных солнечных водонагревателей, работающих в период с марта по сентябрь.

В работе [3] проведен анализ возможностей применения гелиоустановок, который свидетельствует, что при использовании солнечной энергии 25% населения Краснодарского края, не имеющего централизованного теплоснабжения (916 тыс. человек), и 50% отдыхающих (5000 тыс. человек) общая потребность края в гелиоустановках составляет 1450 тыс.м$^2$.

Расчеты, выполненные нами в целях определения производительности и экономической эффективности солнечных коллекторов в климатических условиях Дагестана, показывают достаточно высокую их эффективность. В таблице 1 приведены значения среднедневной интенсивности солнечной радиации I (вт/кв.м) в солнечный день, удельной среднедневной мощности коллекторов Qд (вт/кв.м.) в солнечный день и месячной производительности Qм (квтч) в климатических условиях горной зоны Дагестана.

Годовая тепловая производительность 1кв.м солнечных коллекторов в горной зоне Дагестана составляет 1250квтч в год. Капитальные затраты на солнечные установки составляют около 7000 руб на 1кв.м., включая стоимость тепловых аккумуляторов, вспомогательного оборудования, монтажных и пуско-наладочных работ. Ежегодные эксплуатационные затраты практически отсутствуют. Если сравнить стоимость тепловой энергии, вырабатываемой солнечными установками, со стоимостью тепловой энергии, вырабатываемой котельными на газе ( которая составляет не менее 2руб/квтч, включая затраты на газ, на электроэнергию, на эксплуатацию и на амортизацию), то 1кв.м солнечной установки производит энергии на 2500руб в год. При этом срок окупаемости составляет менее 3лет. В равнинной зоне Дагестана (Махачкала) наблюдается меньшая продолжительность солнечного сияния в зимний период года и большая (чем в горной зоне) – в летний период. Расчетные значения годовой производительности солнечных тепловых установок равнинной зоне находятся в пределах 1200-1350квтч. на 1кв.м в год. Срок окупаемости солнечных тепловых установок в равнинной зоне Дагестана также не превышает 3 года, что показывает перспективность использования солнечных тепловых установок как для горячего водоснабжения и частичного отопления крупных объектов.

Таблица 1.

| | янв | февр | март | апр | май | июнь | июль | авг | сент | окт | нояб | дек | год |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 726 | 777 | 866 | 905 | 937 | 920 | 886 | 832 | 822 | 800 | 725 | 672 | |
| Qд | 435 | 466 | 500 | 515 | 532 | 560 | 550 | 520 | 493 | 480 | 434 | 403 | |
| Qм | 70 | 80 | 96 | 111 | 123 | 131 | 134 | 132 | 118 | 93 | 73 | 60 | 1250 |

Очень интересным, на наш взгляд, и перспективным является вариант перевода городских котельных в неотопительный период на солнечные водонагревательные установки. При этом работа котельных приостанавливается на весь неотопительный период а обеспечение населения горячей водой производится от солнечной водонагревательных установок. Выполненные нами расчеты показывают, что каждый кв.м. солнечных коллекторов позволяет сократить расход только газа (не считая затрат на электроэнергию и эксплуатацию котельной) на 400куб.м в год. Перевод котельных г. Махачкала (10ед.) на солнечные коллекторы (5000кв.м.) для нагрева воды в неотопительный период года позволяет сократить расход газа на более чем 2млн.куб.м. в год. Если учесть экономию электроэнергии на привод насосов, зарплаты персоналу др., то срок окупаемости таких установок не превышает 3-4-х лет.

Другим перспективным направлением использования солнечных водонагревательных установок является нагрев воды для горячего водоснабжения отдаленных объектов, например, туристических баз. Сравнительные технико-экономические расчеты солнечной установки и модульно-блочной котельной установки на газе показали целесообразность использования солнечных водонагревательных установок.

В настоящее время НПП «РЕСУРС-М» совместно с ООО «СК-ЮГ» под научным руководством ФОИВТ РАН начали производство солнечных коллекторов. Производственная мощность - 200-250 коллекторов в месяц. В связи с тем, что при изготовлении этих коллекторов широко используются

современные полимерные материалы, они отличаются от аналогов небольшим весом (всего11кг. против 20-25кг на 1кв.м.) и низкой себестоимостью (не более 2200руб. за 1 кв.м.). По своим теплотехническим характеристикам они не уступают лучшим аналогам производства России и СНГ.

Основные технические характеристики коллекторов «ресурс-м»

| | |
|---|---|
| Габаритные размеры (без патрубков), мм | 1500x700x57 |
| Площадь поглощающего элемента, $м^2$ | 1 |
| Вес (сухой), кг. | 11,0 |
| Рабочее давление атм., МПА | 0,4 |
| Эффективность коллектора | 0,75 |
| Производительность по горячей воде $65^0$ С, литров в день | 70-90 |
| Максимальное давление, МПА | 0,6 |

Рис.1

На рис.1 показаны солнечные коллекторы производства НПП «РЕСУРС-М» в солнечно-геотермальной системе теплоснабжения жилого дома на полигоне ФОИВТ РАН.

На рис.2 показана солнечная душевая установка дачного типа на 80 литров горячей воды в день, с коллектором производства НПП «РЕСУРС-М».

На рис.3 показаны коллекторы солнечной промышленной тепловой установки (100кв.м.) для подогрева битума.

Необходимо обратить внимание на другой вид солнечных тепловых коллекторов. Это солнечные воздухонагреватели, которые могут быть использованы для сушки сельхозпродукции, лесоматериалов, в промышленности, для отопления зданий. По сравнению с водонагревателями солнечные воздухонагреватели проще по конструкции, легче и почти в 2 раза дешевле. По тепловой эффективности и по температурному потенциалу они идентичны солнечным водонагревателям. Здания с воздушными системами отопления (в помещения подается теплый воздух) и солнечными воздухонагревателями находят широкое распространение в мире, в них используются преимущественно сухие галечные аккумуляторы, располагающиеся в подвальных помещениях. Использование солнечных воздухонагревателей в сельском хозяйстве, в частности для отопления теплиц, для сушки сельхозпродукции и т.д. является экономически оправданным и перспективным.

Рис.2

Рис.3

В заключение хотим отметить, что, в отличие от других регионов России, Постановлением правительства Дагестана в последние годы (2010-2012г) оказывалась государственная поддержка предприятиям, использующим энергосберегающие и инновационные технологии. В частности предприятия,

использующие или производящие солнечные, ветровые или другие установки возобновляемой энергетики, получали компенсацию в размере 70% от понесенных затрат. Благодаря этому постановлению правительства Дагестана развитие солнечной энергетики в республике получило значительный толчок.

## Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая Энергетика М. Физматлит. 2010г.
2. Об Использовании Солнечных Водонагревателей В Климатических Условиях Средней Полосы России О.С. Попель, С.Е. Фрид. Институт Высоких Температур Российской Академии Наук, Г. Москва.
3. Гелиоустановки горячего водоснабжения: расчеты, конструкции солнечных коллекторов, экономическая и энергетическая целесообразность Бутузов В.А., Лычагин А.А. Краснодар, Зао «Южная Энергетическая Компания».

# ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН)

Цапиева О.К.[1], Магомедова Н.А.[2]

[1]*ФГУБН Институт социально-экономических исследований Дагестанского НЦ РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

[2]*Филиал ФГУБН Объединенный институт высоких температур РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

Дагестан, несмотря на имеющиеся прогнозные значительные запасы углеводородного сырья, добывает природного газа в два раза меньше чем потребляет; нефти здесь добывается в 4 раза меньше чем потребляется жидкого топлива; уголь, торф и дрова не представлены товарным производством. Единственным существенным собственным энергетическим продуктом является электроэнергия, производимая гидроэлектростанциями Сулакского каскада. Объемы производства гидроэнергии подвержены сезонным и климатическим колебаниям. Зимой, когда потребность в электроэнергии бывает в сельском хозяйстве наибольшей, тем не менее приток воды в реках становится минимальным и рабочего объема запаса воды в Чиркейском водохранилище не хватает на все три зимних месяца. В результате в течение трех последних зим и весен регулярно по несколько часов в день отключаются от электроэнергии предприятия большинства сельских районов Дагестана. В то же время особенности технологических циклов во многих современных сельскохозяйственных производствах не допускают возможности подобных длительных отключений от тепла, например автоматические инкубаторы, теплицы, школы, больницы, фельдшерские пункты, детские сады и др..

Именно необходимость альтернативного энергообеспечения вынуждает сельское хозяйство региона использовать нетрадиционные источники энергии.

Второй причиной является их доступность и наличие в избытке. Дагестан является самым обеспеченным в России регионом по количеству солнца, ветра, гидроэнергоресурсов, гидрогеотермальных ресурсов, приходящихся на единицу площади.

По использованию гидроэнергоресурсов получило развитие строительство крупных гидроэлектростанций и, хотя имеются существенные возможности для приобретения сельскохозяйственными предприятиями микроГЭС.

Остановимся на проблеме использования на сельских территориях региона, биоэнергоресурсов, имеющихся в каждом хозяйстве, а также возможностях использования энергии солнца, ветра, термальной воды. Многие из этих видов энергии уже десятилетия используются на предприятиях. Другие весьма перспективны, но пока неэффективны из-за неразрешенных технологических проблем.

В развитых экономически странах, а также некоторых развивающихся государствах, чье сельское хозяйство переживает зеленую революцию, получили широкое применение технологии энергетической утилизации отходов биомассы. Биотехнология связана с разработкой и техническим решением методов биоконверсии солнечной энергии и биомассы в топливо и энергию, а также многие полезные вещества, в том числе кормовые добавки, удобрения. Основным источником сырья для биоэнергетики служат органические отходы, ежегодное

производство которых в России по всем отраслям народного хозяйства оценивается нами более чем в 204 млн. тонн по сухому веществу. В том числе отходы животноводства и птицеводства составляют 180 млн. тон, растениеводства - 70 млн. тонн, отходы при лесозаготовках и деревообработке - 30 млн. тонн, твердые бытовые отходы в городах и городских поселках, промышленности - 20 млн. тонн, осадки сточных вод - 4 млн. тонн, их переработка по существующим технологиям позволила бы получить ежегодно более 60 млн. т. у. т. Общий объем отходов животноводства и растениеводства в России - 150 млн. т по сухому веществу, из которых при полной их переработке можно получить 27 млрд. $м^3$ метана, или 45 млн. т. у. т.

В Дагестане отходы животноводства оцениваются нами в 400 тысяч тонн, растениеводства - в 300 тысяч тонн, городские отходы в 250 тысяч тонн. Потенциал утилизации составляет по республике более 300 тысяч т.у.т.

Переработка биомассы в топливо осуществляется по трем основным направлениям:

- первое: биоконверсия, или разложение органических веществ растительного или животного происхождения в анаэробных (без доступа воздуха) условиях специальными видами бактерий с образованием газообразного топлива (биогаза) и/или жидких топлив (этанола, бутанола и т.д.). К биоконверсии относится также получение тепловой энергии при аэробном микробиологическом окислении органических веществ, то есть компостирование и биоподогрев, что вынужден применять в условиях малоснежных зим Дагестана каждый огородник;

- второе: термохимическая конверсия (пиролиз, газификация, быстрый пиролиз, синтез) твердых органических веществ (дерева, торфа, угля) в "синтез - газ", метанол, искусственный бензин, древесный уголь. Эти направлением заняты только отдельные сельские предприниматели, поставляющие древесный уголь для городских шашлычников;

- третье: сжигание отходов (кизяк, щепа, жмых, лигнин) в котлах специальной конструкции, в печках и кострах. К этому направлению можно было бы отнести и сжигание дров в бытовых печах. Но дрова почему-то выведены из понятия биомассы, хотя одна шестая часть годового потребления топлива в мире приходится на древесину и около трети всех срубленных в регионе деревьев используется для приготовления пищи и отопления. Общее потребление древесного топлива, по-видимому, раза в три превышает уровень, который показывает республиканская статистика. Около половины населения горных районов Дагестана использует для приготовления пищи (а это 4/5 расходов энергии в домашнем хозяйстве) и отопления главным образом дрова. Еще 25% используют для этой цели кизяки и только районные центры обеспечиваются углем, или природным газом.

Первое направление использования биомассы (биоконверсия) связано с технологиями по переработке отходов сельскохозяйственного производства, твердых бытовых отходов городов и осадков городских сточных вод и промышленности. Это направление непосредственно участвует в решении трех основных проблем современного сельского хозяйства:

- экологической, поскольку обеспечивают предотвращение загрязнения почвы, воды и воздуха отходами животноводства и птицеводства;
- продовольственной, так как позволяют получить высококачественные удобрения (при анаэробном сбраживании азот и фосфор в навозе полностью сохраняются, а при традиционном вывозе навоза на поля теряется 30-40%), кормовые добавки и препараты;

- энергетической - через получение биогаза (70% метана и 30% углекислого газа, теплота сгорания 14650-25100 кДж/нм).

Однако это направление энергосбережения фактически застопорились в России на стадии экспериментов, тогда как в большинстве стран мирового сообщества уже давно используется в опытной эксплуатации около десяти крупных биоэнергетических установок (БЭУ) по переработке отходов животноводства и птицеводства отечественного и зарубежного производства. Из всех установок, сооруженных в России и во всех регионах, наиболее успешно работают БЭУ индивидуального исполнения в г. Пярну, Эстония (свинокомплекс на 54 тыс. голов, объем биореактора - 6000 $м^3$) и БЭУ совхоза "ОГРЕ" в Латвии (свиноферма на 3 тыс. голов, объем биореактора - 150 м).

По разработке НПО "КТИСМ" (теперь это Украина) Щумихинский машиностроительный завод (теперь это Казахстан) изготовлял био-энергетическую установку "КОБОС-1", предназначенную для установки на средних фермах (400-500 голов КРС). Эта установка после двух лет испытаний была принята к серийному производству.

В комплект установки входят: измельчитель навоза, подогреватель-выдерживатель объемов 25 $м^3$, два горизонтальных метатенка (биореактора) объемом по 125 $м^3$ каждый, газгольдер, водогрейный котел, насосы, теплообменники, система контроля и управления процессом, трубопроводы, вспомогательная арматура.

Технологический процесс на комплекс "КОБОС" позволяет получить биогаз с теплотой сгорания 14650-25100 кДж/$нм^3$ (92-96 тыс. кДж/кг) или в объеме 2 $м^3$ биогаза с одного кубометра объема биореактора в сутки, из которого 25-40% используется на нужды самой установки, а остальной газ - для нужд хозяйства. В зарубежных установках этот "лишний" газ используется для работы дизель-генератора, переделанного для работы на газе. В "КОБОСе" это было предусмотрено лишь на бумаге, поэтому на многих действующих установках лишний газ выпускается в атмосферу.

НПО им. Фрунзе г. Сумы была разработана примерно аналогичной конструкции установка БЭУ-202. Обе установки нуждались не в такой уж большой доработке. Но необходимость доработки отдельных узлов не является главной причиной полного срыва программы выпуска биоэнергетических установок - при задании в 2007-2009 гг. выпустить 240 установок было изготовлено в полном комплекте около 10 штук, а в настоящее время их выпуск в России полностью прекращен по причине сельскохозяйственного кризиса. Причина срыва в том, что первоначальная оптовая цена установки "КОБОС" - 170 тыс. руб. - поднялась к 2010 г. до 350 тыс. руб., а полная цена проекта с учетом строительства - до 1 млн. руб. В современных ценах стоимость установки составит млн. рублей и строительства еще 2 млн. руб. Такая стоимость сооружения одной установки оказалась не под силу в наше время даже наиболее экономически крепким акционерным обществам, колхозам и совхозам. Для внедрения БЭУ государству нужно было бы оплатить по крайней мере 50% от общей стоимости, чего сделано не было. Хотя деклараций о необходимости помощи селу хватает и в наше время, тем не менее, внедрение биоэнергетических установок в отдаленных труднодоступных селах помимо экологического эффекта позволяет отказаться от прокладки гораздо более дорогих магистралей газоснабжения в эти горные районы.

Наряду с совершенствованием указанных установок в 2002 г. Филиалом объединенного института высоких температур РАН в г. Махачкале разработаны

установки:

- Биогазовый комплекс с теплицей 2 реактора по 30м$^2$ с суточным выходом метана 400м$^3$, созданы аккумуляторы тепла на фазопереходных материалах для стабилизации температуры в биореакторах.
- Биогазовые комплексы в Каякентском МО 2 реактора по 28м$^3$ и Сергокалинском МО по 30м$^3$ с выходом по 250м$^3$ газа, 1 тонны удобрения в сутки.

Проекты выполнены при финансовой поддержке «Фонд Устойчивого Развития» Агентства USD 2008г согласно республиканской программе развития возобновляемых источников энергии в 2009г. было тиражировано создание комплексов по биоконверсии отходов АПК в трех объектах Республики Дагестан. В проект включено 15 объектов до 2020 г.

Созданы биореакторы для индивидуальных потребителей от 2м$^3$ до 10м$^3$ в модульном исполнении, что позволяет компоновать по необходимым объемам.

Что касается второго направления использования биомассы - термохимической конверсии, то следует указать работы, ведущиеся по программе "Экологически чистая энергетика" по отработке технологии и созданию серийного производства термических газогенераторов для переработки древесных отходов в газообразное топливо:

- установка циклонного типа с использованием полифракционных материалов тепловой мощностью от 100 кВт до 3 МВт с КПД до 70% при влажности сырья 60% (система "Циклон");
- установка с газогенератором внешнего обогрева для получения газов с высокой теплотой сгорания и синтез-газа из отходов биомассы тепловой мощностью 1 кВт с КПД 65% при влажности сырья 60% (система "Термолизатор"). В 1995 году осуществлен ввод работы по созданию малых газогенераторных установок на отходах лесопереработки мощностью 16 и 4 кВт. Одновременно создавалась теплоэлектрическая установка на биогазе мощностью 100 кВт (АКХ им. Памфилова, ВИЭСХ, "Экозащита"), газогенераторные электрические установки мощностью 16 кВт (ВИЭСХ) и 4 кВт (МАИ). В 2006году осуществлен ввод этих установок в опытную эксплуатацию.

Третье направление - сжигание отходов. Мы пользуемся в основном зарубежными котлами и электрическими станциями, работающими на отходах лесопиления и деревообработки в Финляндии, Швеции, Китай, Канаде и других странах.

Между тем в Дагестане утвержден проект разработке региональной программы «Отходы Республики Дагестан на период 2009-2013гг.» Целью Программы является решение комплекса вопросов по сбору, размещению, утилизации, переработке и вовлечению в хозяйственный оборот отходов производства и потребления, снижению их негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения Республики Дагестан

Но в этом направлении требуется провести анализ существующих разработок, отечественного и зарубежного опыта и принять обоснованные решения по направлениям дальнейших работ.

Другим потенциальным местным источником энергии для сельского хозяйства Дагестана является энергия ветра.

Первый в мире ветроагрегат мощностью 100 кВт был построен в нашей стране в 1931 г. и проработал до Отечественной войны. Но страна не сумела закрепить успех и тем более выйти на серийное производство мощных ветроагрегатов. И только в конце 80-х годов за разработку ветроустановок (ВЭУ)

всерьез взялись предприятия оборонного комплекса, что явилось определенной гарантией технического уровня разработок и качества исполнения, но последовавшая приватизация и конверсия лишили большинство заводов лучших специалистов.

В то же время существующий дефицит топливо-энергетических ресурсов заставляет сельскохозяйственных руководителей искать пути повышения надежности энергоснабжения. Сооружение ветроустановок в комбинации с другими энергоисточниками является одним из реальных путей решения этой проблемы в Дагестане.

Для продвижения новых технических разработок в производстве и на рынок нужна финансовая поддержка работ со стороны Минтопэнерго РФ и Миннауки РФ. Хотя следует оговориться, что поддержка этих министерств должна быть, прежде всего, в организационной и маркетинговой отраслях. В принципе это технологическое начинание могло бы поддержать и Правительство РД, как в свое время успешно поддержало продвижение в сельское хозяйство технологии капельного орошения.

**Литература:**

1. *Фортов В.Е., Шпильрайн Э.Э.* Энергия и энергетика// Москва, изд-во «Бунос», 2007.
2. *Шпильрайн Э.Э.* Экологические аспекты применения возобновляемых источников энергии для децентрализованного энергоснабжения // Перспективы энергетики т. 6. №3, 2006, 299-305 стр.
3. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика // под редакцией В.Е. Фортова. Москва ФИЗМАТЛИТ, 2010.
4. *Магомедова Н.А.* Социально–экономические аспекты использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Вестник молодых учёных Дагестана. Издательский центр «СМУД». 2003. С 93.
5. *Магомедова Н.А., Цапиева О.К.* Ресурсы и эффективность использования солнечной энергии в Республике Дагестан // Санкт-Петербург, Политехника-2008. С- 122.
6. *Магомедова Н.А.* Возобновляемая энергетика как фактор устойчивого развития региона (на примере РД) // Региональная экономика: теория и практика – Москва, 2009, №43.

# КЕПРОК ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ: ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ НА ПРИМЕРЕ МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРОГИДРОТЕРМ (КАМЧАТКА)

Павлова В.Ю.

*ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН;*
*Петропавловск-Камчатский, Россия; 683002, ул.Савченко 11/55, e-mail: sacura17041988@mail.ru*

За рубежом под кепроком (от английского “cap” — шапка, “rock” — порода) часто понимают вообще породы, независимо от их состава и происхождения, играющие роль непроницаемой покрышки для нефтяных и газовых залежей [3]. Кепрок геотермальной системы - это слой пород с низкой проницаемостью, который перекрывает проницаемые породы резервуара [8]. Он может служить как барьер для циркуляции конвекционных потоков и, как теплоизолятор, тем самым способствующий увеличению температуры в геотермальной системе. Толщина кепрока может меняться, например, в геотермальном месторождении Salton Sea, толщина кепрока переменная и, как правило, толстая (около 700 м) в северной части месторождения и тонкая (около 250 м) в южной части [9].

Facca и Tonani (1967) показали, что горячая вода, циркулирующая в гидротермальной системе, может привести к изменению и осаждению частиц в кепроке и, следовательно, может снизиться его проницаемость. Таким образом, геотермальная система может самоуплотняться, а также производить и восстанавливать кепрок [7].

На термальных полях, при значительном развитии метасоматической трещиноватости и трещин гидроразрыва над паровыми резервуарами, кепрок отсутствует. В кальдерах, выполненных пористыми осадками, первичный кепрок также отсутствует, но система сама создает кепрок путем кольматации (Йеллустоун, Ксудач, Узон - Камчатка).

Наиболее идеальные геологические условия и среда для формирования парогидротерм - это наличие кепрока, продуктивного водоносного горизонта и водоносного кепрока как показано на рис. 1 [10].

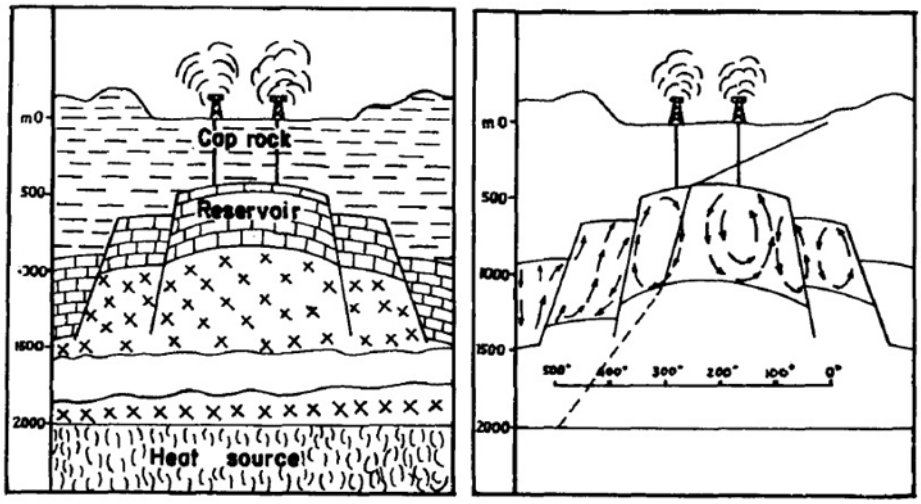



Рис.1. Схема идеального геотермального поля согласно Tonani и др., 1964

Стоит отметить, что парогидротермы обычно приурочены к надинтрузивным зонам крупных магматических комплексов, расположенных в

депрессионных структурах коры на пересечении региональных проницаемых дуговидных или радиально-концентрических зон с линейными разломами (Мутновская, Паужетская, Кошелевская и др. системы, Камчатка).

