Российская академия наук

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГЕОТЕРМИИ ДНЦ РАН

УДК 517,958:5
№ госрегистрации

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института
д-р техн. наук

_____А.Б. Алхасов
«____»_____2017 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСУ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ В ГЕОТЕРМИИ

(промежуточный)

Руководитель темы,
зав. лаб. геотермомеханики
д.ф.-м.н. _____ М.М.Рамазанов
подпись, дата

Махачкала 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,

г.н.с.,д.ф.-м.н. _____ М.М.Рамазанов (введение, глава 1, заключение)

Исполнители темы:

с.н.с.,к.т.н. _____Н.С.Булгакова (глава 2)

с.н.с.,к.г.-м.н. _____ З.З.Щербуль (глава 3)

г.н.с.,д.т.н., проф. _____ М.Г. Алишаев (раздел 2)

РЕФЕРАТ

Отчёт 45 с., 26 рис., 25 ист.

Ключевые слова: конвекция сжимаемого газа, бинарная смесь, пористая среда, небуссинесковские эффекты, аналитическое решение, пористая среда, нелинейные режимы, модуляция параметра, адсорбция примеси, тепломассоперенос, тепловое загрязнение, геотермальная скважина, массив, мощность, эффективность, ГэоЭС.

Объекты исследования: пористая среда, геотермальные системы, тепловая энергия гидротермального пласта, тепловое поле.

Цель работы:

- Исследование закономерностей влияния небусинесковских эффектов на естественную конвекцию смесей газов в пористой среде.
- Изучение влияния процессов переноса, растворения и осаждения компонент, а также модуляции граничных условий на эволюцию гидротермальных систем.
- Изучение формирования техногенной геотермальной аномалии в приповерхностной зоне, оценка выброса тепла в атмосферу, в поверхностные и грунтовые воды.
- Оценка перспектив научных исследований в области геотермии и их использования для получения геотермальной энергии.

Метод или методология проведения работы:

- Идея, использованного для решения данной задачи метода, заключается в том, что механизм и свойства естественной конвекции, как правило, слабо зависят от конкретной геометрии задачи. В тоже время, выбор удобной геометрии часто позволяет существенно упростить задачу. Исходя из этих соображений в данной работе в качестве геометрии пористой среды рассмотрено тонкое пористое кольцо. Это позволило значительную часть задачи решить аналитическими методами.
- Для решения данной задачи использовалась неявная монотонная разностная схема расщепления для уравнений переноса в сочетании с методом переменных направлений с постоянными параметрами для уравнения Пуассона. Полученная разностная схема решалась методом продольно-поперечной прогонки, с проверкой невязок на каждом временном шаге.
-Решение нестационарных задач теплопереноса осуществлялось с помощью явных разностных схем на неравномерных сетках

-Ознакомление с результатами научных исследований в области геотермии.

Результаты работы:

- Исследованы закономерности влияния небуссинесковских эффектов на естественную конвекцию бинарной смеси сильно сжимаемых газов в пористой среде. В качестве модели рассмотрено тонкое пористое кольцо, насыщенное бинарной смесью совершенных газов с условиями третьего рода на границах для температуры и концентрации. В предельных случаях имеем кольцо с заданными на границах условиями, и кольцо, расположенное в непроницаемой теплопроводной среде с диффузией. Как для линейной, так и для нелинейной задачи получены аналитические решения. Это позволило изучить влияние сильной сжимаемости, эффекта адиабатического расширения и других факторов, которые не учитывает приближение Буссинеска, на закономерности возникновения естественной конвекции, и ее свойства при нелинейном режиме тепломассопереноса.
- Изучено влияние процессов переноса, растворения и осаждения компонент, а также модуляции граничных условий на эволюцию гидротермальных систем
- Исследовано воздействие локальных геотермальных аномалий, связанных с добычей термальных вод на тепловые поля в приповерхностной зоне и на температурный режим искусственных водоёмов, находящихся вблизи геотермальных скважин.
- Произведён обзор мирового опыта использования глубинной тепловой энергии Земли.

Области применения результатов:

- Свободная конвекция является самым распространённым видом движения жидкостей и газов в естественных природных условиях. В этой связи, полученные результаты будут полезны в геотермии, геофизике, астрофизике, метеорологии и др. областях знаний.
- Новые химические технологии, где около и сверхкритические жидкости используются в качестве реактивных сред. Например, метод сверхкритического водного окисления (СКВО). Указанные жидкости используются в материаловедении при создании тонких пленок и т.д.
- Полученные решения могут быть полезны при оценке суммарного воздействия искусственных источников тепловых полей на окружающую среду и микроклимат территории.
-Результаты обзора могут быть полезны при проектировании геотермальных электростанций и прогнозе их эксплуатационных характеристик.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение …… 6

Основная часть

1 Течения, теплообмен и фазовые переходы в пористых средах и геотермальных системах…… 10

1.1 Исследование влияния сильной сжимаемости