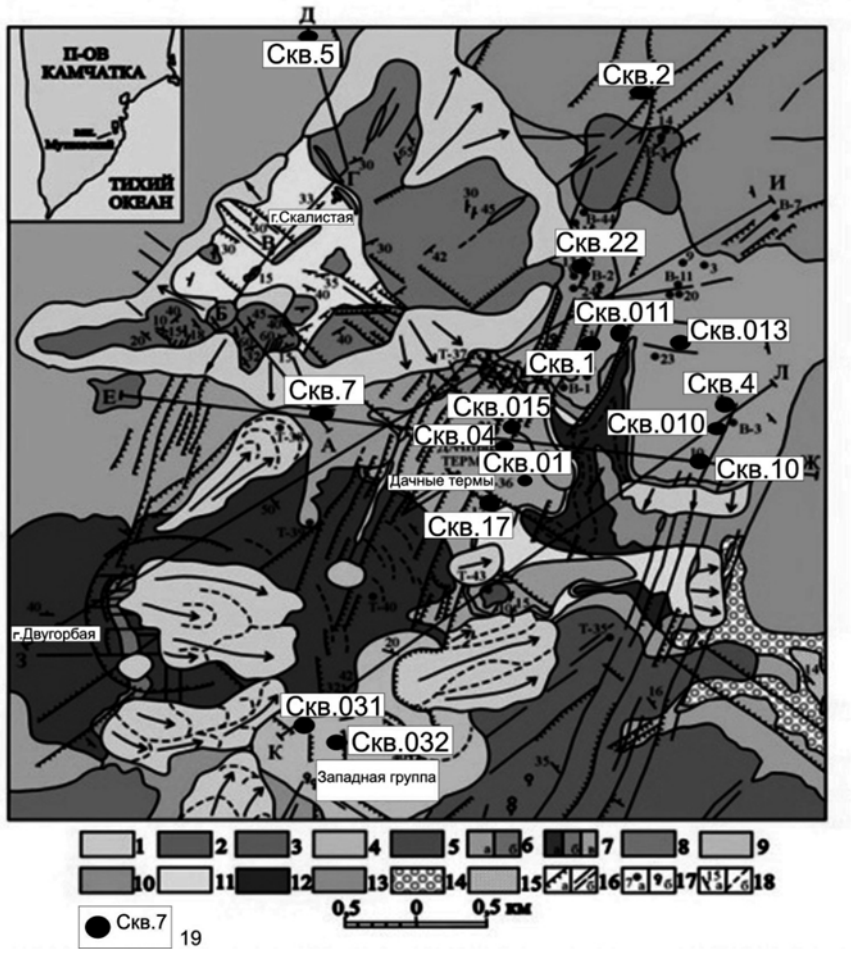



Рис.2. Схематическая геологическая карта района Мутновского месторождения парогидротерм (составлена с использованием материалов О.Н.Егорова, Е.Н.Гриб, Б.П.Чумака и данных буровых работ, автор В.Л. Леонов [6])

Условные обозначения: 1 - обвально-осыпные отложения ($Q_4$); 2 - пемзовые туфы перевалов ($Q_4$); 3 - риолиты поздней фазы кислого вулканизма вулкана Скалистого($Q_3^4$); 4 - базальты Дайковой серии и вулкана лоского ($Q_3^{3-4}$); 5 - базальты, андезито-базальты, андезиты вулкана Мутновского ($Q_3^{3-4}$); 6 - игнимбриты трещинных ареальных извержений и вулкана Горелого (второй фазы) (а) и пемзовые туфы района Дачных терм (б) ($Q_3^{2-3}$); 7 - андезиты, дациты, риолиты (а), базальты (б), их туфы и туфобрекчии (в) вулка Двугорбого ($Q_{2-3}$); 8 - андезиты, дациты, риолиты ранней фазы кислого вулканизма вулкана Скалистого ($Q_{2-3}$); 9 – базальты, андезито-базальты, их туфы и туфобрекчии вулкана Скалистого ($Q_{2-3}$); 10 - базальты, их туфы и туфобрекчии вулкана Пальчик ($Q_{2-3}$); 11 - промежуточный комплекс туфоконгломератов, туфов и туфобрекчий ($Q_{2-3}$); 12 – игнимбриты вулкана Горелого (первая фаза) ($Q_{2-3}$); 13 - базальты, андезито-базальты, андезиты, их туфы и туфобрекчии вулкана Жировского ($Q_l$); 14 - туфы, спекшиеся туфы, туфобрекчии риолито-дацитового состава ($N_1^3$-$N_2$); 15 - туфобрекчии, туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты с прослоями лав базальтового состава ($N_1^{1-2}$); 16 - разрывные нарушения с установленным вертикальным смещением (а), трещины (б); 17 - разведочные скважины (а), термопроявления (б); 18 - элементы залегания пород (а), маркирующие границы

внутри стратиграфических подразделении (б); 19 – скважины для обработки каротажных диаграмм.

**Мутновское месторождение парогидротерм.** Изучение района началось во второй половине XIX века. Исследования, относящиеся непосредственно к Мутновскому месторождению парогидротерм, проведены в течение последних 30 лет. В процессе проведения предварительной разведки (Камчатская гидрогеологическая экспедиция (ГГЭ) ПГО "Сахалингеология") месторождения был выполнен ряд опытных и опытно–технологических исследований, связанных со спецификой проводки скважин в сложных горно–геологических условиях (высокая температура и пластовое давление, открытая трещиноватость). До 2000 г. силами ГП "Мутновка" (старое название Камчатская ГГЭ) на месторождении проводился комплекс работ, связанный с ликвидацией скважин не пригодных для эксплуатации и наблюдений, испытание скважин потенциально пригодных к эксплуатации и реинжекционных скважин, а также эпизодический мониторинг за состоянием теплоносителя (основные параметры).

Рельеф района представляет собой вулканическое нагорье с отметками 600-900 м. Склоны гор крутые, углы наклона достигают $40^0$ и больше, расчленены глубокими и многочисленными каньонами. Территория месторождения протягивается на 10 км в северном направлении от подножия действующего вулкана Мутновского. Его естественной западной границей служат частично разрушенные постройки вулканов г. Двугорбая и г. Скалистая, а восточной – склоны древнего Жировского вулканического массива. Наиболее выделяющимися возвышенностями являются действующие вулканы: Мутновская сопка – абсолютная отметка 2323 м и Горелая сопка – 1828,8 м, а также серия скалистых образований, проходящая в субмеридиональном направлении, начиная от верховьев р. Жировой к вулкану Мутновскому. Эта цепь гор является водоразделом на этом участке, имеет высоту от 1300 до 1700 м.

На территории Мутновского месторождения парогидротерм верхние горизонты разреза сложены главным образом экструзивными и пирокластическими породами от андезито-дацитового до липаритового состава средне- и верхнеплейстоценового возраста. На юге эти отложения перекрыты молодыми основными лавами и пирокластикой склонов вулкана Мутновского, на востоке и северо-востоке они прилегают к склонам древнего вулканического массива, сложенного нижнеплейстоценовыми лавами и туфами основного состава. В центральной части месторождения на поверхность выведен сложный фациально-изменчивый комплекс экструзивных, пирокластических и озерно-осадочных пород от базальтового до липаритового состава. По всей периферии они перекрыты маломощными спекшимися игнимбритами местных эруптивных центров (рис. 2, [6]). Район месторождения является ареной многоэтажного базальтового, андезито-базальтового и кислого вулканизма и длительной гидротермальной деятельности. На небольшой площади, всего несколько десятков квадратных километров, сосредоточены разновозрастные и разнотипные вулканические постройки, контрастные по составу дайки, обширные участки гидротермально измененных пород, современные термопроявления. Все это свидетельствует об аномальном перегреве недр и длительном существовании разноглубинных магматических очагов.

Гидрогеологическая обстановка, определяющая условия инфильтрационного питания гидротермальной системы, циркуляции и разгрузки гидротерм, характеризуется большим количеством (около 3000 мм/год) атмосферных осадков, высокой проницаемостью покровных пород в зоне

выветривания и очень низкой проницаемостью пород остальной части разреза, рассеченностью рельефа, наличием развитой сети мощных зон тектонической трещиноватости. Современные поверхностные термопроявления на Мутновском месторождении приурочены к узлам пересечения наиболее мощных дизъюнктивных зон двух или более направлений.

Современные гидротермальные процессы в районе проявляются фумарольной деятельностью вулкана Горелый и Мутновский, термальными полями и парогидротермами Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоны. Термальные поля и парогидротермы Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоны представлены 7 основными группами, из которых: 4 – термопроявления Дачные, Северо-Мутновские, Верхне-Мутновские, Верхне-Жировские (все они приурочены к площади Мутновского месторождения парогидротерм) и 3 основных группы источников. Дачные и Северо-Мутновские источники наиболее крупные очаги разгрузки парогидротерм. Поисковые и разведочные скважины прошли четвертичные и плиоцен-миоценовые отложения, а отдельные скважины достигли пород олигоцена. Скважины вскрыли теплоносители высоких параметров с максимальной температурой $280^0$С. Скважины выводят с глубин от 60 до 800 м паровыводящую смесь верхней пароконденсатной зоны месторождения. Скважины №1 и №18 вскрыли на глубинах около 1000 м водный глубинный резервуар с температурой более $270^0$С. Газонасыщенность вод глубинного резервуара низкая. Видоизмененные аналоги глубинных вод разгружаются в долинах рек Жировой и Мутновской. В сопоставление стратиграфических подразделений, принятых в работах различных авторов, все исследователи едины в разделении дочетвертичных пород в районе на два комплекса - доверхнемиоценовый и верхнемиоцен-плиоценовый [1, 2, 5, 11, 12].

Площадные геофизические исследования в пределах Мутновского геотермального района проводятся с 1958 г., когда была выполнена аэромагнитная съемка масштаба 1:200 000 южной половины полуострова Камчатка. В последующие годы проводились региональные геофизические съемки масштаба 1:100 000–1:50 000. С 1974 г. в этом районе ведутся поисковые геофизические работы на золоторудных проявлениях, и с 1978 г. – на геотермальных объектах [13]. На Мутновском месторождении парогидротерм проводились многочисленные геофизические исследования (магнитная и гравиметрическая съемка в масштабах 1:25000, аэрогеофизические исследования, сейсморазведка методом МОВЗ, магнитотеллурическое зондирование и т.д.), однако детальная комплексная и количественная интерпретация геолого-геофизических данных для этого месторождения выполнена не была. Существенный прорыв в изучении месторождения произошел после повторения в последние годы работ по исследованию электрических полей на месторождении (Нурмухамедов, Чернев и др., 2010). Эти результаты позволили впервые построить трехмерную модель месторождения, однако разрешающая способность метода не дает возможности получить детальную характеристику строения кепрока резервуара.

Стоит отметить, что месторождение находится в зоне отрицательного значения ΔТ. Положительные аномалии ΔТ связаны с современными вулканическими постройками и интрузиями. Характерно пониженное значение Δg с гравитационными ступенями, приуроченными к тектоническим разломам.

Предлагаемые разными авторами модели Мутновского месторождения парогидротерм (например, представленные в работах Белоусова В.В.; Вакина Е.А., Пилипенко Г.Ф., 1979; Кирюхина А.В., Делеменя И.Ф., Словцова И.Б., 1997;

Леонова, 1989 и др.) имеют некоторые различия, что усложняет выбор оптимальной модели строения этого месторождения для дальнейшего проведения его разведки и эксплуатации. В настоящее время в основу геологоразведочных работ на месторождении заложены представления о том, что основные ресурсы термальных вод определяются наличием трещинных проницаемых зон (продуктивные зоны) в геотермальном резервуаре трещинно-порового типа [5].

Цель исследований заключается в изучении строения кепрока с использованием методов геофизических исследований в скважинах. Актуальность такой постановки обусловлена тем, что отбор керна и шлама производился не во всех из пробуренных на месторождении нескольких десятков глубоких (от 1 до 2,5 км) скважин. Использование данных каротажа скважин позволяет восполнить недостаточность геологических данных.

Значимость работы:

Научная: изучение кепрока любого геотермального месторождения является одной из важнейших задач геологии геотермальных полей и геотермии.

Прикладная: понимание строения кепрока геотермального резервуара позволяет более эффективно осуществлять эксплуатацию содержащегося в нем теплоносителя.

Геотермальный резервуар Мутновского месторождения парогидротерм имеет площадь 8-10 км$^2$ и расположен на глубине 200-300 м. Имеются малопроницаемые перекрывающие (кепрок) и подстилающие (бедрок) резервуар породы.

Бедрок представлен разновозрастными ($K_2$-$N_1$) плотными песчаниками и метаморфическими породами, реже – лавами и их туфами. Именно в бедроке Камчатки и других регионов (Хачубару в Японии, Тонгонан и Палинпион-Пухаган на Филиппинах и т.д.) расположены апикальные зоны интрузий, с которыми связано формирование радиально концентрических проницаемых зон.

Кепрок сложен разновозрастными лавами, плотными туфами и игнимбритами ($N_1$-$Q_4$) и разбит серией термовыводящих разрывных нарушений, но может пересекаться и несколькими пологими проницаемыми зонами. Важной составляющей кепрока являются высокопроницаемые образования. По ним происходит локальная разгрузка термальных вод. Чаще это типично для систем с преобладанием поровой проницаемости над трещинной (Паужетка на Камчатке, Вайракей в Новой Зеландии). На Мутновском месторождении парогидротерм кепрок представлен малопроницаемыми для термальных вод игнимбритами и лавами, хотя нередки участки с развитием зон кольматации пор и трещин монтмориллонитовыми глинами.

**Общий результат.** По результатам каротажных исследований можно выделить два четко различающихся комплекса пород. Приповерхностная часть резервуара сложена плейстоценовыми игнимбритами и игнимбритоподобными туфами дацитов с прослоями лав. Эти породы выпадают лишь в разрезе скважины № 2, расположенной в северной периферии участка. В остальных скважинах средняя мощность отложений 100 м, увеличивается от скважины № 10 к скважине № 5 в направлении с востока на северо-запад. С нашей точки зрения, это подтверждает имеющиеся представления о приуроченности Дачных терм к субмеридиональному грабену. Собственно геотермальный резервуар сложен на рассматриваемой территории (и в пределах изученной части разреза) верхнеплиоценовыми лавами и туфами андезито-базальтов, базальтов, андезитов, с туфами того же или смешанного состава. Увеличение мощности происходит в направлении от скважины № 7 к скважинам № 22 и 2 в направлении с юго-запада

на северо-восток. На наш взгляд, эта тенденция отражает нахождение на северо-востоке погруженной части крупной депрессии, в которой происходило накопление в позднем плиоцене вулканитов, источники которых располагались по её обрамлению.

**Литература:**

1. *Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф.* Мутновский геотермальный район на Камчатке // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М., 1979, с.36-46.
2. *Вакин Е.А., Леонов В.Л., Овсянников А.А.* Мутновский геотермальный район // Активные вулканы и гидротермальные системы Камчатки. Путеводитель науч. экскурсий. П.-К., 1985, с.164-198.
3. Геологический словарь. М.: Недра. 1973.
4. *Делемень И.*Ф. Кольцевые структуры как индикаторы глубинного строения современных гидротермальных систем Камчатки. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 1998, 44 с.
5. *Кирюхин А.В., Гусев Д.Н., Делемень И.Ф.* Высокотемпературные гидротермальные резервуары. М., 1991, 160 с.
6. *Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М., 1989.
7. *Batzle M. L. and Simmons G.* Microfractures in rocks from two geothermal areas, Earth Plant. Sci. Lett., 30, 1976, pp. 71-93.
8. *Facca G. and Tonani F.,* The self-sealing geothermal field, Bull. Volcano! 30, 1967, p. 271.
9. *Randall W.* An analysis of the subsurface structure and stratigraphy of the Salton Sea geothermal anomaly, Imperial Valley, California. Ph.D. Thesis, University of California, Riverside, Calif. (unpublished), 1974.
10. *Zen M. T.* Geothermy and its future in Indonesia. Proceedings ITB Vol. 7, №1, 1973, pp. 30-32.

**Фондовая:**

11. *Блукке П.П., Асаулова Н.П., Остапенко С.В.* Отчет о результатах предварительной разведки на участке Дачном Мутновского месторождения парогидротерм с подсчетом запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди геотермальной электростанции мощностью 50 МВт. ПГО “Сахалингеология”. 8 книг. 1987. Приложение № 37,40, 42, 45, 57.
12. *Сугробов В.М., Набоко С.И., Словцов И.Б. и др.* Отчет по теме: Минералого-петрографическое описание скважин Мутновского месторождения парогидротерм. П-К. 1988. 257 с.
13. *Чернев И.И.* Пакет геологической информации по Мутновскому месторождению парогидротерм (пояснительная записка). П.-К. 2003. 111 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СОЛНЕЧНОГО PVT КОЛЛЕКТОРА И ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ, ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

Джаннаталиев Расим

*University of Applied Sciences Stuttgart;*
*Stuttgart, Germany; Schellingstr. 24, 70174; e-mail: rasimbaku@yahoo.com*

В 21 веке мир столкнулся с глобальной экологической проблемой. Все это связанно с тем, какие виды топлива используются в разных сферах производства и для бытовых целей. Для того чтобы улучшить экологию земного шара и привести к минимуму экологическое загрязнение, ведущие страны мира стараются переходить на экологический чистый вид топлива.

В данной работе использованы два вида возобновляемой энергии в комбинации. Хотел бы обратить внимание только на солнечную и геотермальную энергии.

Экспериментальная установка состоит из двух основных узлов: солнечный PVT коллектор и геотермальный тепловой насос. Солнечный PVT коллектор производит электроэнергию и тепло. Использование комбинированного солнечного коллектора целесообразно и эффективно. Так как, в обычных солнечных коллекторах всего лишь 30% получаемого солнечного излучения расходуется для получения тепла, а 70% остаётся неиспользуемым. Второе преимущество комбинированного солнечного коллектора это то, что в летнее время года тепло отбирается из коллектора и передается испарителю геотермального теплового насоса. Это увеличивает КПД (COP) получения электроэнергии от солнечного PVT коллектора. Электроэнергия, вырабатываемая солнечным PVT коллектором, подаётся на компрессор геотермального теплового насоса. Тепло производимое солнечным коллектором подаётся на испаритель геотермального теплового насоса.

Комбинированная установка работает в двух режимах: отопление и кондиционирование. В Зимнее время года установка работает на отопление зданий, а также горячее водоснабжение. В летнее время года экспериментальная установка работает на кондиционирование зданий. В летнее время года «рассол» из скважины подаётся прямо в жилое помещение для охлаждения зданий. Преимуществом гибридной установки являться то, что с помощью солнечного PVT коллектора одновременно можно получать тепло и электроэнергию. Ещё одним преимуществом установки является то, что ее можно использовать как автономно, так и совместно центральной с энергосетью. Учитывая выше сказанное, это должно повысить КПД (COP) экспериментальной установки. Комбинированная установка может сама полностью покрывать собственные нужды в электричестве, за счёт использования электричества полученного от солнечного PVT коллектора. Если принять во внимание общий потенциал приведённой экспериментальной установки, то это позволит сэкономить огромное количество органического топлива и уменьшит выброс $CO_2$ в атмосферу.

**Литература:**

1. *K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang.* Advances in heat pump systems: A review. Applied Energy 87 (2010) p. 3611-3624.

2. *H. Yang, P. Cui, Z. Fang*. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. Applied Energy 87 (2010) p. 16–27.
3. *Hepbasli, Y. Kalinci*. A review of heat pump water heating systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) p. 1211–1229.
4. *Zongwei Han, Maoyu Zheng, Fanhong Kong, Fang Wang, Zhongjian Li, Tian Bai*. Numerical simulation of solar assisted ground-source heating system with latent heat energy storage in severely cold area. Applied Thermal Engineering 28 (2008) p. 1427–1436.
5. *Guiyin Fang, Hainan Hu, Xu Liu*. Experimental investigation on the photovoltaic-thermal solar heat pump air-conditioning system on water-heating mode. Experimental Thermal and Fluid Science 34 (2010) p. 736–743.
6. *Kadir Bakirci, Omer Ozyurt, Kemal Comakli, Omer Comakli*. Energy analysis of a solar-ground source heat pump system with vertical closed-loop for heating apllications. Energy 36, (2011) p. 3224-3232.
7. *Yuehong Bi, Tingwei Guo, Liang Zhang, Lingen Chen*. Solar and ground source heat-pump system. Applied Energy 78 (2004) p. 231-245.
8. *H.Z. Abou-Ziyan, M.F. Ahmed, M.N. Metwally and H.M. Abd El-Hameed*. Solar-assisted R22 and R134a heat pump system for low-temperature applications. Applied Thermal Engineering Vol. 17, No. 5, (1997) p. 455-469.
9. *V. Trillat-Berdal, B. Souyri, G. Fraisse*. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors. Energy and Buildings 38 (2006) p. 1477-1484.
10. *B.J. Huang, J.H. Wu, H.Y. Hsu, J.H. Wang*. Development of hybrid solar-assisted cooling/heating system. Energy Conversion and Management 51 (2010) p. 1643-1650.
11. *Y.H. Kuang, R.Z. Wang, L.Q. YU*. Experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply. Energy Conversion and Management 44 (2003) p. 1089-1098.
12. *Onder Ozgener, Arif Hepbasli*. Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study. Building and Enviroment 40 (2005) p. 1040-1050.
13. *Xudong Zhao, Xingxing Zhang, Saffa B. Riffat, Yaxin Su*. Theoretical study of the performance of a novel PV/e roof module for heat pump operation. Energy Conversion and Management 52 (2011) p. 603-614.
14. *Liu Keliang, Ji Jie, Chow Tin-tai, Pei Gang, He Hanfeng, Jiang Aiguo, Yang Jichun*. Performance study of a photovoltaic solar assisted heat pump with variable-frequency compressor – A case study in Tibet. Renewable Energy 34 (2009) p. 2680-2687.
15. *Ji Jie, Liu Keliang, Chow Tin-tai, Pei Gang, He Wie, He Hanfeng*. Performance analysis of a photovoltaic heat pump. Applied Energy 85 (2008) p. 680-693.

# КОМБИНИРОВАННЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНО-БИОГАЗОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Алхасов Б.А., Алхасова Д.А.

*ФГУБН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия;367030, пр-т И.Шамиля 39а;*

Предложена комбинированная технология освоения гидрогеотермальных ресурсов и биомассы, позволяющая вне зависимости от климатических условий в непрерывном режиме эксплуатировать геотермальные скважины и с высокой эффективностью утилизировать отходы биомассы.

Для надежного энергоснабжения потребителей перспективными являются технологические системы, использующие два и более вида ВИЭ. В Северокавказском регионе имеются практически все виды ВИЭ, коммерческая эксплуатация которых может значительно улучшить экономическую и экологическую ситуацию и улучшить социальные условия жизни значительного числа населения [1]. Экономический потенциал различных возобновляемых энергетических ресурсов позволит в перспективе обеспечить до 50 % энергоснабжения региона.

Наиболее освоенными являются геотермальные ресурсы, где в течение многих лет накоплен опыт практического их использования, более 500 тыс. человек в регионе используют геотермальное тепло в коммунально-бытовом секторе, сельском хозяйстве и промышленности. В последние годы наращиваются темпы ввода в эксплуатацию малых ГЭС, остальные ВИЭ практически не осваиваются несмотря на их значительные ресурсы.

Огромные возможности имеются в регионе по освоению биомассы, что позволит одновременно решить многие энергетические и экологические проблемы. Только в Дагестане экономический потенциал ресурсов биомассы составляет до 560 тыс. т у.т./год, из которых на органические отходы животноводства приходится 336 тыс. т у.т./год [2].

Биогазовые установки ИБГУ-1 и БИОЭН-1, выпускаемые в России, можно успешно внедрять в регионе для утилизации органических отходов. Масштабная реализация технологий на основе таких установок позволит одновременно решить ряд проблем: санитарно-экологическую (ликвидация и обеззараживание отходов); энергетическую (получение биогаза и, следовательно, теплой и электрической энергии); агрохимическую ( получение высокоэффективных органических удобрений); социальную ( улучшение условий труда и быта населения, увеличение урожайности сельскохозяйственных культур при сокращении применения химических удобрений).

Передовыми являются технологии переработки биомассы, основанные полностью на ВИЭ, где тепло и электроэнергия, используемые при переработке, получены от возобновляемых энергоресурсов. Одним из них является комбинированная технология переработки органических отходов с использованием геотермальной энергии (рис. 1). Термальная вода от добычных скважин поступает в геотермальный центральный тепловой пункт (ГЦТП), из которого часть воды подводится в резервуар для приготовления сырья и в биореакторы (метантенки) для поддержания в них необходимого температурного режима, остальная высокотемпературная вода направляется в блок комбинированной геотермально-парогазовой электростанции (ГПЭ). В резервуаре

за счет термальной воды производится увлажнение органических отходов, далее сырье подается в метантенки. В метантенках происходит процесс анаэробного сбраживания органических отходов при термофильном режиме. Образующийся биогаз из метантенков скапливается в газгольдерах, откуда направляется в газотурбинную установку (ГТУ) для сжигания. В блоке ГПЭ термальная вода используется только для нагрева низкокипящего рабочего тела до температуры испарения при соответствующем давлении [3]. Испарение и перегрев рабочего агента осуществляется за счет отработанных выхлопных газов, поступающих из ГТУ. Отработанная термальная вода из блоков конверсии биомассы и ГПЭ поступает на насосную станцию для закачки по нагнетательным скважинам в материнский пласт.

В зависимости от мощности энергосистемы и температуры термальной воды в технологическую схему могут быть включены блоки, потребляющие низкопотенциальное тепло отработанной воды (подпочвенного обогрева грунта, рыборазводный и др.).

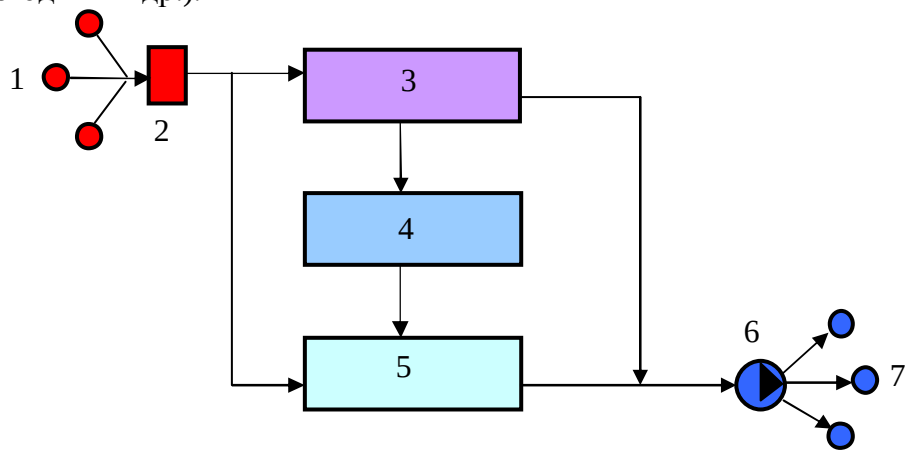



Рис.1. Схема геотермально-биоэнергетического комплекса (1 – геотермальные добычные скважины; 2 – геотермальный центральный тепловой пункт; 3 – блок по переработке биомассы; 4 – газотурбинная установка; 5 – геотермально-парогазовая электростанция; 6 – насосная станция закачки отработанной термальной воды; 7 – нагнетательные скважины)

В обычных биогазовых энергоустановках по переработке органических отходов до 30 % полученного биогаза расходуется на собственные нужды для поддержания необходимого в реакторах температурного режима. В предлагаемой комбинированной технологии для поддержания такого режима используется термальная вода, что позволяет весь полученный биогаз использовать для получения электроэнергии и тепла. Кроме того, в такой технологии геотермальные скважины эксплуатируются круглогодично в непрерывном режиме, что способствует улучшению экономических показателей геотермального производства.

В геотермально-биогазовых энергосистемах для получения электроэнергии успешно можно использовать термальные воды температурой 80 – 100 $^{o}$C, которые считаются малопригодными в технологиях бинарных ГеоЭС.

Одним из важных направлений исследований является изучение влияния микрокомпонентного и минерального состава термальных вод на процесс переработки органических отходов, что позволит подбирать оптимальный химсостав вод, способствующий максимальной интенсификации сбраживания отходов и наибольшему выходу биогаза из единицы продукции.

На рис.2 приведена принципиальная схема геотермально-биогазовой энергетической установки. Термальная вода используется для приготовления

сырья в резервуаре 2, поддержания необходимого температурного режима в метантенке 3 и для нагрева низкокипящего рабочего агента до температуры насыщения в теплообменнике 12. Нагретый рабочий агент из теплообменника подводится в испаритель 11, куда также поступают отработанные в газовой турбине высокотемпературные газы.

Потенциал среднепотенциальных геотермальных ресурсов Северокавказского региона огромен, в настоящее время используется очень малая часть этого потенциала. Реализация геотермально-биогазовых технологий позволит значительно увеличить объемы используемых геотермальных ресурсов и одновременно решить проблему эффективной утилизации отходов биомассы, загрязняющих значительные прилегающие земли и водоемы.

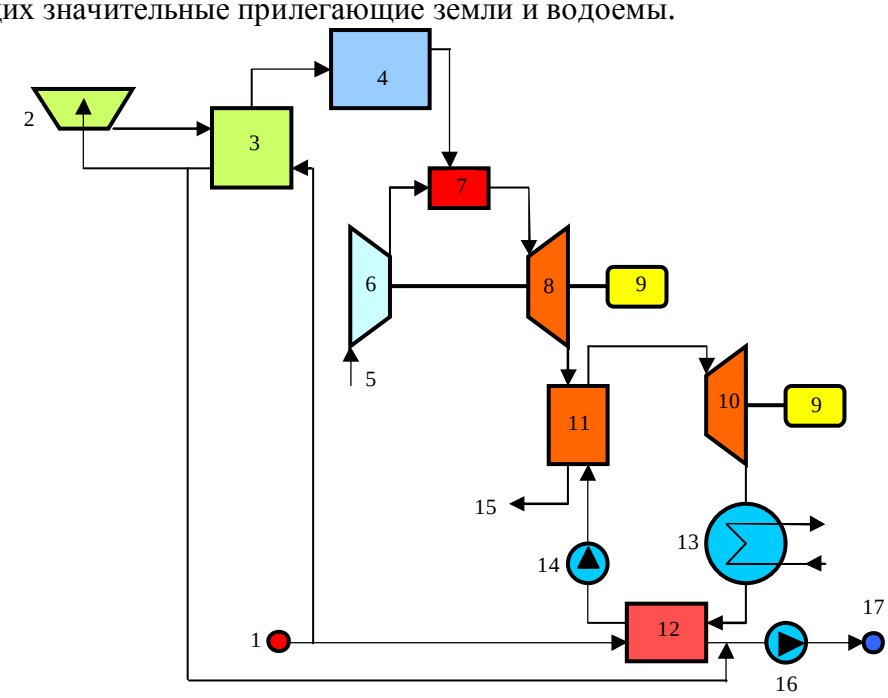



Рис.2. Принципиальная схема комбинированной геотермально- биогазоой энергоустановки ( 1 – геотермальная скважина; 2 – резервуар для подготовки сырья; 3 – метантенк; 4 – газгольдер; 5 – подвод воздуха; 6 – компрессор; 7 – камера сгорания; 8 – газовая турбина; 9 – генератор; 10 – паровая турбина; 11 – испаритель; 12 – теплообменник-нагреватель; 13 – конденсатор; 14 – циркуляционный насос паросилового цикла; 15 – выхлоп; 16 – насосная станция закачки; 17 – нагнетательная скважина)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00371-а).

**Литература:**

1. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М., Физматлит, 2010. 256 с.
2. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / под ред. П.П. Безруких, М., ИАЦ Энергия, 2007. 272с.
3. *Алхасова Д.А., Алхасов Б.А.* Использование среднепотенциальных геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии // Материалы 2 Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2010. с. 233 – 238.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВАЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ДАГЕСТАНА

Камилова А.М.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; пр-т И.Шамиля 39а.*

В работе подсчитан валовый потенциал ветровой энергии в точках расположения метеостанций. На основе полученных данных построены модели распределения валового потенциала на территории Дагестана. Построение осуществлялось с помощью системы трехмерного геоинформационного моделирования.

Определение ветроэнергетического потенциала какого-либо региона начинают с расчета валового потенциала. Ветер занимает огромные объемы в атмосфере Земли над регионом, но практически возможно использование только малой части общего ресурса ветровой энергии. Поэтому формулировка определения для валового потенциала ветровой энергии содержит условие возможности её использования. Исходя из этого, валовый (теоретический) потенциал ветровой энергии региона – это среднемноголетняя суммарная ветровая энергия движения воздушных масс над данной территорией в течение одного года, которая доступна для использования [1, 2].

Если принять за $h$ высоту ветроэнергетической установки (ВЭУ), то валовый потенциал рассчитывается как суммарная энергия воздушных масс, использование которой возможно системой современных ВЭУ на высоте $h$ приземного слоя. При определении валового потенциала учитывается, что при обтекании воздушными потоками препятствия (ВЭУ) высотой $h$ возмущенный поток полностью восстанавливается на расстоянии равном $20h$. Таким образом, ветроэнергетическая система должна быть представлена рядами ВЭУ, ориентированных перпендикулярно направлению ветра и расположенных на расстоянии $20h$ друг от друга [2]. Исходя из этого, валовый потенциал ветровой энергии $E_{вп}^{вал}$, кВт·ч/год, на территории площадью $S$, м$^2$, при удельной энергии ветра $E_{вп}^{уд}$, кВт·ч/(м$^2$·год), равен

$$E_{вп}^{вал} = \frac{1}{20} \cdot E_{вп}^{уд} \cdot S$$

Целью данной работы является построение моделей распределения валового потенциала ветровой энергии на территории Дагестана для различных периодов времени. Для этого были выполнены следующие мероприятия:

1. Произведен расчет средней удельной энергии ветрового потока на территории Дагестана и пограничных районах для различных периодов времени и на различных высотах (50м, 100м).
2. Разработано программное обеспечение, выполняющее расчет валового потенциала ветровой энергии.
3. Построены модели пространственного распределения валового потенциала ветровой энергии на различных высотах с помощью системы геоинформационного моделирования.

Для расчета удельной энергии ветрового потока было разработано программное обеспечение, описанное в [3], в результате работы которого были сформированы различные таблицы формата *.xls*. Для данной работы использовались таблицы, представленные на рис.1, где <ед.изм> Дж/(м2·год).

| Название метеостанции | 2000 год | 2001 год | 2002 год | 2003 год | 2004 год | 2000-2004 гг |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - | <ед.изм> | <ед.изм> | <ед.изм> | <ед.изм> | <ед.изм> | <ед.изм> |
| string | float | float | float | float | float | float |
| … | … | … | … | … | … | … |

Рис.1. Общий вид результирующей таблицы в файле .xls

Эти таблицы содержат входные данные ($E_{вп}^{уд}$) для программного обеспечения, выполняющего расчет валового потенциала по указанной выше формуле. В результате был рассчитан валовый потенциал ветровой энергии для всех метеостанций за выбранный период времени на различных высотах. Все полученные значения экспортировались в таблицы формата *.xls*, общий вид которой представлен на рис.1, где <ед.изм> кВт·ч/год.

Полученные *xls*-файлы импортировались в систему трехмерного геоинформационного моделирования [4] в проект «Республика Дагестан».

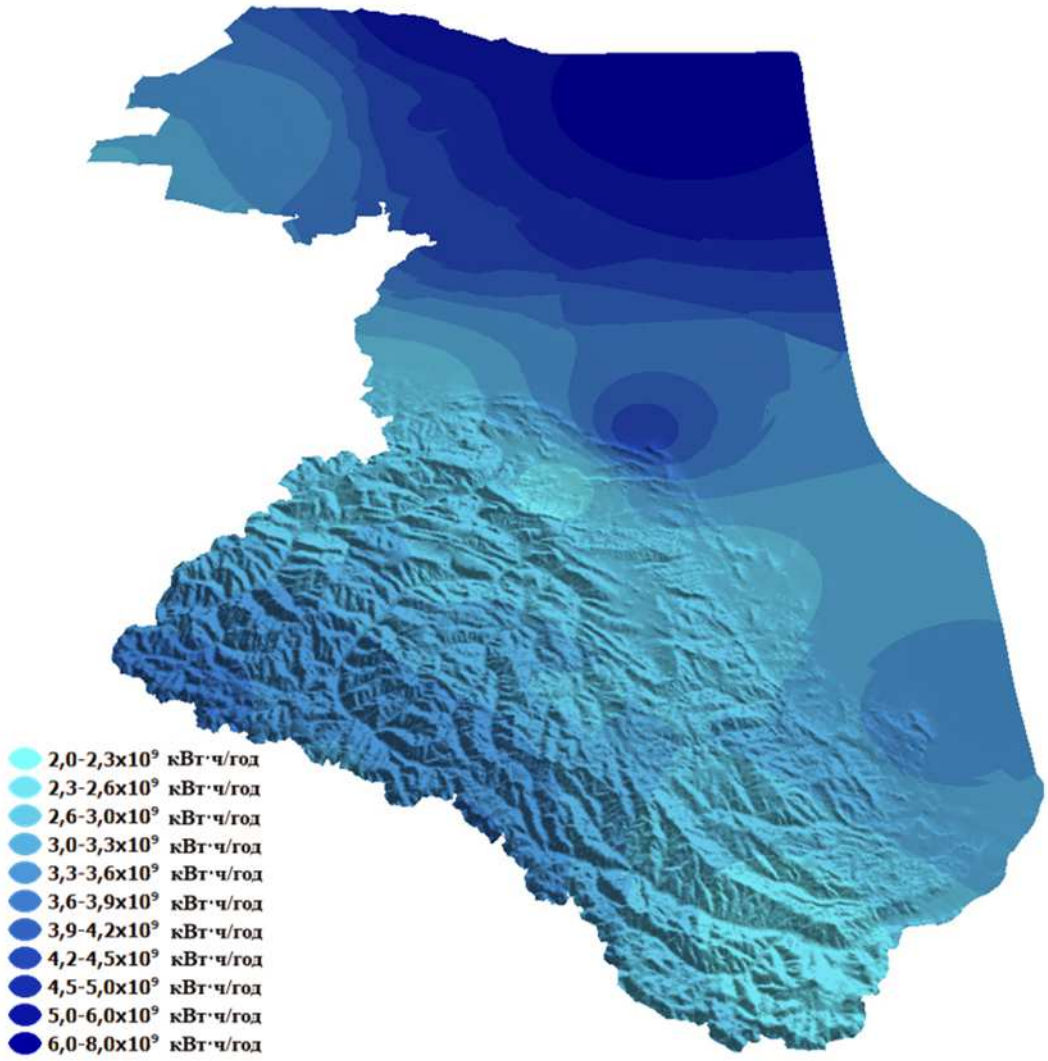



Рис. 2. Модель распределения валового потенциала ветровой энергии на высоте 50 м на территории Дагестана за период 2000-2004 гг

Результатом визуализации являются модели пространственного распределения валового потенциала ветровой энергии на высотах 50м и 100м за

период 2000-2004 гг. В качестве примера на рис. 2 показаны данные для периода 2000-2004 гг на высоте 50 м. Здесь выделены районы, соответствующие одиннадцати диапазонам значений валового потенциала $E_{вп}^{вал}$, кВт·ч/год: 1) 2,0-2,3×$10^9$; 2) 2,3-2,6×$10^9$; 3) 2,6-3,0×$10^9$; 4) 3,0-3,3×$10^9$; 5) 3,3-3,6×$10^9$; 6) 3,6-3,9×$10^9$; 7) 3,9-4,2×$10^9$; 8) 4,2-4,5×$10^9$; 9) 4,5-5,0×$10^9$; 10) 5,0-6,0×$10^9$; 11) 6,0-8,0×$10^9$.

Из рисунка видно, что районы с наибольшим валовым потенциалом ветровой энергии 6,0-8,0×$10^9$ кВт·ч/год находятся на севере территории Дагестана и в акватории Каспийского моря. На большей же части территории Дагестана среднее значение валового потенциала составляет около 3,6×$10^9$ кВт·ч/год.

**Литература:**

1. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Коллектив авторов. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
2. *Безруких П.П.* Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.:-ИД «Энергия», 2010. 320 с.
3. *Камилова А.М.* Распределение удельной мощности и удельной энергии ветрового потока на территории Дагестана // Сб. материалов IV Школы молодых ученых имени Э.Э.Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов». Махачкала, 2011. С. 252-255.
4. *Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Гаджимурадов Р.Н.* Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии, №11, 2009. С. 32-36.

# ФАЗОПЕРЕХОДНЫЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ

Арбуханова П.А., Искендеров Э.Г.

*Филиал ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля 39а; e-mail: elisk@outlook.com*

К фазопереходным материалам пригодным для аккумулирования низкопотенциального тепла относятся кристаллогидраты неорганических соединений и их эвтектические смеси, безводные неорганические и органические соединения и низкоплавкие эвтектические смеси на их основе. Каждые из перечисленных видов соединений имеют свои особенности, связанные с характером плавления, химической и термической стойкостью, совместимостью с конструкционными материалами.

Наиболее эффективными теплоаккумулирующими веществами (ТАМ), накапливающими теплоту за счет процесса плавления, являются кристаллогидраты различных водно-солевых систем. Интерес к этому классу веществ с точки зрения теплового аккумулирования объясняется их относительно высокими значениями удельной теплоты плавления и малой коррозийной активностью по отношению к конструкционным материалам, они широко распространены в природе, доступны и дешевы.

При проектировании тепловых аккумуляторов важно иметь данные о теплофизических свойствах кристаллогидратов, таких, как температура плавления, удельная теплота фазового перехода, плотность, теплоемкость и теплопроводность. Эти параметры необходимы для определения рабочей температуры зарядки (разрядки), расчета общего количества аккумулируемого тепла. Несмотря на существование большого числа кристаллогидратов, не все они могут быть использованы в качестве ТАМ, как по своим теплофизическим, так и по технологическим свойствам.

Для использования в качестве ТАМ к кристаллогидратам и их смесям предъявляют следующие требования:

- доступность и низкую стоимость.
- высокую удельную теплоту фазового перехода;
- незначительное переохлаждение при кристаллизации;
- сохранение стабильности свойств при многократных циклах плавления и кристаллизации;
- соль должна быть безвредной (нетоксичной, невоспламеняющейся, негорючей, некорродирующей).

В процессе применении в качестве теплоаккумулирующих материалов кристаллогидраты проявляют такие свойства как переохлаждение, расслоение и испарение кристаллизационной воды и как следствие изменение теплофизических свойств ТАМ при термоциклировании, проявляющиеся в изменении температуры плавления и уменьшении значения теплоты фазового перехода.

Анализ литературы [1-17] показывает, что все гидраты неорганических веществ кристаллизуются с переохлаждением, то есть жидкая фаза сохраняется до температуры, намного меньшей теоретически ожидаемой. Переохлаждение кристаллогидратов можно значительно уменьшить введением в состав ТАМ катализаторов кристаллизации. Кристаллизация пересыщенных растворов можно ускорить гетерогенными добавками, образование центров кристаллизации

происходит лишь в том случае, если кристаллографические данные затравочного материала и исходного соединения близки по атомной структуре и отличаются в пределах ±15% [18].

Основные требования к инициаторам кристаллизации: они должны обладать незначительной растворимостью в пересыщенном растворе теплоаккумулирующего материала; не должны уменьшать теплоту плавления ТАМ. Даже при добавлении инициаторов кристаллизации, при многократных циклах фазового перехода, из-за различной плотности чистой соли и остального раствора происходит частичное расслоение компонентов, это приводит к нарушению стехиометрического состава исходного кристаллогидрата и вызывает изменение термодинамических свойств ТАМ, температуры и теплоты плавления.

В работе [5-6] рекомендуют в качестве добавок к $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, уменьшающих степень переохлаждения, предотвращающих быстрый выброс теплоты за счет взрывной кристаллизации, снижающих эффекты испарения кристаллизационной воды, тем самым способствующих длительности использования ТАМ в результате многократного термоциклирования следующий состав: $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (основа) + 2.15% буры (как ингибитора переохлаждения) + 2.15%$Ca_2SO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ (ингибитор расслоения твердой и жидкой фаз).

Для улучшения термоциклической стабильности кристаллогидратов в работах [7, 8] предлагают добавить в теплоаккумулирующий материал воду в количестве, превышающем стехиометрический состав, что приводит к полному растворению соли при температурах выше, чем температуры плавления кристаллогидрата. Авторы [9,10] предлагают улучшить стабильность ТАМ механическим вращением теплового аккумулятора вместе с расплавом кристаллогидрата.

В настоящее время поиск веществ, используемых в качестве ТАМ, работающих в том или ином температурном режиме сосредоточен на изучении смесей различных кристаллогидратов, а также подбора добавок к ним, уменьшающих степень переохлаждения, предотвращающих быстрый выброс теплоты за счет взрывной кристаллизации, снижающих эффекты испарения кристаллизационной воды, тем самым способствуя длительности использования ТАМ в результате многократного термоциклирования. Этим целям могут послужить смеси кристаллогидратов:

20-90%$CH_3COONa \cdot 3H_2O$+80-10%$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$[11],
$CH_3COONa \cdot 3H_2O+Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ [12], $CH_3COONa \cdot 3H_2O+Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$ [13], $CO(NH_2)_2+ Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ [14], $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O + (NH_4)_2CO_3$ в массовом соотношении от 100:20 до 100:50 [15], $CaCl_2 \cdot 6H_2O+$ 16%$NaNO_3$ или $KNO_3$ [16].

При проектировании и разработке тепловых аккумуляторов необходимы сведения о коррозионной активности ТАМ в твердой и жидкой фазах по отношению к конструкционным материалам. По результатам исследований [19-20] конструкционные материалы по величине коррозионной стойкости к расплавам кристаллогидратов располагаются в следующий ряд: нержавеющая сталь, мягкие стали, алюмо-магниевые сплавы, алюминий, медь, латунь.

Физико-химическим характеристикам ТАМ, работающим в заданном интервале температур (30 – 100$^oC$), удовлетворяют не только чистые кристаллогидраты, но и эвтектические водные растворы солей, смеси кристаллогидратов различной природы, безводные соли и их эвтектические смеси. Анализ литературных источников свидетельствует об отсутствии систематических исследований двойных и тройных систем кристаллогидратов.

**Экспериментальные исследования.** Для выбора кристаллогидратов в качестве теплоаккумулирующих материалов критериями отбора послужили температура плавления, плотность аккумулируемой энергии, дешевизна.

Для получения теплоаккумулирующего материала с заданной температурой и теплотой плавления, способного аккумулировать низкопотенциальную солнечную энергию были проведены исследования двойной системы тригидрат ацетата натрия – пентагидрат тиосульфата натрия.

Тригидрат ацетата натрия (АН-3), является отходом химической промышленности, вещество доступное, нетоксичное, обладает, как показали исследования, исключительными тепловыми характеристиками для использования в качестве ТАМ. АН-3 плавится при температуре (58±0,2) $^{o}$C, а при охлаждении сильно переохлаждается (на 30 - 40 $^{o}$C), в отдельных случаях не кристаллизуется даже при температуре ниже минус 50 $^{o}$C и переходит в стеклообразное состояние, теплота плавления 220 – 272 кДж/кг, плотность аккумулируемой энергии 320 – 394,4 МДж/м$^3$, по разным источникам [4, 21-23]. Кристаллизацию тригидрата ацетата натрия, как известно, можно осуществить введением готовых кристаллов данного вещества при температуре ниже 58 $^{o}$C или механическим перемешиванием [4]. Переохлаждение тригидрата ацетата натрия можно в значительной степени уменьшить и путём применения инициаторов кристаллизации. Второй компонент двойной системы пентагидрат тиосульфата натрия плавится при 48 $^{o}$C, теплота фазового перехода 209 кДж/кг, плотность аккумулируемой энергии 358,4 МДж/м$^3$.

Исследовались композиции на основе тригидрата ацетата натрия и тиосульфата натрия визуально-политермическим методом. Исследования показали, что в качестве теплоаккумулирующего состава наиболее пригодным является смесь кристаллогидратов с температурой фазового перехода 52 $^{o}$C и с переохлаждением 2-3 $^{o}$C.

Для определения энтальпии плавления теплоаккумулирующего состава использовали водяной колориметр специальной конструкции (рис. 1).

Масса теплоаккумулирующего материала – 942 г. Температура воды в колориметре и ТАМ в аккумуляторе определялись во время разрядки с помощью медь – константановых термопар, подключённых к компаратору напряжения Р 3003. Одновременно велась непрерывная запись термограмм сигналов на двухканальном самописце КСПП 4. Результаты измерения представлены на графике (рис. 2).

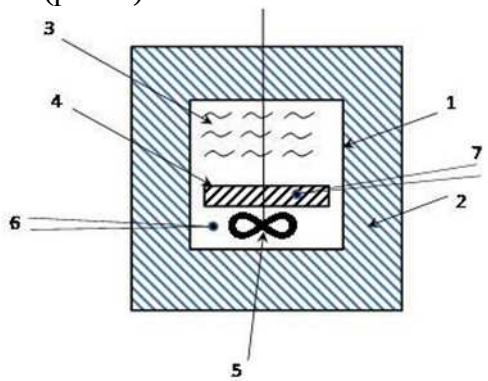



Рис.1. Водяной калориметр (1 – пластиковый сосуд, 2 – теплоизоляционный материал, 3 – вода, 4 – контейнер с ТАМ, 5 – мешалка, 6,7 – термопары)

Количество выделяемого аккумулятором тепла при фазовом переходе кристаллогидрата рассчитывали по формуле:

$Q = m \cdot Cp \cdot (t_2 - t_1)$,

где m – масса воды в колориметре (4 кг), Ср – изобарная теплоемкость воды (4,2 кДж/кг), $t_1$ – начальная температура воды (23 $^oC$), $t_2$ – температура воды после разрядки аккумулятора (37 $^oC$).

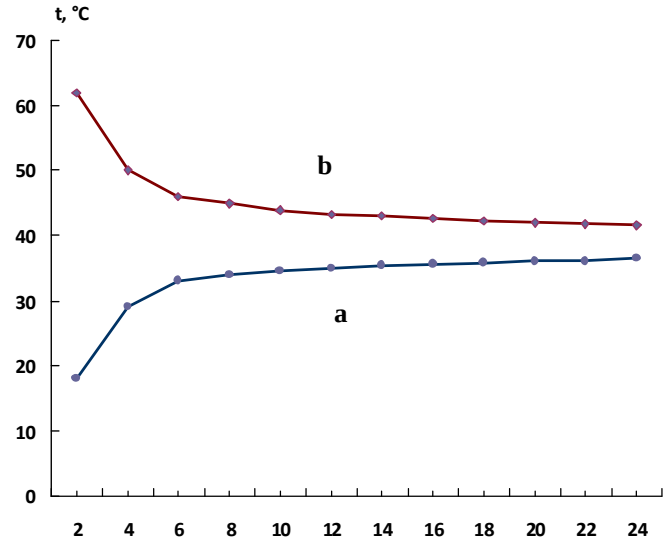



Рис.2. График изменения температур воды (**a**) и теплоаккумулирующего материала (**b**)

$Q = 4кг \cdot 4,2 \cdot (37-23) = 235,2$ кДж

$Q_1 = 0,942 \cdot 2$ кДж/кг $\cdot$ К $\cdot (62-42) = 37,7$ кДж

$Q_2 = 0.982 \cdot 0.444 \cdot (62-42) = 8,7$ кДж

Q – сумма количества теплоты выделяемой теплоаккумулирующим материалом за счёт его теплоёмкости ($Q_1$), энтальпии плавления ($\Delta H_{пл}$) и теплоёмкости стального контейнера ($Q_2$).

$Q - Q_2 = 235,2 – 8,7 = 226,5$ кДж – теплота, выделяемая ТАМ за счет его теплоемкости и теплоты фазового перехода, в пересчете на 1кг теплоаккумулирующего материала – 240,4 кДж/кг.

$Q_1 + Q_2 = 46,4$ кДж

Теплота фазового перехода $\Delta H_{пл} = Q – (Q_1 + Q_2) = 235,2 – 46,4 = 188,8$ кДж, что в пересчете на 1кг получается – 200,4 кДж/кг.

Проведенные исследования показывает, что теплота плавления теплоаккумулирующей смеси равна 200,4 кДж/кг, температура плавления 52$^oC$.

Применяемые в тепловых аккумуляторах ТАМ должны представлять собой высокостабильные материалы, не изменяющие свои свойства в течение длительного времени работы аккумулятора. Для проверки химической устойчивости при термоциклировании проведен стократный процесс нагрев ↔ охлаждение.

Проведенные исследования показывает нестабильность температуры кристаллизации состава, в некоторых случаях наблюдается значительное переохлаждение, это можно объяснить хорошей взаимной растворимостью тригидрата ацетата натрия и пентагидрата тиосульфата натрия. Было принято решение добавить дополнительно в качестве инициатора кристаллизации 2–3% вещества, обладающего низкой растворимостью в теплоаккумулирующем материале и температурой плавления выше 58 $^oC$. Эксперимент показывает, что при добавлении к теплоаккумулирующему составу инициатора кристаллизации стабильность температуры плавления и кристаллизации при многократном цикле не нарушается.

**Литература:**

1. *Бекман Г., Гилли П.* Тепловое аккумулирование энергии. М.: Мир, 1987. 272с.
2. *Дибиров М.А., Мозговой А.Г. и др.* Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов // ЖПХ. 1993. Т. 66. В. 6. С.1210-1216.
3. *Левемберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А.* Аккумулирование тепла. Киев: Техника. 1991. — 112 с.
4. *Данилин В.Н., Долесов А.Г.* Тепло- и холодоаккумулирующие материалы на основе ацетата натрия. Краснодар: Кубанский гос. тех. Ун-т.
5. Теплоаккумулирующий состав. Saita Kenji, Fujioka Syozo. Samimoto Chemical Co. Ltd. Пат. 4556501б, США. Заявл. 11.10.84 № 659883.
6. *Kimura H., Kei J.* Phase change stability of $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ //Solar Energy. 1684. V.33. № 1. P.56-57.
7. *Bismas D.R.* Thermal energy storage using sodium sulfate decahydrate and water // Solar Energy. 1977. V. 19. № 1. P.99-100.
8. *Herrick C.S., Zarnoch K.P.* Heat storage capability of a rolling cylinder using Glauber's salt //Intern. J.Ambient Energy. 1980. V. 1. № 1. P.47-55.
9. *Herrick C.S.* Melt-freeze-cycle life-testing of Glauber's salt in a rolling cylinder heat store // Solar Energy. 1982. V. 28. № 2. P.99-104.
10. Сохраняющий тепло материал. Заявка 646083. Япония. МКИ. С09К 5/06 Ямасита Кадзуо, Манцусита дэнки сансе к.к. № 621161756. Заявл. 29.06.87., опубл. 10.01.89. Какай Токке Кохо. Сер. 3(3). 1989, С. 5931594.
11. *Vatanbe J. Saito I. Nakai T.V.* Ускоряющее влияние зародышеобразующего агента на кристаллизацию гидратов солей, используемых в качестве ТАМ // Ind. Cryst. 87: Proc. 101th Symp. Bechyne, Sept. 21125, 19871Praha, 1989.
12. Теплоаккумулирующий состав. Моримото Кадзуо, Аояго Харуки, Нисимура Кодзи. Хитати касэй коге к.к. Заявка №61153383. Япония. Заявл. 21.08.84, №591173751, опубл. 17.03.86. МКИС 09 к5/06.
13. *Зайцева Л.А., Иванов А.А., Лепешков И.Н.* Система мочевна - сульфат натрия // Журнал неорганической химии, 1987, т. 32, № 3., с. 8231825.
14. Материал аккумулирующий скрытую теплоту. Такэда Такэси, Кудо Ясуо, Матида Икухико. Мацусиа дэнки санрё к.к. Заявка 61124778. Япония. Заявл. 26.04.85, № 60190022. Опубл. 05.11.86.
15. Телоаккумулирующий состав. Chalk Christine D. IC Gas International Ltd. Патент 46197178, США. Заявл. 19.06.85. № 746020.
16. *Киргинцев А.Н., Трушникова Л.Н., Лаврентьева В.Г.* Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Изд-во: Химия. - Л.: 1972. - С.248.
17. *Telkes M.* Nucleation of supersaturated inorganic salt solutions//Ind. Eng. Chem. 1952. V.44. № 6. P.1308-1310.
18. *Трушевский С.Н., Сидоров П.П., Трохинин Н.Н. И др.* Предварительные результаты испытания на совместимость конструкционных и теплоаккумулирующих материалов// Гелиотехника. 1983. №5.С. 38-42.
19. *Панасенко Т.М., Кудря С.А., Яценко Л.В.* Коррозийное поведение некоторых конструкционных материалов теплового аккумулятора // Гелиотехника. 1983. №5.С. 43-45.
20. *Данилин В.Н.* Физическая химия тепловых аккумуляторов // Краснодар. – КПИ, 1981. 90с.
21. Термические константы веществ. Справочник. Под ред. В.П.Глушко. – М.: АН СССР, ВИНИТИ, 1970, ч.1 вып.4. 488 с.
22. *Рабинович В.А., Хавин З.Я.* Краткий хим. справочник. М. Химия. 1978. 392с.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

Саидова С.К.[1], Исаева П.М.[1], Арбуханова П.А.[2], Вердиев Н.Н.[2]

*[1]ФГБОУ Дагестанский государственный университет;*
*Махачкала, Россия; 367025, ул.М.Гаджиева 25.*

*[2]Филиал ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля 39а; e-mail: verdiev55@mail.ru*

Теплоаккумулирующие материалы (ТАМ) на основе экзо- и эндотермических эффектов, фазовых превращений используются для аккумулирования солнечной и других нетрадиционных источников энергии, создания комфортных условий в жилых и производственных помещениях, в холодильной технике, для хранения и транспортировки медицинских препаратов и пищевых продуктов. Изменение теплосодержания ТАМ может происходить как с изменением его температуры, так и в процессе фазовых превращений. Аккумуляторы на основе фазового перехода по сравнению с традиционными теплоемкостными аккумуляторами обладают высокой плотностью аккумулируемой энергии и постоянной температурой разрядки (зарядки), в зависимости от температуры плавления рабочего материала.

Проведенный нами анализ ранее исследованных солевых систем и систем с участием кристаллогидратов показывает, что для аккумулирования низкопотенциального тепла наиболее пригодными являются системы с участием кристаллогидратов. Это объясняется тем, что у солевых эвтектических смесей величины энтальпий фазовых переходов, как правило, ниже величин температур фазовых переходов. В свою очередь величины теплот фазовых переходов кристаллогидратов иногда превышают температуру фазовых переходов в несколько раз, эта величина является определяющей при подборе теплоаккумулирующих материалов. Теплофизические характеристики ряда кристаллогидратов предлагаемых в качестве теплонакопителей приведены в табл.

Кристаллогидраты и их эвтектические смеси, при многократном нагревании и кристаллизации подвержены переохлаждению, первоначально кристаллизация происходит при заданной температуре, а уже второй раз – намного ниже первоначальной (ожидаемой) иногда на 50 и более градусов Цельсия. Объяснений такому явлению много, это может происходить из-за потери кристаллизационной воды, скорости нагревания и охлаждения, разной плотности теплоаккумулирующей смеси, расслоение и ряда других факторов. Потерю кристаллизационной воды можно избежать добавлением воды, сложнее регулировать скорость нагрева и охлаждения, так, как эти процессы зависят от внешних условий, т.е. от интенсивности солнечного излучения, теплосъема. Для предотвращения расслоения – к теплоаккумулирующему материалу добавляют загустители, в качестве загустителей используют ПВА (дисперсия поливинилацетата), глицерин ($CH_2(OH)CH(OH)CH_2(OH)$), КМЦ (обойный клей, карбоксиметилцеллюлоза), желатин и т.д. Переохлаждение можно избежать и механическим вращением теплового аккумулятора со смесью кристаллогидратов, что не всегда возможно. Для устранения переохлаждения в теплоаккумулирующий состав добавляют инициатор кристаллизации, инициатором кристаллизации могут служить солевые добавки, которые плавятся при более высоких температурах, чем теплоаккумулирующий материал и добавка не должна растворяться в кристаллизационной воде.

С целью разработки теплоаккумулирующих смесей выбрана система с участием кристаллогидратов тригидрата ацетата натрия ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$) и тиосульфата натрия ($Na_2S_2O_3 \cdot 3H_2O$).

Таблица1. Характеристики кристаллогидратов, предлагаемых в качестве ТАМ

| № | Химическая формула кристаллогидрата | Плот-ность, кг/м$^3$ | t пл,°С | $\Delta H_{пл}$ кДж/кг | Лит-ра |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Нитрат марганца $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 1820 | 25,3 | | 5 |
| 2 | Нитрат меди $Cu(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | | 26 | 123 | 4 |
| 3 | Кальция хлорид $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ | 1634 | 29 | 174,3 | 5 |
| 4 | Нитрат стронция $Sr(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ | | 31 | 302 | |
| 5 | Сульфат натрия $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ | 1554 | 32 | 251,0 | 2, 5 |
| 6 | Карбонат натрия $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ | 1442 | 32 | 247,6 | 3, 5 |
| 7 | Сульфат аммония-железа $FeNH_4(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$ | 1554 | 33 | 198 | |
| 8 | Сульфит натрия $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$ | 1176 | 33,4 | 179,0 | |
| 9 | Нитрат цинка $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ | 2065 | 36 | 147 | 4, 5 |
| 10 | Гидрофосфат натрия $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ | | 36 | 279 | 3 |
| 11 | Карбонат натрия $Na_2CO_3 \cdot 12H_2O$ | | 36 | 265 | 4 |
| 12 | Железа хлорид $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ | | 37 | 223 | 4 |
| 13 | Нитрат кальция $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ | 1820 | 42 | 142 | 5 |
| 14 | Фторид калия $KF \cdot 2H_2O$ | | 42 | 266 | 4 |
| 15 | Сульфат хрома-калия $CrK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ | | 47 | 238 | |
| 16 | Тиосульфат натрия $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ | 1715 | 48 | 209 | 3, 5 |
| 17 | Нитрат железа $Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ | 1684 | 49 | 191 | 5 |

На основе тригидрата ацетата натрия и тиосульфата натрия разработаны составы пригодные для аккумулирования низкопотенциального тепла. Смеси из кристаллогидратов испытывались в лабораторных условиях. Для испытания этих составов созданы две водонагревательные гелиоустановки.

Первая установка выполнена в традиционном исполнении (рис.1). Площадь поглощающей поверхности солнечного коллектора у обеих установок по 0,5 м$^2$, объем бака аккумулятора 50 л. Вода на выходе из коллектора нагревается до 100 $^o$С.

В бак аккумулятор второй установки помещен тепловой аккумулятор (рис.2).

Рис.1. Водонагревательная гелиоустановка в традиционном исполнении

В бак аккумулятор второй установки помещен тепловой аккумулятор (рис. 2).

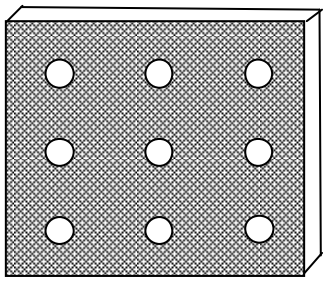


Рис.2. Контейнер с теплоаккумулирующим материалом

Проведенные нами исследования показывают о целесообразности применения для теплового аккумулирования состав разработанных нами составов с участием кристаллогидратов тригидрата ацетата натрия ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$) и тиосульфата натрия ($Na_2S_2O_3 \cdot 3H_2O$).

**Литература:**

1. Теплоаккумулирующий состав. Saita Kenji, Fujioka Syozo. Samimoto Chemical Co. Ltd. Пат. 4556501б, США. Заявл. 11.10.84 № 659883.
2. Материал аккумулирующий скрытую теплоту. Такэда Такэси, Кудо Ясуо, Матида Икухико. Мацусиа дэнки санрё к.к. Заявка 61124778. Япония. Заявл. 26.04.85, № 60190022. Опубл. 05.11.86.
3. *Данилин В.Н.* Физическая химия тепловых аккумуляторов // Краснодар. – КПИ, 1981. 90с.
4. Термические константы веществ. Справочник. Под ред. В.П.Глушко. – М.: АН СССР, ВИНИТИ, 1970, ч.1 вып.4. 488 с.
5. *Рабинович В.А., Хавин З.Я.* Краткий химический справочник. М. Химия. 1978. 392с.

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АРТЕЗИАНСКОЙ ВОДЫ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-ДАГЕСТАНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА НА ПРИМЕРЕ ХАСАВЮРТОВСКОГО РАЙОНА

Абдулмуталимова Т.О.[1], Абдуллаев М.Ш.[1,2], Рамазанов О.М.[2]

*[1]ФГБУН Институт геологии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, ул.Ярагского 75.*

*[2]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

Северо-Дагестанский артезианский бассейн (СДАБ), является крупнейшим резервуаром пресных артезианских вод, ресурсы которого являются важнейшим источником хозяйственно-бытового водоснабжения населения Северного Дагестана. Содержание ряда токсичных компонентов в водах СДАБ превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) для питьевых вод. Региональная геохимическая особенность данной территории - наличие в артезианских водах повышенных концентраций мышьяка.

Проблемы мышьяка (As) в окружающем среде признаны и выявлены во многих странах мира, в широком диапазоне геологических и климатических условий. В различных странах таких как Бангладеш, Тайвань, Чили, северо-западные районы США, Венгрии в артезианских водах содержание мышьяка, который относится к первой, наиболее опасной, группе канцерогенных веществ, превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) для питьевых вод. /1/.

Учитывая серьезность проблемы мышьяковистого загрязнения питьевых вод мышьяком Временной директивой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), предел концентраций мышьяка в питьевых водах установлен 10 мкг/л, до 1993 г. – 50 мкг/л /2/.

Основным источником мышьякового загрязнения пресных подземных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна является переход в воду мышьяка из мышьяковистых минералов (реальгар AsS, аурипигмент $As_2S_3$, мышьяковистый колчедан, арсенопирит FeAsS, леллингит $FeAs_2$ и др.) содержащихся в продуктивных горизонтах песчано-глинистых отложений /3/.

Нами в продолжение ранее проведенных исследований /4,5,6/ по изучению содержания мышьяка в артезианских водах Северного Дагестана были исследованы артезианские водоисточники, используемые для питьевого водоснабжения расположенные в западной части северного Дагестана (Хасавюртовский район).

В данной статье представлены результаты исследований по содержанию основных макрокомпонентов (натрий, магний, кальций, хлор, нитраты, сульфаты, гидрокарбонаты) и токсичных элементов – медь, цинк, мышьяк, фтор в артезианских водах используемых для питьевого обеспечения в населенных пунктах: с. Герменчик,с. с. Шагада, с. Сулевкент, с. Казмааул, с. Куруш, с. Костек, с.Бамматюрт, г. Хасавюрт (Рис1.).

Отбор проб артезианской воды, предназначенных для определения химического состава проводился по ГОСТ Р 51593-2000. Пробы отбирались в емкости из полиэтилена, с каждого водоисточника по две пробы (0,5 л каждая). Одна проба подкислялась концентрированной азотной кислотой до pH 2 (1-1,5 мл концентрированной HNO3) для консервации тяжелых металлов, другая проба без подкисления отбиралась для определения водородного показателя (pH).

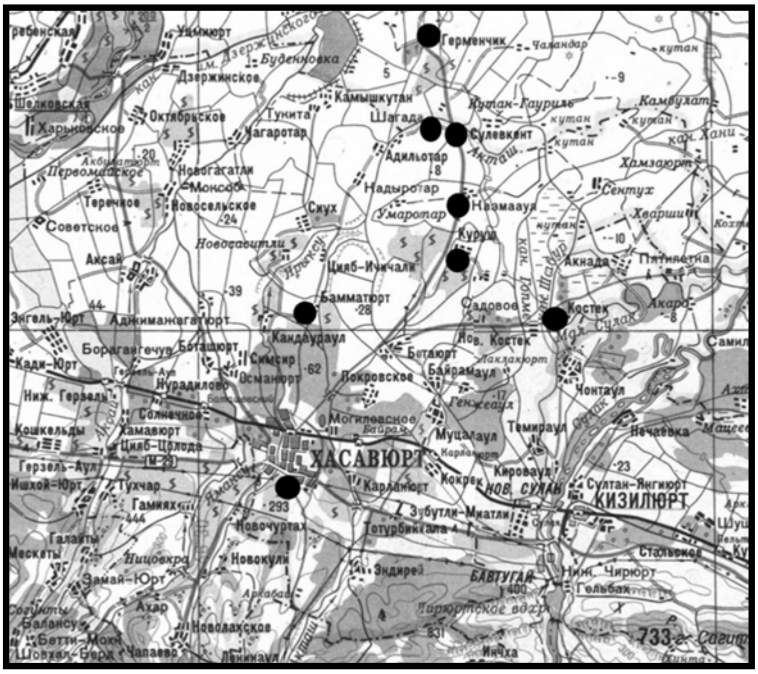



Рис.1. Карта Хасавюртовского района с точками отбора проб воды из артезианских источников

Определения pH проводили на Иономере PH-410 с набором комбинированных PH – электродов, предел измерения PH от 0 до 14, погрешность измерений, не превышающей 0,1 pH. Общая жесткость воды определена по ГОСТ 52407-2005, методом титрования щелочноземельных металлов. Содержание анионов (F, CI, NO3, SO4) определено на хроматографе MERCK XITACHI методом ионной хроматографии. Гидрокарбонаты определены методом титрования 0,1 М раствором соляной кислоты в присутствии индикатора (метилоранжа).

Валовое содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, As) было измерено методом атомно-абсорбционной спектрометрии на прибора Perkin-Elmer AAnalyst 600 graphite furnace system (Perkin Elmer, Wellesley, MA) в лаборатории Института геологии ДНЦ РАН. Метод основан на определении резонансного поглощения света свободными атомами определяемого элемента при прохождении света через атомный пар исследуемого образца, образующегося в атомизаторе. При анализе мышьяка использована на спектрометре гидридная приставка. Калибровка спектрометра проводилась с использованием эталонных растворов определяемых элементов.

Полученные результаты представлены в таблице 1. Артезианские воды относятся к сульфат-гидрокарбонатно-натриевому типу и характеризуются, минерализацией (415,0—1656,5 мг/л), содержанием катионов: натрий (33,8—316мг/л), магний (4,9—52,2мг/л), кальций (6,0—184,0мг/л), железо (0,002—0,718мг/л), медь (0,001—0,003мг/л), цинк (0,03—0,001мг/л), мышьяк (0,001—0,128мг/л); содержанием анионов: фтор (0,2—0,1,4мг/л), хлор (2,7—66,9мг/л), нитрат (0,003—26,6мг/л), сульфат (60,2—575,2мг/л), гидрокарбонат (244,0—915,0мг/л). Значение кислотности (pH) колеблется в интервале от 7,1 до 8,1.

Анализ минеральной составляющей показывает, что исследованные пробы артезианской воды, по минерализации в основном соответствуют требованиям ГОСТ 2761-84. Превышение (ПДК 1г/л) по минерализации установлено для артезианской воды отобранной из скважин в населенном пункте с. Сулевкент (1,66 г/л), с. Герменчик (1,42 г/л) и на окраине г. Хасавюрта (1,1 г/л).

Таблица 1. Физико-химический состав некоторых макро- и микрокомпонентов в артезианских водах Хасавюртовского и Кизилюртовского районов (Дата отбора проб 8 августа 2012 г. Дата анализа проб 12 августа 2012 г.)

| Местоположение водоисточника (отбор пробы) | Na | Mg | Ca | Fe | Cu | Zn | As | F | CI | NO3 | SO4 | HCO3 | Мин | Общая жесткость | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Костек из скважины в центре села у Напорной вышки | 45,2 | 10,9 | 54,0 | 0,254 | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,4 | 3,2 | 0,1 | 60,2 | 256,2 | 430,1 | 3,6 | **7,5** |
| Костек из скважины на окраине села у трассы в г. Хасавюрт | 46,0 | 13,3 | 46,1 | 0,22 | 0,001 | 0,03 | 0,029 | 0,23 | 2,7 | 0,06 | 62,8 | 244,0 | 415,0 | 3,4 | **7,7** |
| Куруш из скважины в центре села, около школы | 180,1 | 7,3 | 16,0 | 0,464 | 0,001 | 0,001 | 0,021 | 0,7 | 27,4 | 0,08 | 77,8 | 414,8 | 724,1 | 1,4 | **7,9** |
| Казмааул из скважины в центре села | 182,4 | 24,3 | 100,2 | 0,485 | 0,002 | 0,008 | 0,015 | 1,3 | 65,8 | 0,07 | 374,8 | 317,2 | 1065, 8 | 7,0 | 7,6 |
| Сулевкент из скважины на окраине села | 305,2 | 13,4 | 26,0 | 0,358 | 0,001 | 0,004 | 0,049 | 1,4 | 21,2 | 0,02 | 383,8 | 427,0 | 1178,2 | 2,4 | 7,9 |
| Сулевкент из скважины в центре села | 249,8 | 26,7 | 134,0 | 0,234 | 0,002 | 0,004 | 0,037 | 1,2 | 35,2 | 0,05 | 575,2 | 317,2 | 1656,5 | 7,4 | 7,0 |
| Сулевкент из скважины на северной окраине | 198,1 | 10,9 | 52,0 | 0,428 | 0,001 | 0,003 | 0,058 | 1,2 | 26,4 | 0,03 | 264,2 | 353,8 | 906,6 | 3,5 | 7,8 |
| Шагада из напорной башни | 255,3 | 13,4 | 52,2 | 0,718 | 0,002 | 0,006 | 0,036 | 1,0 | 27,3 | 0,02 | 358,7 | 317,2 | 994,8 | 3,7 | 7,6 |
| Герменчик из скважины на окраине села | 193,2 | 4,9 | 20,0 | 0,535 | 0,003 | 0,009 | 0,128 | 1,0 | 28,4 | 0,03 | 102,8 | 414,8 | 765,1 | 1,4 | 7,8 |
| Герменчик из скважины рядом с мечетью | 316,5 | 38,9 | 6,0 | 0,305 | 0,002 | 0,01 | 0,048 | 1,4 | 28,9 | 0,02 | 66,5 | 915,0 | 1423,6 | 3,5 | 8,1 |
| Бамматюрт из скважины в центре села | 66,38 | 46,17 | 154,0 | 0,017 | 0,003 | 0,02 | 0,001 | 0,9 | 23,5 | 0,003 | 289,1 | 451,4 | 1051,74 | 11,5 | 7,0 |
| Бамматюрт из скважины в северной части | 33,8 | 46,2 | 158,0 | 0,216 | 0,002 | 0,03 | 0,001 | 0,92 | 25,0 | 26,6 | 255,36 | 451,4 | 997,3 | 11,7 | 7,2 |
| Вода из водонапорной башни Бешбулакского месторождения поступающего в г.Хасавюрт | 59,8 | 47,4 | 168,0 | 0,002 | 0,003 | 0,02 | 0,002 | 0,7 | 66,9 | 12,0 | 385,4 | 292,8 | 1033,0 | 12,3 | 7,2 |
| Бешбулакское месторождение вода из одной скважины | 54,5 | 52,2 | 184,0 | 0,347 | 0,002 | 0,006 | 0,001 | 1,2 | 33,5 | 15,2 | 406,9 | 378,2 | 1125,7 | 13,5 | 7,1 |

В соответствие с требованием ГОСТ 2761-84 для подземного источника первого класса содержание железа не должно превышать 0,3 мг/л. Превышение нормативных требований по содержанию железа (Fe) в 1,5-1,8 раз установлено в пробах артезианской воды отобранной в населенных пунктах с. Костек, с. Казмааул, с. Герменчик. В пробе артезианской воды отобранной в с. Шагада превышение по содержанию железа составило 2,4 раза.

Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn) и анионов (F, CI, NO3, SO4) в пробах артезианских вод соответствуют требованиям ГОСТ 2761-84 (вода источников питьевого водоснабжения) и требованиям СанПиН 2.1.4.1074 (вода централизованных систем питьевого водоснабжения).

В ранее проведенных исследованиях /7/ указывалось, что Западная часть равнинного Дагестана – Хасавюртовский, Кизилюртовский, Новолакский районы благополучны по содержанию мышьяка и концентрация в артезианских водах ниже ПДК. Оценка распространения мышьяка в подземных водах проводилась исходя из расчета, что предельно допустимая концентрация мышьяка по ГОСТу – 0,05 мг/л.

С учетом требований Всемирной Организацией Здравоохранения (ВОЗ), (предельно допустимые концентрации мышьяка в питьевых водах в количестве 0,01 мг/л), ареал распространения мышьяка в артезианских водах имеет место и в Хасавюртовском районе. В населенных пунктах Сулевкент, Шагада, Герменчик, Хасавюрт в артезианских водах содержание мышьяка превышает нормативные нормы, установленную ВОЗ в 3-6 раз, а в воде отобранной из артезианской скважины в с. Герменчик превышение относительно требований ВОЗ составило 13 раз (относительно ГОСТ в 2,6 раз).

В связи с этим, дальнейшее использование вод для питьевого водоснабжения, требует системного изучения состава минеральной и органической составляющих с целью мониторинга воздействия на здоровье человека и окружающую среду, и разработки эффективных методов очистки вод от токсичных соединений, в том числе и мышьяка перед использованием их в хозяйственно-бытовых целях.

**Литература:**

1. *Ревич Б.А., Авалиани С.Л., Тихонова Г.И.* Экологическая эпидемиология. - Москва, 2004.
2. *Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Г.И.* оведение мышьяка в почвах, горных породах и подземных водах. Серия «Экология», выпуск 97, - Новосибирск, 2011 г., с.245.
3. Генезис мышьяка в ресурсах пресных подземных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна. Отчет по выполнению гранта РФФИ. Рук. проекта Курбанов М.К. – ИГ ДНЦ РАН. Махачкала, 2003.
4. *Абдулмуталимова Т.О., Ревич Б.А.* Геоэкологические проблемы мышьяковистого загрязнения питьевых вод в Республике Дагестан.// Всемирный Международный Конгресс «Geocataclusm-2011» на тему «Природные катаклизмы и глобальные проблемы современной цивилизации», Стамбул, 2011 г.
5. *Абдулмуталимова Т.О., Ревич Б.А.* «Сравнительный анализ содержания мышьяка в подземных водах Северного Дагестана //Юг России: экология, развитие», №2, Махачкала, 2012, с.81.
6. *Абдулмуталимова Т.О., Газалиев И.М.* Геоэкологические проблемы подземных вод Северного Дагестана // Всероссийская конференция

«Современные проблемы геоэкологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», Грозный, 2011, с. 69

7. *Курбанов М.К.* Гидрогеоэкологическая программа «Родник. – Ресурсы подземных вод Теркско-Кумского артезианского бассейна и пути их рационального использования, предотвращения процессов загрязнения и истощения» на 2003-2008 гг. // Геоэкологические проблемы осовения и охраны ресурсов подземных вод Восточного Кавказа. – Материалы научно-практической конференции ИГ ДНЦ РАН. Вып 49. – Махачкала, 2003.

# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ СЕРОВОДОРОДА, СОДЕРЖАЩЕГО В ПРИРОДНОЙ ВОДЕ С ПОЛУЧЕНИЕМ КОЛЛОИДНОЙ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ

Гусейнов У.М.[1], Бекболатова К.Г.[2], Алиев З.А.[2], Гусейнов М.А.[2]

[1]*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

[2]*ФГБОУ Дагестанский государственный университет; Махачкала, Россия; 367025, ул.Гаджиева 25.*

Исследовалась возможность электрохимического окисления сероводорода и получения серы из природной воды Талгинского месторождения, концентрация которого составляет 187 мг/л.

Республика Дагестан богата сероводсодержащими природными водами.Эти воды используются для лечения многих болезней.

Например в санатории «Талги» с концентрацией сероводорода 187мг/л.

Исследовалась возможность окисления сероводорода электрохимическим способом с подачей компрессором кислорода воздуха для получения мелкодисперсной коллоидной серы по схеме: $2H_2S+O_2=2S\downarrow+2H_2O$.

Очень много сероводорода после ванн санатория вытекает с водой в сточные воды.

Сера имеет большое значение в химической промышленности для производства серной кислоты в медицине,сельском хозяйстве-коллоидная сера применяется для опрыскивания виноградников от болезней.

Для экспериментальной работы собран стеклянный электролизер с двумя электродами.

Анод-железо с подачей компрессором кислорода воздуха; катод-титан.

Исследовалась зависимость степени окисления сероводорода от плотности тока и продолжительность электролиза в интервале от 30 до 150 минут и плотность тока

от $0{,}01А/см^2$ до $0{,}02А/см^2$

На катоде выделяется водород: $2H^+ + 2\bar{e} \rightarrow \uparrow H_2$ $2H_2O + 2\bar{e} \rightarrow H_2 + 2OH^-$

На аноде окисляется вода по схеме: $2H_2O - 4\bar{e} \rightarrow O_2 + 4H^+$

Железный анод тоже окисляется: $Fe - 2\bar{e} \rightarrow Fe^{2+}$ $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$ $\xrightarrow{I_2} Fe(OH)_3$

Под действием выделяющего кислорода и $Fe(OH)_3$ происходит окисление сероводорода с образованием мелкодисперсной коллоидной серы:

$2H_2S+O_2 \rightarrow 2S+2H_2O$

$Fe(OH)_3+H_2S \rightarrow \downarrow Fe_2S_3+6H_2O$

$Fe(OH)_2+3H_2S \rightarrow \downarrow FeS+S+6H_2O$

В присутствии постоянно подаваемого кислорода и воды полученные выше сульфиды превращаются в гидроксиды железа (III) по уравнениям:

$2Fe_2S_3+6H_2O+3O_2 \rightarrow Fe(OH)_3+6S\downarrow$

$4FeS+6H_2O+3O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3+4S\downarrow$

Полученный гидроксид железа в свою очередь окисляет оставшийся сероводород до элементарной серы.

После каждого эксперимента определяли остаточное содержание сероводорода и по степени превращения сероводорода рассчитывали сколько серы образуется.

После опыта получается темно-оранжевый коллоидный раствор, который фильтровали через предварительно взвешенный бумажный вакуумный фильтр.

Фильтр с осадком $Fe(OH)_3$ и серой промывали разбавленным раствором соляной кислоты:

$$Fe(OH)_3+3HCl \rightarrow FeCl_3+3H_2O$$

Затем фильтр с осадком сушили в сушильном шкафу.

Сера остается на фильтре.

После взвешивали по разнице массы фильтров до опыта и после определяли массу серы:

$$H_2S \Leftrightarrow H^+ + HS^- \Leftrightarrow 2H^+ + S^{2-}$$

$$2H_2S+O_2 \rightarrow 2S\downarrow +2H_2O$$

Полученные результаты приводятся в таблице 1.

Выход серы по току от продолжительности процесса электролиза и плотности тока.

Таблица1.

| Плотность тока 0,01 А/см$^2$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| продолжительность, в мин. | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| масса серы, в г. | 0,047 | 0,055 | 0,069 | 0,064 | 0,073 |
| выход по току, в % | 50 | 60 | 63,7 | 72,2 | 78,5 |
| Плотность тока 0,02 А/см$^2$ | | | | | |
| продолжительность, в мин. | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| масса серы, в г. | 0,056 | 0,066 | 0,071 | 0,160 | 0,179 |
| выход по току, в % | 60 | 70,2 | 75,6 | 86,4 | 93,1 |

Таким образом, проведенные лабораторные исследования показали возможность извлекать коллоидную мелкодисперсную серу из сероводорода электрохимическим методом.

**Литература:**

1. *Линевич С.Н.* Комплексная обработка и рациональное использование сероводсодержащих природных и сточных вод.-М.: Стройиздатель.1987г.
2. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. Москва 1973.
3. *Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю.* Методы анализа природных вод.

# КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СОВЕРШЕННОГО ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Махмудова М.М., Рамазанов М.М.

*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

Изучены условия возникновения конвекции в совершенном газе, заполняющем горизонтальный пористый слой, при существенных перепадах температуры. Установлены закономерности зависимости критического числа Рэлея, определяющего порог возникновения конвекции, от небуссинесковских параметров - критерия сжимаемости газа и перепада температуры. Показано, что эти закономерности качественно идентичны ранее полученным закономерностям для кольцевой области. Таким образом, показано, что они не зависят от геометрии и обусловлены эффектами сжимаемости газа. Задача исследована численно методом Галеркина.

Геотермальная вода во многих областях земной коры, например, в областях активных и недавно потухших вулканов, может находиться в около- и сверхкритическом состоянии. Около- и сверхкритические жидкости имеют многочисленные приложения и в частности используются в химических технологиях в качестве реактивных сред. При моделировании процессов тепломассопереноса в таких жидкостях во многих случаях приближение несжимаемой жидкости становится неприемлемым. Наиболее простым уравнением, учитывающим сжимаемость среды, является уравнение совершенного газа.

Одним из наиболее распространенных механизмов движения жидкостей и газов является естественная конвекция. В настоящее время конвективные процессы в сжимаемых жидкостях хорошо изучены лишь в приближении малых перепадов температуры [1,2]. Исключением являются несколько статей авторов данного доклада, в которых были получены новые результаты [3-5]. В этих статьях рассматривалась конвекция в тонком пористом кольце на основе усредненных по сечению кольца уравнений. Однако оставался открытым вопрос насколько эти новые результаты зависят от геометрии области и сделанных упрощений. Ответ на этот вопрос и является основной целью данной работы.

**1**. **Постановка задачи**. Горизонтальный слой пористой среды толщины $H$ насыщен вязким теплопроводным газом, подчиняющимся уравнению совершенного газа. На границах пористого слоя фиксированы температуры $T_1$ и $T_2$ (рис.1); причем температура нижней границы $T_1$ больше температуры верхней границы $T_2$. Необходимо определить зависимость критического числа Рэлея $Ra$, определяющего порог возникновения конвекции, от небуссинесковских параметров - критерия сжимаемости газа и перепада температуры.

Предполагаем, что решение задачи периодично по горизонтали и полная масса газа М приходящая на период постоянна и заданна. Соответственно задана средняя по толщине слоя плотность газа $\rho^0$, определяемая величиной М. Теплофизические свойства газа считаем постоянными.

Введем следующие характерные масштабы: $H$ - длины, $\lambda_m / \rho^0 C_p H$ - скорости, $\rho^0 C_p H^2 / \lambda_m$ - времени, $T^0$ - температуры, $\rho^0$ – плотности, $P^0 = R\rho^0 T^0$

- давления. Здесь и ниже $H$ - толщина слоя; $\lambda_m$ - коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды; $C_p$ - теплоемкость газа при постоянном давлении; $\rho^0$ - средняя по толщине слоя плотность газа; $T^0$ - средняя по толщине слоя температура.

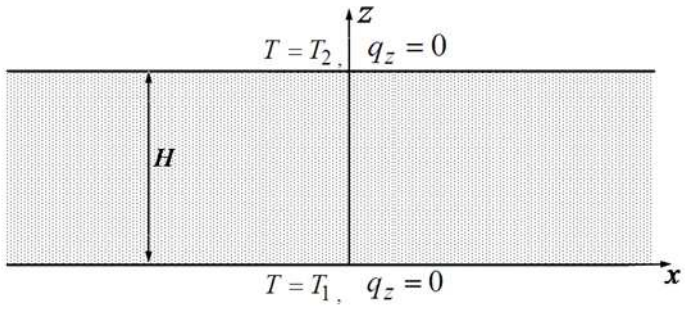



Рис.1. Модель задачи. $T$ - температура, $q_z$ - вертикальная компонента массовой скорости, $H$ - толщина слоя

Используя эти масштабы систему стационарных уравнений, описывающую конвекцию в рассматриваемых условиях и включающую уравнения Дарси, неразрывности, баланса энергии и уравнение состояния, запишем в безразмерном виде

$$\frac{\varepsilon\delta\gamma\mathbf{q}}{Ra\rho}+\nabla p+\varepsilon\gamma\rho\mathbf{e_z}=0,\ \ div\mathbf{q}=0$$

$$\mathbf{q}\nabla T=\Delta T-\varepsilon(\gamma-1)q_z,\ \ p=\rho T \qquad (1.1)$$

$$Ra=\frac{k(\rho^0)^2C_p g\beta_T(T_1-T_2)H}{\mu\lambda_m},\ \varepsilon=\frac{gH}{\gamma RT^0},\ \delta=\frac{T_1-T_2}{T^0},\ \beta_T=\frac{1}{T^0},$$

$$T^0=\frac{T_1+T_2}{2}$$

Здесь $\mathbf{q}$, $q_z$ - массовая скорость фильтрации газа и ее вертикальная компонента; $\rho$ - плотность газа; $p$ - давление в газе; $T$ - температура пористой среды; $\beta_T$ - коэффициент теплового расширения; $R$ - удельная газовая постоянная; $Ra$ - число Релея, $\varepsilon$ - критерий сжимаемости газа, $\delta$ - безразмерный параметр перепада температуры, $\gamma$ - показатель адиабаты.

Граничные условия:

$$T_{z=0}=1,\quad T_{z=1}=0,\quad (q_z)_{z=0,1}=0 \qquad (1.2)$$

$$\frac{1}{\Omega}\iint_{\Omega}\rho dv=1 \qquad (1.3)$$

Здесь $\Omega$ - область, занимаемая конвективной ячейкой и ее объем.

**2.** Устойчивость **механического равновесия.** Из (1.1), (1.2) для распределений $p_0, T_0, \rho_0$ при механическом равновесии получим систему уравнений

$$p_0'+\varepsilon\gamma\rho_0 0,\qquad p_0=\rho_0 T_0 \qquad (2.1)$$

$$T_0''=0$$

Здесь штрих производная по z.

Решение (2.1) с учетом граничных условий (1.2) запишется в виде

$$T_0=1-\delta(z-\frac{1}{2}),\qquad p_0=AT_0^{\beta},\quad \rho_0=AT_0^{\beta-1},\quad \beta=\frac{\varepsilon\gamma}{\delta} \qquad (2.2)$$

Здесь $A$ - нормировочный коэффициент, определяемый из условия (1.3)

Представим решение системы (1.1)- (1.3) в виде

$$p = p_0 + p', \quad T = T_0 + T', \quad \rho = \rho_0 + \rho', \ \mathbf{q} = \mathbf{q}', \tag{2.3}$$

где штрихом обозначены малые поправки

Подставляя (2.3) в систему (1.1), (1.2) в линейном приближении относительно малых величин, опуская штрихи, получим систему

$$\frac{\varepsilon\delta\gamma\mathbf{q}}{Ra\rho} + \nabla p + \varepsilon\gamma\rho\mathbf{e_z} = 0, \ div\mathbf{q} = 0$$

$$\Delta T = -\delta(1-K)q_z, \qquad \rho = \frac{p - \rho_0 T}{T_0} \tag{2.4}$$

Здесь $K = \dfrac{\varepsilon(\gamma-1)}{\delta}$ - число Шварцшильда, для совершенного газа.

Вместо давления $p$ введем другую функцию

$$\Pi = p\omega(z), \quad \omega(z) = e^{\varepsilon\gamma\int_0^z \frac{dz}{T_0}} = \left(\frac{T_0(z)}{T_0(0)}\right)^{-\beta} \tag{2.5}$$

Тогда система (2.4) запишется в виде

$$\frac{\varepsilon\delta\gamma\omega\ \mathbf{q}}{Ra\ \rho} + \nabla p - \frac{\varepsilon\gamma\omega\rho_{\ 0}T}{T_0}\mathbf{e}_{\mathbf{z}} = 0, \ div\mathbf{q} = 0$$

$$\Delta T = -\delta(1-K)q_z, \qquad \rho = \frac{p - \rho_0 T}{T_0} \tag{2.6}$$

Применим к первому уравнению этой системы оператор $rotrot$ и проецируем полученное уравнение на ось z. В результате с учетом уравнения неразрывности получим систему

$$\frac{\delta}{Ra}\left(\Delta\left(\frac{\omega q_z}{\rho_0}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left[q_z\left(\frac{\omega}{\rho_0}\right)'\right]\right) - \frac{\omega\rho_0}{T_0}\Delta_{xy}T = 0$$

$$\Delta T = -\delta(1-K)q_z, \qquad \rho = \frac{p - \rho_0 T}{T_0} \tag{2.6}$$

Система (2.6) решена методом Галеркина. Решение для вертикальной компоненты массовой скорости ищем в виде

$$q_z = e^{i\mathbf{kr}}\sum_{l=1}^{N} q_l \sin\pi l z \tag{2.7}$$

Здесь $\mathbf{k}(k_x, k_y)$-волновой вектор по горизонтали, $\mathbf{r}(x, y, z)$-радиус вектор

Далее подставляем (2.7) во второе уравнения (2.6) и интегрируя его получим распределение температуры. Далее подставляя (2.7) и полученное $T$ в первое уравнение (2.6) и потребовав ортогональности невязки всем рассмотренным базисным функциям $\sin\pi l z$, получим линейную алгебраическую систему уравнений относительно коэффициентов разложения (2.7). Условие разрешимости последней дает искомый критерий.

**3. Результаты**. Рисунок 2 иллюстрирует зависимости критического числа Рэлея $Ra_c$ от перепада температуры $\delta$ для различных значений критерия сжимаемости $\varepsilon$.

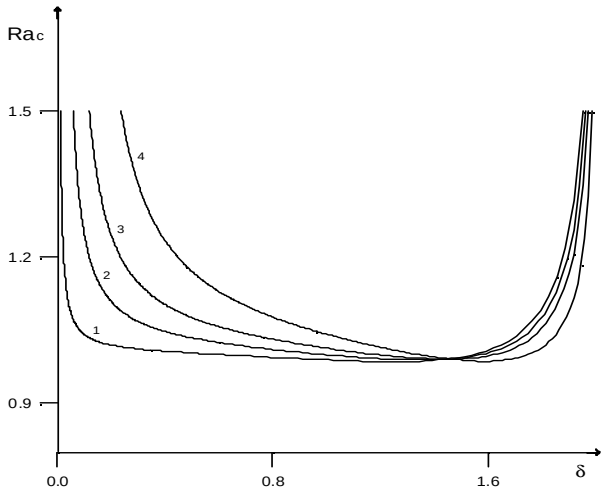



Рис.2. Зависимость критического числа Рэлея $Ra_c$ от перепада температуры $\delta$ для $\varepsilon = 0.01;\ 0.05;\ 0.1;\ 0.2$ (1 – 4)

Ранее, на основе решения аналогичной задачи для малых значений $\delta$ и $\varepsilon$, предполагалось, что эти зависимости монотонные, т.е. с ростом перепада температуры критическое число Рэлея падает, а с ростом критерия сжимаемости $\varepsilon$ растет. Однако рис.2 показывает, что зависимости $Ra_c(\delta)$ меняются немонотонным образом и при некотором значении $\delta = \delta_m(\varepsilon)$, зависящем от $\varepsilon$ достигают минимума. При этом точка минимума $\delta = \delta_m$ с ростом критерия сжимаемости $\varepsilon$ смещается вправо. В некотором диапазоне изменения $\delta$ с ростом $\varepsilon$ критическое число Рэлея растет, как ранее и предполагалось. Однако при больших значениях $\delta$ происходит инверсия указанной зависимости.

Описанные закономерности зависимости критического числа Рэлея от $\delta$ и $\varepsilon$ качественно полностью совпали с аналогичными зависимостями для пористого кольца, которые впервые были найдены в [3]. Поэтому, можно сказать, что эти закономерности не зависят от геометрии области и определяются эффектами сжимаемости.

**Литература:**

1. *Полежаев В.И.* Методы моделирования конвективных, волновых процессов и теплообмена в околокритических средах (Обзор)// Изв. РАН.МЖГ, №1. 2011. С.3-20.
2. *Полежаев В.И.* Моделирование конвективных, волновых процессов и теплообмена в около-сверхкритических средах (Обзор)// Изв. РАН.МЖГ, №2. 2011. С.9-32.
3. *Рамазанов М.М.* Конвекция совершенного газа в пористой среде между двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами большой длины// Изв. РАН. МЖГ. 2010. №2. С.84-96.
4. *Рамазанов М.М., Махмудова М.М.* Конвекция совершенного газа в тонком коаксиальном зазоре, заполненном пористой средой. // Материалы III Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов». 27-30 сентября 2010 г. – Махачкала, 2010. – С.36-46
5. *Рамазанов М.М.* Аналитическое исследование стационарной конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса в пористом тонком кольцевом цилиндре в теплопроводном пространстве // Изв. РАН. МЖГ. 2012. №2. С 64-77.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГИОНА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Магомедов И.Ш.

*Филиал ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля 39а.*

В настоящее время темпы вовлечения возобновляемых источников энергии в топливно-энергетический баланс страны находятся на неоправданно низком уровне. Это связано с отсутствием эффективной государственной политики в этой области, неразработанностью необходимой методической базы оценки эффективности внедрения возобновляемых источников энергии, незаинтересованностью предпринимателей и неподготовленностью предприятий к серийному выпуску дорогостоящего оборудования для солнечных, ветровых, геотермальных энергоустановок.

Вместе с тем, в настоящее время имеются все объективные предпосылки к широкому производству и внедрению оборудования, работающего на базе возобновляемых источников энергии. Это связано, прежде всего, с продолжающимся ростом цен на органическое топливо, с ростом числа рассредоточенных мелких и средних (децентрализованных) потребителей энергии в России, наличием значительной научной базы разработок для производства и внедрения оборудования, работающего на базе возобновляемых источников энергии.

Для Республики Дагестан использование возобновляемых источников энергии имеет особое значение.

Во-первых, Республика Дагестан, занимая площадь 50,3 тыс. км$^2$ и с населением 2,5 млн. человек, является самым крупным субъектом РФ по ресурсам возобновляемых источников энергии, а именно солнечной, геотермальной и гидравлической и др.

Во-вторых, характерной особенностью Дагестана является наличие большого числа мелких потребителей энергии, удаленных от источников энергии и центров ее распределения - это хутора, фермы и другие мелкие крестьянские хозяйства. Строительство линий электропередач или газопроводов к таким потребителям - экономически невыгодно.

В-третьих, нетрадиционные энергоресурсы, используемые в отдаленных районах республики для автономных энергоустановок, замещают, в основном, электроэнергию, а также уголь и дрова, которые дотируются из бюджета. Таким образом, использование возобновляемых источников энергии позволит значительно сократить государственные дотации.

В-четвертых, использование возобновляемых источников энергии обеспечивает экологическую безопасность отдельных городов и населённых пунктов со сложной экологической обстановкой, а также в местах массового отдыха населения.

В-пятых в республике имеется высокий научный потенциал разработок по созданию и внедрению возобновляемых источников энергии в лице Института высоких температур - полигона «Солнце», институт проблем геотермии ДНЦ РАН, ОАО «Геобуртерн» и др.

Республика Дагестан, занимая площадь 50,3 тыс.км$^2$, и с населением в 2,1 млн.чел., является самым крупным субъектом Российской Федерации на

Северном Кавказе. Наличие природных ресурсов и, прежде всего, гидравлической энергии, географическое расположение республики – все это создает благоприятные условия для ее экономического развития. Но в последние десятилетия сложилась ситуация, когда Дагестан, из региона – донора федерального бюджета, превратился в депрессивный, дотационный регион, с полным набором экономических, и в большей части экологических проблем. Больная природа, окружающая среда и их оздоровление – большая нагрузка на энергетику и в целом на экономику Дагестана. [3]

Потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на душу населения в год составляет 1,5 т условного топлива, что примерно в 5 раз меньше среднего по России значения. Динамика изменения потребления и производства различных видов ТЭР показывает, что положительный годовой баланс имеет место только в электроэнергетике.

Главная причина дефицитности ТЭК – ограниченность запасов органических видов топлива. Запасы каменного угля незначительны (менее 700 млн.т) и по условиям залегания их извлечение экономически нецелесообразно. То же можно сказать и о запасах торфа (менее 5 млн.т), обладающего высокой влажностью (70%) и зольностью (более 50%). Несмотря на более чем столетнюю историю нефте- и газодобычи в Дагестане, все продукты нефте - и газопереработки ввозятся в республику из–за отсутствия нефте- и газоперерабатывающих производств в самой республике. Последнее обстоятельство приводит к дополнительным затратам в ТЭК, создавая значительный дефицит, особенно в жидком топливе. Следует отметить, что и ранее развитие экономики Дагестана в большой степени сдерживалось ограниченностью топливной базы.

Серьезные проблемы, отчасти связанные с ТЭК, сложились в республике и в области экологии.

За последние 150–170 лет в Дагестане площадь, занимаемая лесами (98% из них расположены в горных районах), уменьшилась по различным оценкам с 21–23 до 5,6–7,1% со всеми вытекающими отсюда последствиями – сокращением почти вдвое ледников, резким уменьшением травостоя, нарушением в целом гидробаланса больших и малых рек, практическим исчезновением террасного земледелия. Непрогнозируемые паводки, эрозия почв горных склонов, а также оползневые явления ежегодно смывают более 12 млн.т верхнего плодородного слоя, наносят при этом миллиардные убытки экономике республики.

Выбросы вредных веществ топливосжигающими энерготехнологиями и транспортной энергетикой оцениваются в 5,3 млн. тонн в год, вызывая отрицательные изменения в химическом составе воздуха. Со спадом промышленного производства с 1992 г. и резким уменьшением завоза угля, дров вредные выбросы значительно уменьшились, но ситуация с практически неработающей промышленностью не вечна, и при сохранении имеющихся планов развития промышленности, транспорта, энергокомплекса они вновь значительно возрастут.

Сложившаяся в Республике Дагестан ситуация может быть разрешена за счет широкомасштабного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии [4,5] и в первую очередь гидравлических, солнечных, ветровых, геотермальных и биологических ресурсов путем создания как отдельных микро–, малых ГЭС, солнечных, ветровых, биоэнергетических и геотермальных установок, так и совместных комплексов по их использованию. В республике подготовлен к принятию Народным собранием Республики Дагестан

закон "Об использовании возобновляемых и местных нетрадиционных энергоресурсов". Однако Закон требует значительной доработки, поскольку практически не затрагивает вопросов рыночного регулирования производства в области НВИЭ. Кроме того, он не соответствует Концепции Федерального Закона о НВИЭ и требует соответствующей доработки.

Следует отметить, что Республика Дагестан на протяжении длительного времени занимается вопросами нетрадиционных возобновляемых источников энергии и имеет в этой области определенные достижения, как в строительстве различных объектов, так и в создании исследовательских центров по этим проблемам [7].

Одно из главных богатств Дагестана – гидроэнергоресурсы. По территории Дагестана протекает 4320 больших и малых рек общей протяженностью 24125 км, на каждый квадратный километр приходится 455 м речной сети, что в 5 раз превышает средний показатель для всей территории бывшего СССР, а по плотности гидроэнергоресурсов – в 9,9 раза. Более 278 рек имеют народнохозяйственное значение. В республике сосредоточено почти 40% гидроэнергетического потенциала речного стока Северного Кавказа (по мощности 6,3 млн. кВт и по выработке 40,5 млрд. кВтч/год) при этом насыщенность территории гидроэнергетическими ре6сурсами оставляет ≈ 1 млн. кВтч/(км$^2$ год). Обладая таким энергетическим потенциалом, республика потребляет на душу населения электроэнергии в 3–4 раза меньше, чем в среднем по России, а по отдельным горным районам в 8–10 раз меньше, и это притом, что 85–90% потенциальных гидроресурсов сосредоточены в горах. При этом в энергетическом балансе гидроэнергетика составляет только 18–19%, а топливосжигающие технологии – до 80%. Потенциал малых (протяженностью 10–25км) и мельчайших (до 10 км) рек значителен и составляет 16% от общего гидроэнергетического потенциала республики

Республика располагает большими запасами геотермальных энергоресурсов. Прогнозные запасы на изученной бурением части Дагестана составляют 8 млн. м$^3$/сутки. На территории республики более 30 месторождений, 10 из которых разведаны бурением с прогнозными запасами в объеме 250 тыс. м$^3$/сутки и с эксплуатационными запасами в 120 тыс. м$^3$/сутки. По имеющимся данным валовой потенциал только термальных вод на глубине до 3 км составляет 50 млн. т условного топлива в год. В настоящее время население городов Махачкалы, Кизляра и Избербаша использует термальную воду для коммунально–бытовых нужд. Однако сегодня доля геотермальных источников энергии в ТЭБ республики незначительна – немногим более 0,5%, тогда как в перспективе она могла бы составлять до 20%, что позволило бы резко уменьшить сжигание топлива на коммунальные нужды.

Велики в Дагестане и ресурсы солнечной энергии [6]. Продолжительность солнечного сияния составляет от 214 дней в равнинных и до 315 – в горных районах республики. Интенсивность поступления солнечной радиации в ясный день достигает в горных районах 1 кВт/м$^2$. Активное использование солнечной энергии для теплоснабжения также позволит уменьшить потребление топлива на коммунальные нужды. За последние годы различными организациями спроектирован и смонтирован ряд гелиосистем горячего водоснабжения на турбазах, санаториях и других объектах с сезонным характером потребления, где такие системы дают значительный эффект. Однако ограниченность производственных мощностей и отсутствие финансирования сдерживают эти работы.

Ветроэнергетические ресурсы по оценкам, полученным на основе многолетних данных метеорологических станций, расположенных на территории республики, составляют порядка 60 млрд. кВтч /год. Пока недостаточно изучены ветровые режимы в горных районах, где имеются локальные концентраторы ветра, вызванные сложным рельефом местности. Энергия ветра практически не используется. Несколько отечественных агрегатов АВЭУ–4 производства НО "ВЕТРОЭН", установленных в различных районах республики, оказались неэффективными по качеству вырабатываемой энергии и надежности.

Из биоэнергетических ресурсов интерес представляют органические отходы животноводства, поскольку эта отрасль – одна из наиболее развитых отраслей экономики в республике.

Наличие большого разнообразия энергоресурсов ставит задачу оптимального планирования развития топливно-энергетического комплекса республики с учетом ограничений на имеющиеся технологические и инвестиционные возможности, экологические последствия [1-7].

Очевидно, что основной электрификации в республике в обозримом будущем останется строительство крупных и малых ГЭС. Имеются налаженная производственная база, четкая программа ввода мощностей, кадровое обеспечение. Технико-экономические показатели гидростанций также общеизвестны. Это самые экономичные, надежные источники энергии.

**Литература:**

1. *Магомедов И.Ш., Магомедова Н.А.* Теоретические основы формирование социально-экономических предпосылок устойчивого развития региона.// Журнал Региональные проблемы преобразования экономики - Махачкала:2009, №2-0,5пл.
2. *Магомедова Н.А.* Возобновляемая энергетика как фактор устойчивого развития региона (на примере РД)// журнал Финансы и кредит Региональная экономика: теория и практика - Москва 2009г, №43-0,9п.л.
3. *Магомедова Н.А.* Концепция развития возобновляемой энергетики РД как составляющая часть инновационной экономической политики // Вест. Москва. Региональная экономика: теория и практика 2010 г. №3. Ст. 32-35.
4. *Магомедова Н.А.* Проблемы перспективы сбалансированного развития южного региона // Вест. Махачкала. РППЭ 2010г. №1. Ст-21-24.
5. *Магомедова Н.А.* Стратегия привлечения возобновляемых энергоресурсов в развитие потенциала энергетики как составная часть инновационной политики региона // Вест. Махачкала. РППЭ, , 2011г. №1. Ст.87-91.
6. *Магомедова Н.А., Цапиева О.К.* Ресурсы и эффективность использования солнечной энергии в Республике Дагестан // СПб.: Политехника 2008. 114 с.
7. *Амадзиев А.М., Магомедова Н.А., Цапиева О.К.* Концепция использования солнечной энергии в Республике Дагестан // Махачкала 2009.

# ГЕЛИОБИОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ С ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ

Дибиров Я.А., Искендеров Э.Г., Милихин И.А., Зейналов М.Ш.

*Филиал ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля 39а, e-mail: jakhya@yandex.ru*

Несмотря на кажущуюся обеспеченность запасами органического топлива, в России уже сегодня имеются предпосылки и огромные ниши для эффективного применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), прежде всего, в районах, удаленных от централизованных систем энергоснабжения. Если учесть, что системы централизованного энергоснабжения покрывают лишь 1/3 территории России, а на 70% территории с населением около 21 млн человек энергоснабжение потребителей осуществляется с помощью автономных энергоустановок, работающих на дорогом привозном топливе, и газифицировано около 50% городов и 35% сельских населенных пунктов, то вовлечение в энергобаланс этих районов различных ВИЭ стала актуальной задачей [1]. В условиях России в решении проблемы энергоснабжения потребителей, в том числе и расположенных в зоне централизованного энергоснабжения, зачастую предпочитающих использовать собственные источники энергоснабжения, ведущее место займут современные высокорентабельные биогазовые технологии.

Сегодня биогаз если не полностью, то хотя бы частично сможет обеспечить энергоснабжение автономных потребителей. Кроме того, при переработке отходов с целью производства биогаза эти отходы полностью идут в дело.

Производство биогаза позволяет предотвратить выбросы метана в атмосферу. Метан оказывает влияние на парниковый эффект в 21 раз более сильное, чем диоксид углерода, и находится в атмосфере 12 лет [2]. Захват метана — лучший краткосрочный способ предотвращения глобального потепления.

Биогаз может быть использован в любых газовых приборах. К примеру, потребность в газе в сутки одной семьи из 5 ÷ 6 человек при 3-разовом приготовлении пищи, горячей воды и кормов для животных и птицы составляет около 4 ÷ 5 $м^3$ [3].

Получение биогаза из органических отходов основано на свойстве последних выделять горючий газ в результате так называемого «метанового сбраживания» в анаэробных (без доступа воздуха) условиях. Биогаз, образующийся при метановом сбраживании, представляет собой смесь, состоящую из 50 ÷ 80% метана, 20 ÷ 50% углекислого газа, примерно 1 % сероводорода, а также включающую в себя незначительное количество некоторых других газов (азота, кислорода, водорода, аммиака и др.). Теплота сгорания его составляет примерно 22 ÷ 27 МДж/кг [4].

Анаэробное сбраживание проходит в три этапа:

1 этап – совокупность разнообразных реакций, приводящих к разложению веществ на фрагменты с малой молекулярной массой;

2 этап – дальнейшее разложение, проходящее при участии ацетогенных бактерий, которые конвертируют спирты и высшие кислоты в уксусную кислоту, водород и диоксид углерода;

3 этап – разложившиеся на первых двух этапах вещества используются метаногенными архебактериями с образованием метана и диоксида углерода [5].

Процесс сбраживания может производиться в психрофильном при

температурах 8 ÷ 20 $^{o}$C, мезофильном при температурах 30 – 37 $^{o}$C и термофильном при 50 ÷ 55 $^{o}$C режимах. Для поддержания требуемой температуры в действующих в настоящее время биогазовых установках (БГУ) осуществляется подогрев сырья в биореакторах прокачкой через змеевики горячей воды, подготовленной в котле, работающем на полученном в биореакторе биогазе. Доля биогаза для такого подогрева составляет обычно 20 ÷ 25 % от суммарного его выхода из биореактора [4].

Для эффективной работы установки, производящей биогаз, кроме строго анаэробной среды, необходимо поддерживать в реакторе оптимальные *температурный* и *кислотный* (pH = 7 ÷ 8) режимы.

Выход биогаза зависит от содержания сухого вещества и вида используемого сырья. Из тонны навоза крупного рогатого скота получается 50 ÷ 65 м³ биогаза с содержанием метана 60 %, 150 ÷ 500 м³ биогаза из различных видов растений с содержанием метана до 70 % [4].

Производительность биогаза зависит от следующих параметров:

- объема реактора установки (чем больше объем установки, тем больше выход газа);
- температуры в реакторе, при которой происходит брожение;
- влажности загружаемого субстрата (процесс брожения может происходить при влажности от 50% до 95%, однако доказано, что процесс метанообразования оптимально протекает при влажности сырья от 90 ÷ 95 %);
- времени пребывания субстрата в реакторе (оптимальное время пребывания субстрата в реакторе различается в зависимости от рабочей температуры и вида сбраживаемого сырья: при мезофильном типе ферментации – 25 ÷ 30 дней, при термофильном – 10 ÷ 15 дней);
- площади поверхности частиц сырья (чем меньше частички субстрата, тем лучше.);
- соотношения в субстрате элементов: углерод : азот : фосфор (оптимально C : N : P в диапазоне от 75 : 5 : 1 до 125 : 5 : 1) [6].

Выработка биогаза зависит и от многих других причин. Например, на поверхности органической массы периодически образуется плавающая корка, мешающая выходу биогаза. Поэтому ее необходимо устранять, перемешивая содержимое биореактора до пяти-шести раз в сутки. Перемешивание способствует также равномерному распределению температуры и кислотности в биомассе, находящейся в камере сбраживания.

Из вышеизложенного следует, что наиболее эффективны БГУ с термофильным режимом сбраживания, в которых поддерживаются оптимальные температурный и кислотный режимы и другие параметры, влияющие на выход биогаза. Внедрение БГУ термофильного режима сбраживания позволит более чем в два раза повысить выход биогаза, чем во внедренных в настоящее время БГУ с мезофильным режимом сбраживания при прочих равных условиях.

*Достоинствами термофильного режима* сбраживания в БГУ являются:

- интенсивное газовыделение, малое время для полного разложения субстрата;
- полная стерильность полученного биошлама, позволяющая применять его в качестве кормовых добавок животным.

У этого режима есть и свои *недостатки*:

- значительное снижение производительности газа при отклонении температуры на 2 ÷ 3 $^{o}$C от оптимума;
- большие энергетические затраты на поддержание температуры.

Для создания в биореакторе изотермического режима, соответствующего оптимальной температуре термофильного брожения, наиболее эффективным является применение фазопереходных тепловых аккумуляторов с температурой плавления, равной температуре оптимума. Применение же солнечных коллекторов позволит полностью исключить необходимость дополнительных энергозатрат на поддержание необходимой температуры в биореакторе. Кроме того, конструкция БГУ, в которой биореактор установлен внутри теплоизолированной «рубашки», позволит максимально использовать и тепловой эффект реакции брожения в субстрате.

Предлагаемая принципиально новая схема гелиобиогазовой установки (рис.1) состоит из солнечного коллектора (1) и биогазовой установки, состоящей из цилиндрической водяной рубашки (3), изолированной снаружи утеплителем, внутри которой установлен сам биореактор (2). Коллектор, рубашка и соединительные трубопроводы системы заполняются теплоносителем (водой). Нагретый теплоноситель по термосифонному принципу циркулируется по контуру коллектор – рубашка. Во избежание обратной циркуляции теплоносителя в темное или пасмурное время суток на подающем трубопроводе перед входом в рубашку и на выходе из рубашки расположены обратные клапаны (5).

Исключительно важную роль в установлении необходимого для термофильного сбраживания БГУ оптимального температурного режима играют установленные вокруг биореактора (снизу и по боковой поверхности) три пластинчатых контейнера с фазопереходным теплоаккумулирующим составом (3). Разовая зарядка аккумуляторов тепла достаточна для поддержания необходимого температурного режима в биореакторе в течение трех зимних несолнечных суток с учетом максимальных теплопотерь БГУ.

*Выбор исходного материала для сбраживания*. От выбора исходного сырья зависит производительность БГУ. Высокую производительность имеют БГУ, использующие в качестве сырья растительную массу. Наиболее привлекательным, с учетом ряда требований, предъявляемых к исходному сырью биогаза, растением является тростник (в обиходе камыш), достигающий в высоту до 5 м и распространенный почти по всей территории России, часто образуя обширные заросли. Урожайность зеленой массы 8 ÷ 20 т с гектара [7]. В отличие от предлагаемых специально засеянных плантаций различных растений (рапс, кукуруза и др.) для биогаза, тростник является самовозобновляемым растением, не содержащим различных пестицидов.

*Выбор теплоаккумулирующего материала*. Основными требованиями, предъявляемыми к фазопереходным теплоаккумулирующим материалам для БГУ, являются соответствие температуры плавления теплоаккумулирующего состава температуре оптимального режима сбраживания и высокое значение энтальпии фазового перехода.

В настоящее время поиск теплоаккумулирующих материалов, работающих в диапазоне температур до 100 $^{o}$C, сосредоточен на изучение смесей различных кристаллогидратов и добавок к ним, уменьшающих или устраняющих ряд недостатков чистых кристаллогидратов при использовании их как теплоаккумулирующих материалов: склонность к переохлаждению, быстрый выброс теплоты за счет взрывной кристаллизации, эффект испарения кристаллизационной воды, влияющий на длительность многократного термоциклирования, расслоение и др.

После проведенного литературного обзора в качестве теплоаккумулирующего материала для биореактора была выбрана смесь

кристаллогидратов ацетата натрия с температурой плавления 58 $^{o}$C и тиосульфата натрия с температурой плавления 49 $^{o}$C.

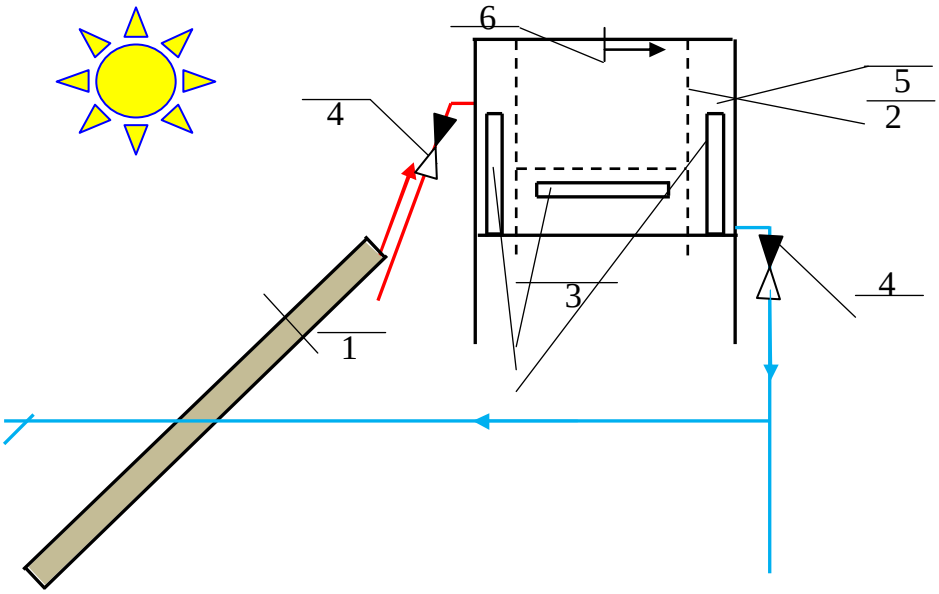



Рис 1. Принципиальная схема гелиобиогазовой установки с тепловым аккумулятором (1 – солнечный коллектор; 2 – биореактор; 3 – тепловой аккумулятор; 4 – обратный клапан; 5 – рубашка БГУ; 6 – газ к потребителю)

Для определения параметров технологического цикла предлагаемой гелиобиогазовой установки сконструирован ее экспериментальный образец с одним плоским солнечным коллектором площадью 0,8 м$^2$, емкостью биореактора 21 л. Испытания проводятся на научной станции (полигон «Солнце») филиала Объединенного института высоких температур РАН в Махачкале.

В биореактор загружен субстрат, который представляет собой смесь одного кг сухого мелко нарубленного тростника и 10 л воды. Образование и концентрация биогаза в реакторе фиксируется по показанию манометра. Выход биогаза определяется по показанию роторного газового счетчика G4РЛ, установленного на трубе подачи биогаза потребителю. Во избежание избыточного давления в биореакторе при показании давления на манометре более 1 атм газ выпускается в атмосферу через газовый счетчик. После загрузки субстрата в биореактор необходимо ежедневно следить за температурой и характером среды субстрата по показаниям термометров и анализу pH среды. В случае изменения значения pH среды менее 7 в субстрат через воронку заливают известковый раствор необходимой концентрации и доводят его до значений в диапазоне 7 ÷ 8. За весь период сбраживания показания термометра в растворе субстрата должна находиться в диапазоне температур 52 ÷ 54 $^{o}$C, что соответствует температуре плавления полученной смеси кристаллогидратов.

Дальнейшие исследования будут продолжены в плане получения более эффективных фазопереходных теплоаккумулирующих составов физико-химическим исследованием кристаллогидратных и безводных систем неорганических и органических соединений, соответствующих температуре плавления 50 ÷ 60 $^{o}$C. Кроме того, планируется получение параметров технологического цикла на существующем экспериментальном образце БГУ, в качестве исходного сырья которой будут использованы навоз КРС и ряд других органических отходов.

**Литература:**

1. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Энергетика в современном мире. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 168 с.
2. *Василов Р.Г.* Биогаз: мировой опыт и перспективы в России // Журнал промышленного, научно-технического и экономического развития. – 2009. №17.
3. СНиП 42-01-2002. Газораспределительные системы. – М. 2004.
4. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. – М: Физматлит, 2010. - 256 с.
5. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие / А. да Роза: пер. с англ. под редакцией С.П. Малышенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»: М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
6. *Шаланда А.В.* Микробиологические основы получения биогаза в биогазовых установках: http:www.hghltd.yandex.net/yandbtm.
7. *Губанова И.А., Киселева К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н.* Иллюстрированный определитель растений средней России. Т. 1. – М.: Т-во научных изданий КМК, Ин-т технологических исследований, 2002. – 526 с.

# ОБОГАЩЕНИЕ ВОДЫ МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ ЭЛЕКТРОЛИЗОМ

Алиев З.М., Магомедова Д.Ш., Гереханова Р.А., Гатиева С.Д.

*ФГБОУ Дагестанский государственный университет;*
*Махачкала, Россия; 367025, ул.М.Гаджиева 25.*

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в настоящее время 1,2 млрд. человек не имеет воду в необходимом количестве, миллионы людей умирают ежегодно от болезней, вызванных растворенными в ней веществами. В январе 2008 года на Всемирном экономическом форуме ООН (World Economic Forum Annual Meeting 2008), проходившем в Швейцарии, утверждалось, что к 2025 году население более половины стран мира будет испытывать недостаток в чистой воде, а к 2050 году — 75%. Количество вредных веществ в воде постоянно увеличивается как в развитых, так и в развивающихся странах: от привычных загрязнителей (тяжёлых металлов, продуктов нефтеперегонки) до таких канцерогенных соединений, как эндокринные дизраптеры (endocrine disrupter) и нитрозоамины (nitrosamines), от "привычных" паразитов, патогенных бактерий и вирусов (например, холерного вибриона) до относительно недавно открытых прионов. Увеличивающееся население Земли, особенно та его часть, что проживает в городах, а также продолжающийся рост потребления воды — особенно в производстве, сельском хозяйстве и энергетике — тянет за собой и большие затраты водных ресурсов из традиционных источников.

Для того чтобы избежать водного кризиса, разрабатываются новые технологии очистки и дезинфекции воды, её опреснения, а также методы её повторного использования. Однако помимо научных изысканий необходимы действенные методы организации контроля над водными ресурсами.

Нормальной питьевой воде мало быть просто чистой - она должна иметь оптимальный микроэлементный состав. Сегодня единственное и естественное решение проблемы микроминерального обеспечения организма - максимальное приближение микро- и макроэлементного состава окружающей среды - а это прежде всего питьевая вода - к естественному минеральному фону, наиболее благоприятному для человека. А для этого питьевая вода должна быть не только очищена от примесей - искусственные фильтры с этим тоже справляются, - но и приближена по своему микроминеральному составу к лучшим природным эталонам [1-6].

В работе представлены экспериментальные данные по разработке технологического процесса обогащения воды микроэлементами электролизом.

Установка представляет собой трехкамерный электролизер общим объемом 650 мл, электродные пространства разделяли катионообменной и анионообменной мембранами, через которые в процессе электролиза проходят ионы. В качестве катода использовали титановую пластинку с площадью поверхности 70,4 $см^2$, а в качестве анодного материала - графит с площадью поверхности 27 $см^2$. Электроды на изоляции пропущены через крышку электролизера. Крышка электролизера снабжена трубками для отвода газов из анодного и катодного пространств, имеются выводы для электродов. Схема установки для электролизера приведена на рис.1.

В катодную камеру заливали раствор NaOH (0,1н), в анодную камеру – поочередно растворы, содержащие ионы которыми при прохождении через

мембрану обогащается исследуемый раствор в средней камере. В средней камере – раствор лимонной кислоты или дистиллированная вода.

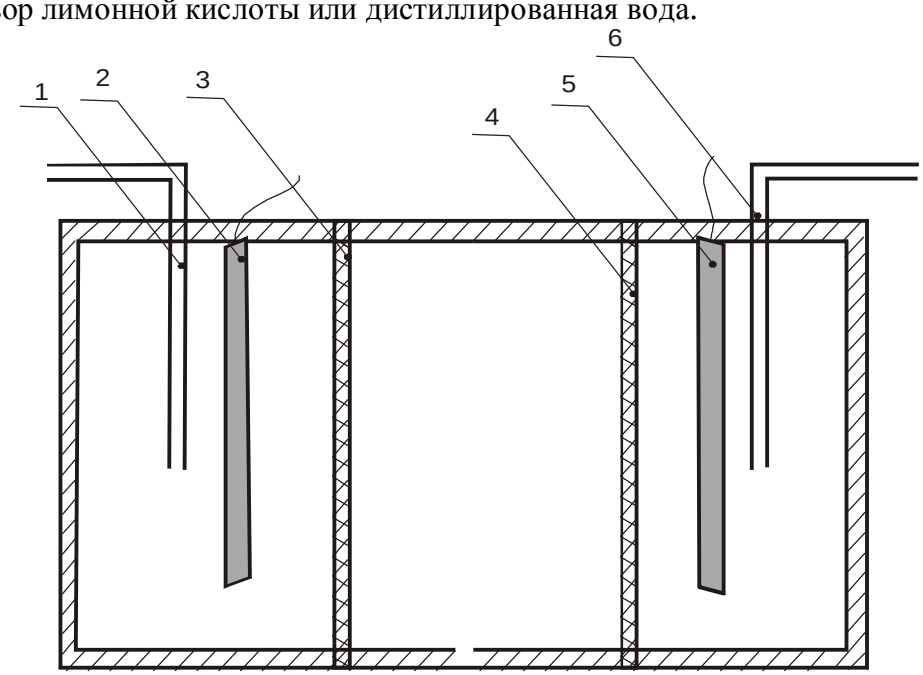



Рис.1. Схема электролизера: 2, 5 – электроды, 3, 4 – мембраны, 1,6 – отводы для газов

При электролизе водного раствора на катоде и аноде соответственно протекают электродные реакции по следующим схемам:

Катод: $2Í_2Î + 2å \rightarrow Í_2 + 2Î Í^-$

Анод: $Í_2Î - 2å \rightarrow \frac{1}{2}Î_2 + 2Í^+$

В таблице 1 представлены данные по изменению концентрации катионов в результате переноса их через мембраны.

Таблица 1. Изменение концентрации катионов в результате электрохимического переноса

| Катионы металлов в лимонной кислоте | Концентрация, мг/л | ПДК, мг/л |
|---|---|---|
| $Cr^{3+}$ | - | - |
| $Ni^{2+}$ | 1,169 | 0,1 |
| $Co^{2+}$ | 1,203 | 0,1 |
| $Cu^{2+}$ | 3,217 | 1-2 |

Как видно из таблицы 1, в результате электролиза, в средней камере электролизера накапливаются ионы за счет переноса из анодной камеры. Концентрация соответствующих ионов можно произвольно менять разбавлением раствора лимоннокислой соли.

В результате электролиза в средней камере образуется соединение с характерными для лимонной кислоты и соответствующего микроэлемента свойствами.

В таблице 2 представлены экспериментальные данные по изменению концентрации указанных ионов металлов.

В таблице 3 представлены данные изменения концентрации катионов при их совместном присутствии.

Таблица 2. Изменение концентрации ионов при электролизе в дистиллированной воде

| Катионы в дистиллированной воде | Концентрация, мг/л | ПДК, мг/л |
|---|---|---|
| $Cr^{3+}$ | - | - |
| $Ni^{2+}$ | 5,071 | 0,1 |
| $Co^{2+}$ | 2,014 | 0,1 |
| $Cu^{2+}$ | 6,211 | 1-2 |

Таблица 3. Перенос катионов микроэлементов в результате электролиза из 0,05 М анодного раствора в среднюю камеру

| Смесь катионов: $Co^{2+}$, $Cr^{3+}$, $Ni^{2+}$, $Cu^{2+}$ в лимонной кислоте | Концентрация, мг/л |
|---|---|
| $Cr^{3+}$ | - |
| $Ni^{2+}$ | 1,100 |
| $Co^{2+}$ | 5,590 |
| $Cu^{2+}$ | 3,959 |

Таблица 4. Перенос катионов микроэлементов в результате электролиза из 0,05 М смешанного анодного раствора в дистиллированную воду средней камеры

| Смесь катионов: $Co^{2+}$, $Cr^{3+}$, $Ni^{2+}$, $Cu^{2+}$ в дистиллированной воде | Концентрация, мг/л |
|---|---|
| $Cr^{3+}$ | 1,000 |
| $Ni^{2+}$ | 3,917 |
| $Co^{2+}$ | 2,433 |
| $Cu^{2+}$ | 12,36 |

Как видно из таблиц 3, 4 из анодного раствора, содержащего различные катионы наблюдается обогащение раствора лимонной кислоты и дистиллированной воды микроэлементами.

**Литература:**

1. *Алексеев А.И.* Химия воды. - СПб: СЗТУ, 2001.
2. Справочник по гидрохимии. - Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
3. *Ковальский В.В.* Геохимическая среда и жизнь, М., 1982.
4. *Коломийцева М.Г. и Габович Г.Д.* Микроэлементы в медицине, М., 1970.
5. *Ноздрюхина Л.Р.* Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека, М., 1977.
6. *Минделл Э.* Справочник по витаминам и минеральным веществам, М.: Медицина и питание: Техлит, 1997.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ КИЗИЛЮРТОВСКОГО И КУМТОРКАЛИНСКОГО РАЙОНОВ ДАГЕСТАНА

Магандалиев М.М.[1], Шабанова З.Э.[2], Камалутдинова И.А.[2], Каймаразов А.Г.[2]

*[1]ФГБОУ Дагестанский государственный университет;*
*Махачкала, Россия; 367025, ул.Дахадаева, 21;*

*[2]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
*Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля 39а.*

Представлены результаты исследования состава и свойств низкопотенциальных вод (НПВ) артезианского бассейна Кизилюртовского и Кумторкалинского районов РД в ходе экспедиционных работ 2011-2012 гг., являющихся продолжением исследовательских работ, проведенных при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт от 15.06.2009г. № 02.740.11.0059). Обсуждаются вопросы состояния НПВ и перспектив их освоения для хозяйственно-питьевого водопользования. Как наиболее значимая отмечается проблема загрязнения питьевых скважинных вод соединениями мышьяка.

Как известно, одной из наиболее острых социально-экономических проблем, связанных с реализацией народнохозяйственных задач в республике, является обеспечение населения качественной питьевой водой.

Как показали исследования, проведенные в Институте проблем геотермии ДНЦ РАН, эта проблема может быть успешно решена в комплексе с реализацией экологически чистых, малозатратных, а, следовательно, быстроокупаемых энергетических технологий на основе низкопотенциальных гидротермальных ресурсов ориентированных, в том числе и на децентрализованного потребителя воды и тепла [1].

Именно последнее обстоятельство позволяет считать, что использование в качестве питьевых скважинных вод артезианского бассейна Северного и равнинного Дагестана, в том числе и в ряде населенных пунктов и поселений Кизилюртовского и Кумторкалинского районов РД, сегодня и на ближайшую перспективу является практически единственной возможностью их водообеспечения.

В большей части в Кумторкалинском районе, наряду с задачами обеспечения потребностей населенных пунктов в воде указанный тип подземных вод используются также для развития отгонного (пастбищного) животноводства и оазисного земледелия.

Кумторкалинский район расположен на низменности в центральной части Республики Дагестан; граничит на юге с Буйнакским, на севере – с Бабаюртовским, на востоке и юге – с Махачкалинским, а на западе – с Кизилюртовским районами РД. Общая площадь района составляет 1256,08 кв.км. Численность населения составляет более 23000 жителей (2008г.). Население района распределено крайне неравномерно. Крупные населенные пункты расположены вдоль административной трассы республики Махачкала - Грозный. Большая часть территории района (восточная часть района) занята кутанами, население которых занимается животноводством (КРС и МРС), в том числе и отгонным.

Кизилюртовкий район образован в 1966 г., районный центр – город Кизилюрт. Район расположен в центральной части республики; граничит с севера и северо-запада с Хасавюртовским и Бабаюртовским районами, а с юга и юго-

востока – с Буйнакским, Казбековским и Кумторкалинским районами. Площадь района составляет 524 кв. км. Численность населения - 74,3 тыс. человек; плотность – 141,9 человека на 1 кв. км. Сельскохозяйственные угодья составляют 32 тыс. га.: функционируют 15 крупных сельхозпредприятий, 179 крестьянских (фермерских) хозяйства, а также 21 879 личных подсобных хозяйства. Они специализируются на выращивании зерна, овощей, плодов, а также на разведении крупного рогатого скота, овец. В структуре производства на долю животноводства приходится 55%, а на долю растениеводства – 45% продукции сельского хозяйства.

И если население территорий указанных районов, расположенных вдоль крупных водоводов, не испытывает нехватку воды, то в центральных засушливых зонах района скважинные воды артезианского бассейна по сути являются единственным источником вод не только хозяйственно-питьевого, но и технического назначения.

Так, в достаточной мере водой в Кумторкалинском районе обеспечены населенные пункты, расположенные вдоль трассы Махачкала – Хасавюрт, с том числе, с. Коркмаскала (административный центр), с. Учкент, с. Урада, с. Алмало, с. Темиргое (частично). Эти села используют воду из канала, связывающего Миатлинское водохранилище с резервуарами питьевой воды столицы и других городов республики.

Однако население большинства сел и поселений района (в основном к северо-востоку от трассы Махачкала- Хасавюрт) использует для питьевых целей воду артезианских скважин, а именно: с.Темиргое, с.Уллубиевка, с.Красное село, с. Мурада, с. Аджидада, с. Ахтини, с. Самилах, с. Арада, с. Шамхал-Янгиюрт.

В ходе полевых экспедиционных работ, проведенных в 2010 и 2012 гг., обследовано свыше 40 скважин большей части населенных пунктов и поселений Кизилюртовского и Кумторкалинского районов, в том числе, в с. Уллубиевка (5 скважин), с. Дарада-Мурада, (3 скважины), с. Аджидада (2 скважины), с. Сафар-али (2 скважины), с. Шамхал-Янгиюрт (2 скважины), на кутанах Гунибского района (7 скважин), в с. Кироваул (2 скважины), с. Темираул (2 скважины), с. Акнада (4 скважины), с. Чонтаул (5 скважин), с. Нечаевка (2 скважины).

Рис.1. Отсутствие профилактических мероприятий на скважине кутана Чохский, МТФ 4. (Кумторкалинский р-н, РД)

Таблица 1. Состав скважинных вод Кизилюртовского и Кумторкалинского районов Республики Дагестан

| № № | Район отбора скважинных вод | Сухой остаток, мг/л | Жесткость общая, мг-экв/л | pH | Основные химические компоненты, мг/л | | | | | | As,мкг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $Cl^-$ | $SO_4^{2-}$ | $HCO_3^-$ ($CO_3^{2-}$) | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Na^+ + K^+$ | |
| | скважинные воды Кизилюртовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, август, 2012 г.) | | | | | | | | | | |
| 1 | с.Темираул скв№1 | 469 | 6,56 | 6,64 | 38,28/ | 112,4 | 402,6 | 91,78 | 24,07 | 85,11 | н/обн |
| 2 | с. Темираул скв№2 | 564 | 7,8 | 7,71 | 414,7 | 134,2 | 500,2 | 94,18 | 37,69 | 366,2 | н/обн |
| 3 | с. Акнада скв№1 | 300 | 4,6 | 6,87 | 38,28 | 120 | 402 | 30,86 | 37,2 | 137,3 | 2,54 |
| 4 | с. Акнада скв№2 | 422 | 5,08 | 6,8 | 76,57 | 122 | 427,0 | 52,9 | 29,67 | 162,9 | 15,5 |
| 5 | с. Акнада скв№3 | 308 | 4,28 | 7,32 | 31,9/ 0,9 | 114,3 | 427,0 | 42,08 | 26,5 | 147,6 | 6,79 |
| 6 | с. Акнада скв№4 | 298 | 3,96 | 6,91 | 44,66 | 112,0 | 402 | 36,47 | 26,02 | 153,25 | н/обн |
| 7 | с. Чонтаул скв№1 | 308 | 3,84 | 6,36 | 44,66 | 113,3 | 524,6 | 34,86 | 25,53 | 181,5 | 5,15 |
| 8 | с. Чонтаул скв№2 | 301 | 4,84 | 7,55 | 38,28 | 113,3 | 402,6 | 46,09 | 30,88 | 76,5 | н/обн |
| 9 | с. Чонтаул скв№3 | 325 | 4,44 | 7,63 | 51,04 | 110,8 | 427,0 | 33,26 | 33,8 | 155,0 | н/обн |
| 10 | с. Кироваул скв№1 | 807 | 7,96 | 7,48 | 44,66 | 255,4 | 427 | 94,2 | 39,64 | 138,3 | н/обн |
| 11 | с. Кироваул скв №2 | 739 | 9,28 | 7,04 | 63,81 | 247,8 | 451,4 | 112,6 | 44,5 | 125,0 | н/обн |
| 12 | с. Пятилетка скв№1 | 299 | 4,76 | 7,92 | 57,42 | 51,4 | 402 | 41,28 | 32,83 | 111,4 | н/обн |
| | скважинные воды Кизилюртовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, август, 2010 г.) | | | | | | | | | | |
| 1 | с.Нов.Нечаевкаст. кв. | 541,0 | 10,2 | 8,15 | 66,2 | 165,1 | 277,0 | 55,1 | 90,4 | 18,0 | 2,67 |
| | скважинные воды Кумторкалинского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, май-июнь, 2012 г.) | | | | | | | | | | |
| 1 | с.Уллубиевка скв1 | 490,8 | 3,26 | 7,97 | 0,746 | 82,5 | 208,6 | 38,08 | 16,5 | 64,60 | 6,61 |
| 2 | с.Уллубиевка скв 2 | 1150 | 1,65 | 8,23 | 200,7 | 10,2 | 705,2 | 12,83 | 12,28 | 388,3 | 98,6 |
| 3 | с.Уллубиевка скв 3 | 485,2 | 3,24 | 7,61 | 26,46 | 79,2 | 206,2 | 32,26 | 19,63 | 62,39 | 8,01 |
| 4 | с.Уллубиевка скв 4 (питьевая) | 1119 | 1,57 | 7,81 | 249,8 | 0,50 | 575,8 | 10,62 | 12,65 | 367,1 | 328,7 |
| 5 | с.Уллубиевка скв 5 | 516,4 | 2,79 | 6,87 | 29,04 | 88,2 | 236,7 | 30,46 | 15,44 | 92,15 | 22,5 |
| 6 | с.Сафар-али скв 2 | 2123 | 2,53 | 7,14 | 658,3 | 1,0 | 568,5 | 20,04 | 18,61 | 624,2 | 193,8 |
| 7 | кут Чохский, скв МТФ 2 | 390,8 | 3,51 | 7,83 | 25,8 | | 285,5 | 39,08 | 18,97 | 46,69 | 45,3 |
| 8 | кут Чохский, скв МТФ 3 | 536,8 | 3,82 | 7,10 | 34,21 | 89,1 | 214,7 | 49,30 | 16,54 | 62,02 | н/обн |
| 9 | кут Чохский, скв МТФ 4 | 577,2 | 3,20 | 7,21 | 34,20 | 22,6 | 241,6 | 42,09 | 13,38 | 54,00 | н/обн |
| 10 | Бол.Гаджиаул | 396 | 3,73 | 6,88 | 26,46 | 85,8 | 248,9 | 41,68 | 20,06 | 70,92 | 15,4 |
| 11 | с.Дарада-Мурала скв №3 | 418,4 | 4,23 | 6,94 | 26,46 | 26,1 | 231,8 | 49,50 | 21,40 | 21,156 | н/обн |
| 12 | с.Шамхал-Янгиюрт скв №1 | 362,8 | 3,04 | 7,26 | 27,75 | 5,3 | 331,8 | 31,86 | 17,63 | 80,76 | 35,2 |
| 13 | с.Шамхал-Янгиюрт скв №2 | 367,6 | 3,36 | 7,10 | 22,59 | 11,2 | 263,52 | 41,683 | 15,57 | 44,94 | н/обн |
| 14 | кут. Согратлинский | 600 | 1,09 | 8,24 | 31,00 | 15,2 | 575,8 | 9,62 | 7,42 | 226,9 | 187,8 |
| 15 | кут. Ругулжинский | 684 | 1,10 | 8,25 | 31,00 | 0,80 | 673,4 | 7,21 | 9,00 | 266,5 | 264,3 |
| 16 | с.Новокули, пит.вода | 260 | 4,12 | 7,65 | 12,7 | 53,2 | 280,6 | 58,11 | 14,83 | 76,2 | 32,8 |
| 17 | полиг. «Солнце» скв тех воды | 851,0 | 0,7 | 7,76 | 12,9 | 32,6 | 976 | 8,81 | 3,16 | 347,8 | 38,0 |
| | скважинные воды Кумторкалинского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, август, 2010 г.) | | | | | | | | | | |
| 1 | с.Аджи-Дада | 420,0 | 6,90 | 8,06 | 29,7 | 102,2 | 271,0 | 53,0 | 51,0 | 12,9 | 8,05 |
| 2 | ЗАО Муралинский | 552,0 | 7,20 | 8,28 | 72,6 | 133,2 | 305,0 | 53,0 | 55,3 | 73,4 | 1.46 |
| 3 | с.Дарада-Мурадаскв №2 | 609,0 | 6,50 | 8,11 | 49,6 | 152,9 | 244,0 | 45,1 | 51,7 | 58,2 | 2,49 |

Отмечая санитарно-техническое состояние скважин и прилегающих территорий, следует указать на отдельные случаи неконтролируемого излива вод, результатом которого стало подтопление и заболачивание территорий в окрестностях скважин (см. рис.1,2).

По составу макрокомпонентов НПВ Кизилюртовского и Кумторкалинского районов относятся к гидрокарбонатно-натриевому и сульфатно-натриевому типам вод (см.табл.1) и в целом соответствуют требованиям, предъявляемым к водам хозяйственно-питьевого назначения.

В тоже время наиболее токсичными загрязнителями, установленными в составе НПВ артезианского бассейна на территории этих районов, являются

соединения мышьяка [2].

Для многих скважинных вод Кумторкалинского района отмечены концентрации, заметно превышающие значение ПДК для мышьяка: 50 мкг/дм$^3$, в то время как для НПВ Кизилюртовского района установлены лишь единичные случаи, когда содержание мышьяка в водах превышало бы указанное лимитирующее значение.

Рис.2. Заболачивание территорий вдоль трассы г. Махачкала – Новая Коса

Так или иначе, проведенные исследования позволили оконтурить территории республики с аномально высоким содержанием мышьяка в скважинных водах на юге. Эта граница проходит южнее левобережья р. Сулак - первоначально принятой нами в качестве таковой [2]. Проведенные исследования дают основание утверждать, что и население в пригороде г. Махачкалы, в частности новых поселений Новолакского района на территории Кумторкалинского района, с водами хозяйственно-питьевого назначения имеют в ежедневном рационе питания заметные концентрации этого опасного токсиканта. Из обследованных нами населенных пунктов Кумторкалинского района наименее благоприятная ситуация в связи с загрязнением питьевых вод соединениями мышьяка складывается в селах Уллубиевка (скв 4; 328,7 мкг/дм$^3$) и Сафар-али (скв 2; 193,2 мкг/дм$^3$), расположенных на удалении 7 км друг от друга. При этом, следует отметить, что наиболее тяжелое положение с обеспечением населения качественной питьевой водой имеет место в селе Сафар-али, содержание мышьяка в обеих скважинах которого превышает значение ПДК(As). Именно в с. Сафар-али среди населенных пунктов Кумторкалинского района в первую очередь должны быть созданы установки и комплексы для очистки от мышьяка вод, предназначенных для хозяйственно-питьевого водопользования. Здесь имеются все условия для реализации технологической схемы, разработанной и апробированная нами для очистки НПВ артезианских скважин Кизлярского района [3].

Большинство исследованных НПВ имеют на устье температуру от 22 до 26 $^0$C, что вполне достаточно для их использования в качестве рабочего тела в теплонасосных системах теплоснабжения индивидуальных объектов жилого фонда, а также для создания объектов прудового хозяйства населенных пунктов, рыбохозяйственных комплексов, птицефабрик.

Наиболее привлекательными для апробации в Кизилюртовском и Кумторкалинском районах разработанных в ИПГ ДНЦ РАН теплонасосных технологий теплоснабжения в указанных районах представляются НПВ с. Акнада и воды артезианской скважины кутана Согратлинский.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №12-08-96501-р_юг_а.

**Литература:**

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
2. *Каймаразов А.Г., Шабанова З.Э., Камалутдинова И.А., Ахмедов К.М.* Идентификация и количественное определение мышьяксодержащих загрязняющих компонентов низкопотенциальных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна // Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, 2010. АЛЕФ. С.295-307.
3. *Каймаразов А.Г.* Технологии умягчения и очистки низкопотенциальных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна // Материалы IV Школы молодых ученых имени Э.Э.Шпильрайна. 19-22 сентября 2011 г. / Под ред. д.т.н. А.Б.Алхасова - Махачкала: АЛЕФ, 2011. С.99-108.

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ АДСОРБЦИИ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ, МАГНИЯ И ЖЕЛЕЗА В ПРИРОДНОЙ ВОДЕ КОЛЛОИДНЫМ РАСТВОРОМ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Хизриева И.Х., Алиев З.М., Айдемирова З.

*ФГБОУ Дагестанский государственный университет;*
*Махачкала, Россия; 367025, ул.М.Гаджиева 25.*

В данной работе был синтезирован кремнезоль и изучены его физико-химические показатели: динамическая вязкость, размер частиц дисперсной фазы, состав сорбента. Изучен процесс адсорбции ионов металлов на коллоидном растворе диоксида кремния и показана возможность использования кремнезоля для умягчения природных вод.
*Ключевые слова*: коллоидный раствор, диоксид кремния, сорбент, размер частиц

Вода, содержащая в больших концентрациях ионы жесткости, оказывает отрицательное влияние на органы пищеварения. Избыток солей жесткости в питьевой воде приводит к зарастанию нагревающих поверхностей, отложению солей на бытовых приборах и снижению их сроков службы.

В пищевой промышленности жесткость воды ухудшает качество продуктов, вызывая выпадение солей при хранении, образование подтеков на поверхности. Поэтому жесткость воды, используемой для приготовления различных продуктов, четко регламентирована и находится на уровне 0,1- 0,2 мг-экв/л [1].

В природных водах кроме солей жесткости содержатся и другие примеси, в частности, соли железа, содержание которых колеблется от 0,01 до 26 мг/л. При содержании железа более 1 мг/л вода приобретает бурый цвет. При движении такой воды по трубопроводу на стенках осаждаются соединения железа и железобактерии, уменьшая его сечение.

В настоящее время гидрозоли двуокиси кремния – кремнезоли – находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. В качестве связующего материала, как носители катализаторов, как исходное сырье для сорбентов растет потребность в агрегативно устойчивых и концентрированных золях, имеющих достаточно высокую активность поверхности частиц.

Цель работы – исследование возможности использования кремнезолей для умягчения и уменьшения степени минерализации природных вод. Нами были проведены исследования адсорбционных свойств кремнезолей различного состава для умягчения и обезжелезивания технологической и природных вод.

В работе использован кремнезоль – коллоидная кислота $mSiO_2 \cdot H_2O$, которая представляет собой легкоподвижную, опалесцирующую жидкость от прозрачного до белого цвета, состоящую из воды и частиц аморфного кремнезема. Кремнезоль был получен по технологии [2], которая заключается в пропускании сжатого углекислого газа через раствор силиката натрия:

$$Na_2SiO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow H_2SiO_3\downarrow + Na_2CO_3$$

Для получения кремнезоля применяли силикат натрия с модулем 2,6 – 3,0. В стакане емкостью 500 мл смешивали жидкое стекло с дистиллированной водой в соотношении 1:4. Стакан помещали в автоклав, закачивали углекислый газ под давлением 0,3-0,4 МПа и выдерживали в течение 1 часа при непрерывном перемешивании жидкости. Образующийся гель кремневой кислоты промывали от карбоната натрия теплой дистиллированной водой.

Показатели полученного кремнезоля следующие: $SiO_2$ – 82,62%; $Na_2O$ – 17,38%; диаметр частиц 100 $A^o$; pH = 9-10. Оптимальные параметры сорбции (статическая и динамическая обменные емкости) были определены по методике [3].

Определение оптимальных условий сорбции, в частности, величины кислотности, при которой происходит максимальное извлечение элемента из раствора, определяли по следующей методике. В колбах емкостью 250 мл готовили серию растворов с различными значениями pH, содержащих по 50 г ионов кальция, магния и железа (III) в 100 мл раствора и по 0,5 г кремнезоля в каждой колбе. Полученные растворы встряхивали в течение 2-х часов при комнатной температуре. В фильтрате определяли содержание ионов кальция и магния комплексонометрическим титрованием с индикатором эриохромом черным и отдельно содержание кальция с мурексидом. Содержание железа определяли фотометрически с сульфосалициловой кислотой [4]. Степень извлечения определяли по формуле:

$R = (C_{сорб.}/C_{общ.})$ .100% (1), где $C_{общ.}$ и $C_{сорб.}$ – концентрации катионов металлов в растворе до и после его обработки коллоидным раствором $SiO_2$.

Полученные результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Зависимость сорбционной способности кремнезоля от кислотности раствора по отношению к ионам $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$

| pH | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Ca^{2+}$, мг/л | 0,7 | 5,9 | 23,8 | 43,6 | 43,4 | 42,3 | 40,5 |
| R%, сорб. | 1,3 | 11,7 | 47,5 | 87,1 | 86,7 | 84,9 | 81,0 |
| $Mg^{2+}$, мг/л | 0,1 | 3,7 | 11,6 | 39,7 | 42,3 | 41,1 | 39,3 |
| R%, сорб. | 0,2 | 7,3 | 33,8 | 79,4 | 84,5 | 82,1 | 78,6 |

Таблица 2. Зависимость сорбционной способности кремнезоля от кислотности раствора по отношению к ионам $Fe^{3+}$

| pH | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5,0 | 6,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Fe^{3+}$,мг/л | 5,0 | 6,8 | 7,5 | 8,2 | 8,8 | 9,2 | 9,5 | 9,5 | 9,4 |
| R% сорб | 50 | 68 | 75 | 82 | 88 | 92 | 95 | 95 | 94 |

Оптимальное время контакта с сорбентом – 30 мин., оптимальное количество сорбента для умягчения воды с жесткостью от 20 мг-экв/л до 0,5 мг-экв/л составило 5 г/л.

По результатам полученных экспериментальных данных следует, что получаемые под давлением коллоидные системы достаточно однородны и вероятно могут быть успешно применены в качестве сорбента-коагулянта для удаления ионов металлов из технологической воды. Для подтверждения данного предположения была проведена серия экспериментов по удалению из модельной технологической воды катионов металлов коллоидным диоксидом кремния и определена его сорбционная емкость. Эксперименты проводили с раствором, полученным из трехмодульного жидкого стекла (ЖС), разбавленного дистиллированной водой в соотношении ЖС:$H_2O$ = 1:4 и давлении 0,4 МПа. Показано, что катионы металлов хорошо извлекаются коллоидным диоксидом кремния из модельной технологической воды, причем их концентрация может быть снижена до соответствия ГОСТу 2874-82 «Вода питьевая», что проиллюстрировано на примере с суммарным содержанием катионов металлов 50 мг/л (табл.3).

Таблица 3. Извлечение катионов металлов коллоидным диоксидом кремния из модельной технологической воды

| № опыта | Остаточная концентрация катионов металлов, мг/л | | |
|---|---|---|---|
| | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Fe^{3+}$ |
| 1 | 3,2 | следы | 0,25 |
| 2 | 2,8 | следы | 0,21 |
| 3 | 3,4 | следы | 0,22 |

*исходные концентрации $Ca^{2+}$ и $Mg^{2+}$- 20 мг/л, $Fe^{3+}$ - 10 мг/л

Увеличение концентрации коллоидного раствора и продолжительности сорбции оказывают существенное влияние на эффективность извлечения катионов металлов (табл.4), что находится в согласии с изотермой сорбции Гиббса.

Таблица 4. Влияние концентрации коллоидного раствора диоксида кремния и времени обработки на степень извлечения катионов меди

| Концентрация раствора диоксида кремния, % | R, %* | |
|---|---|---|
| | Сразу | Через 18 ч |
| 2 | 35,0 | 65,4 |
| 4 | 59,4 | 100 |

* начальная концентрация катионов меди – 3,7 мг/л

Оптимальное количество коллоидного раствора диоксида кремния добавляемое в технологическую воду с целью ее умягчения зависит от ее начальной жесткости, и поэтому подбирается опытным путем. Ниже приведены результаты по умягчению модельной технологической воды с начальной жесткостью 4,8 мг-экв/л. В образцы модельной технологической воды добавляли разное количество сорбента от 1 до 8 мг (в пересчете на сухой ксерогель) на 100 мл пробы.

Оптимальное количество коллоидного диоксида кремния для умягчения технологической воды составило 5 мг.

С учетом полученных результатов было проведено исследование по сорбции катионов металлов из многокомпонентных растворов: природной пресной волы из скважины №1 лечебно-оздоровительного комплекса «Лезет» ОАО «Каспий-Газпром» и скважины №2 поселка Дучи Дагестана. Полученные в ходе исследования результаты отражены в таблице 5.

Таблица 5. Эффективность удаления из природной воды катионов металлов после обработки их коллоидным раствором $SiO_2$

| Показатели | Скважина №2 | | Скважина №1 | |
|---|---|---|---|---|
| | вода до обработки | вода после обработки | вода до обработки | вода после обработки |
| $Ж_{общ.}$, мг-экв/л | 1,8 | 0,7 | 18,3 | 3,9 |
| $C_{Fe^{3+}}$, мг/л | 3,6 | 0,2 | 0,71 | 0,13 |
| $Cl^-$, мг/л | 34 | 34 | 980 | 980 |
| $SO_4^{2-}$, мг/л | 130 | 130 | 750 | 750 |

Результаты таблице 5 позволяют сделать вывод о достаточно высокой эффективности коллоидного диоксида кремния для умягчения природной пресной воды (снижение жесткости до уровня ПДК). Для получения сравнительных данных по эффективности извлечения из водных объектов катионов металлов проведены эксперименты с применением суспензии бентонитовой глины, достаточно часто применяемой для этой цели (таблице 6).

Таблица 6. Сравнительные данные по эффективности удаления из природной воды катионов металлов

| Показатели | Вода до обработки | После обработки бентонитовой глиной | После обработки коллоидным раствором $SiO_2$ | ПДК |
|---|---|---|---|---|
| $Ж_{общ.}$, мг-экв/л | 18,3 | 15,7 | 3,9 | 2-4 |
| $C_{Fe^{3+}}$, мг/л | 3,6 | 1,3 | 0,2 | не более 0,3 |

Обработка природной пресной воды коллоидным раствором $SiO_2$, как следует из таблицы, эффективнее: концентрация катионов $Fe^{3+}$уменьшается на 94,4% (вместо 63,8% при использовании бентонитовой глины), а общая жесткость снижается на 78,6% (вместо 14,2% при использовании бентонитовой глины).

Рассмотренный экспериментальный материал продемонстрировал высокую эффективность процесса сорбции катионов металлов из модельной технологической и природной воды коллоидным раствором диоксидом кремния, получаемого методом нейтрализации силиката натрия газообразным $CO_2$ под давлением.

**Литература:**

1. *Федорова А.И., Никольская А.Н.* Практикум по экологии и охране окружающей среды. – М., 2001, - С. 285.
2. *Щербаков С.С., Харламова Т.А., Алиев З.М., Малофеева Л.С. и др*. Исследование возможности применения кремнезоля отечественного производства для связывания катионов и осветления вина. // В сб. Актуальные проблемы пищевой промышленности. Вып. 1. – М., 2003.- С. 76-82.
3. *Белявская Т.А., Большова Т.А., Брыкина Г.Д.* Методика по хроматографическому анализу. – М.: МГУ, 1980.
4. *Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю*. Методы анализа природных вод. – М.: Недра, 1970.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭВАЛЬД ЭМИЛЬЕВИЧ ШПИЛЬРАЙН – воспоминания учеников

*Каган А.М.*
Один из основателей ИВТ АН СССР – Э.Э. Шпильрайн…… 4
*Малышенко С.П.*
Уроки Э.Э.Шпильрайна…….. 6
*Попель О.С.*
Уроки Э.Э.Шпильрайна…….. 10

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

*Алхасов А.Б.*
Перспективы освоения геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии... 13
*Попель О.С., Фортов В.Е.*
Основы концепции создания научно-производственного кластера по возобновляемой энергетике на Юге России..... 21
*Батенин В.М., Зайченко В.М., Качалов В.В., Чернявский А.А.*
Некоторые аспекты создания демонстрационной зоны возобновляемой энергетики на базе филиала ОИВТ РАН в Республике Дагестан..... 28
*Абдулагатов И.М.*
Crossover Models For The Thermodynamic And Transport Properties Of Fluids And Fluid Mixtures In The Critical And Supercritical Regions-Review..... 35
*Абдурахманов Г.М.*
Конкурентоспособность отраслей и сценарии развития Северо–Кавказского федерального округа. экономика→ «зеленая экономика» + зеленая энергетика..... 62
*Алхасов А.Б., Баранов Д.А., Симакин В.В., Тюхов И.И.*
Вопросы обучения и практической подготовки бакалавров и магистров по возобновляемой энергетике..... 77
*Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.*
К теории нелокальной неизотермической фильтрации в пористых средах..... 81
*Алишаев М.Г.*
Изменение термобарических параметров при извержении вулкана..... 87
*Базаев А.Р.*
Количественное описание сверхкритических водных растворов алифатических спиртов..... 97
*Алхасов А.Б.*
Слово о Друге (памяти Амадзиева А.М.)..... 104

## ДОКЛАДЫ ВЕДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

*Попель О.С., Тарасенко А.Б., Фрид С.Е.*
Расчетные показатели автономных фотоэлектрических систем наружного освещения..... 107
*Рамазанов М.М.*
О критерии Шварцшильда отсутствия конвекции в сжимаемых жидкостях и газах и его обобщении..... 116
*Джаватов Д.К.*
Применение горизонтальных скважин для повышения эффективности разработки геотермальных месторождений..... 124
*Магомедов М.Н.*
О туннельной самодиффузии при сильном сжатии кристалла..... 133

*Магомедов У.Б.*
Теплопроводность воды и водных растворов неорганических веществ..... 144
*Аливердиев А.А.*
Вопросы термоядерной энергетики..... 150
*Ахмедов Г.Я.*
Пути решения проблемы карбонатных отложений в геотермальных системах..... 158
*Алиев М.М., Магомедов У.Б.*
Вязкость воды и водных растворов солей при высоких параметрах состояния..... 163
*Дибиров Я.А.*
Фазовые равновесия и теплоаккумулирующие составы в системе
CA//F,CL,SO4,MOO4..... 167
*Базаев Э.А.*
Расчет критических показателей уравнения кривой фазовых равновесий
жидкость–пар водных растворов алифатических спиртов..... 172
*Белан С.И., Саркаров Р.А., Гусейнов Н.М., Бадавов Г.Б.*
Технико-экономическая оценка перспектив освоения возобновляемых
источников энергии в России с целью энергосбережения..... 177
*Бабаев Б.Д.*
Основы сравнительной оценки экологического влияния энергосистем..... 184

## ДОКЛАДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

*Иванов М.Г., Нефедова Л.В.*
Ресурсная база, состояние и проблемы развития геотермальной энергетики в
Эфиопии..... 191
*Иванин О.А., Директор Л.Б., Майков И.Л.*
Оптимизация энергоснабжения обособленных научных станций..... 198
*Кудинов А.А.*
Природный потенциал возобновляемых энергоресурсов Республики Бурятия и
перспективы их использования в ТЭК..... 206
*Санин А.Ю.*
Потребность прибрежной зоны Крыма в альтернативной энергетике..... 212
*Бессмертных А.В., Косов В.Ф., Кузьмина Ю.С., Сычев Г.А.*
Установка по торрификации биомассы..... 216
*Сулейманов М.Ж., Коломиец Ю.Г., Фрид С.Е., Мордынский А.В., Попель О.С., Арсатов А.В.*
Испытания солнечной водонагревательной установки аккумуляционного типа
нового образца из теплостойких пластмасс..... 220
*Косов В.Ф., Лавренов В.А.*
Получение синтез-газа из биомассы. лабораторная установка..... 224
*Зайченко В.М., Кузьмина Ю.С.*
Энергетическая утилизация отходов жизнедеятельности птиц..... 227
*Зайченко В.М., Сычев Г.А.*
Тепловые эффекты низкотемпературного пиролиза биомассы..... 232
*Тюхов И.И., Раупов А.Х.*
Вертикальный воздушный солнечный коллектор..... 235
*Счастливцев А.И., Малышенко С.П.*
Анализ термодинамической и технико-экономической эффективности
геотермальных станций с водородным перегревом пара..... 241
*Смолкин А.К., Торчинский В.М.*
Повышение эффективности системы газодобычи с использованием волнового
метода..... 248
*Алхасова Д.А.*
Применение изобутана в системах освоения геотермального тепла..... 254

*Алибеков Д.М.*
К вопросу об извлечении петротермальной энергии..... 259
*Алхасов А.Б., Мейланов Р.П., Ахмедов Э.Н.*
Распределение температуры вблизи эксплуатируемой геотермальной скважины... 263
*Карабекова Б.К.*
Оценка величины внутреннего давления растворов водаалифатический спирт в сверхкритическом состоянии..... 269
*Джаппаров Т.А.*
Кинетика термического разложения алифатических спиртов..... 273
*Зейналов М.Ш., Дибиров Я.А.*
Определение параметров солнечной биогазовой установки для автономного потребителя..... 279
*Гаджимурадов Р.Н.*
Выбор солнечных и гибридных солнечных станций с учетом особенной Республики Дагестан..... 284
*Магомедов М.М-Ш.*
Теплопроводность водных растворов электролитов..... 287
*Шапиев Г.Ш.*
Преобразование излучения в тепло концентрирующими солнечными коллекторами..... 291
*Кобзаренко Д.Н.*
Геоинформационное моделирование в задачах оценки распределения потенциала возобновляемых энергоресурсов..... 297

## СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

*Дворянчиков В.И.*
Термодинамические свойства хладагентов пропанового ряда..... 304
*Магомедов Ш.А.*
Вариация изотопного состава вод геотермальных месторождений различных генетических типов..... 309
*Абдуллаев А.А.*
Структурная термостойкость жидкого состояния воды..... 314
*Петрик Г.Г.*
Новое термическое уравнение состояния и его молекулярный управляющий параметр..... 318
*Алхасов А.Б., Дибиров М.Г., Дибирова М.М.*
Перспективы использования солнечных тепловых установок в Дагестане..... 324
*Цапиева О.К., Магомедова Н.А.*
Проблемы эффективности использования нетрадиционных источников энергии на сельских территориях (на примере Республики Дагестан)..... 330
*Павлова В.Ю.*
Кепрок геотермальных систем: геолого-геофизическая изученность на примере Мутновского месторождения парогидротерм (Камчатка)..... 335
*Джаннаталиев Р.*
Использование комбинированного солнечного PVT коллектора и геотермального теплового насоса для отопления, горячего водоснабжения и охлаждения зданий... 341
*Алхасов Б.А., Алхасова Д.А.*
Комбинированные геотермально-биогазовые энергетические системы..... 343
*Камилова А.М.*
Распределение валового потенциала ветровой энергии на территории Дагестана.. 346
*Арбуханова П.А., Искендеров Э.Г.*
Фазопереходные теплоаккумулирующие материалы на основе кристаллогидратов..... 349

*Саидова С.К., Исаева П.М., Арбуханова П.А., Вердиев Н.Н.*
Перспективы использования кристаллогидратов для аккумулирования низкопотенциального тепла..... 354
*Абдулмуталимова Т.О., Абдуллаев М.Ш., Рамазанов О.М.*
Оценка качества артезианской воды используемой для питьевого водоснабжения в населенных пунктах западной части Северо-Дагестанского артезианского бассейна на примере Хасавюртовского района..... 357
*Гусейнов У.М., Бекболатова К.Г., Алиев З.М., Гусейнов М.А.*
Электрохимическое окисление сероводорода, содержащего в природной воде с получением коллоидной мелкодисперсной среды..... 362
*Махмудова М.М., Рамазанов М.М.*
Конвективная устойчивость совершенного газа в пористой среде..... 364
*Магомедов И.Ш.*
Обеспечение региона возобновляемыми источниками энергии..... 368
*Дибиров Я.А., Искендеров Э.Г., Милихин И.А., Зейналов М.Ш.*
Гелиобиогазовые установки с тепловым аккумулятором..... 372
*Алиев З.М., Магомедова Д.Ш., Гереханова Р.А., Гатиева С.Д.*
Обогащение воды микроэлементами электролизом..... 377
*Магандалиев М.М., Шабанова З.Э., Камалутдинова И.А., Каймаразов А.Г.*
Перспективы освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Кизилюртовского и Кумторкалинского районов Дагестана..... 380
*Хизриева И.Х., Алиев З.М., Айдемирова З.*
Закономерности протекания адсорбции ионов кальция, магния и железа в природной воде коллоидным раствором диоксида кремния..... 385

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

**(материалы V Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна)**

Редактор А.Б. Алхасов
Технический редактор Д.Н.Кобзаренко

Формат 60х84 1/8 . Бумага офсетная № 1. Гарнитура "Таймс".
Печать офсетная. Усл. п. л. 39. Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН
367030, Махачкала, пр. И. Шамиля, 39а

ИП Овчинников, типография АЛЕФ,
г.Махачкала, Дахадаева, 21.
Тел. 8-928-264-88-64, 8-903-477-55-64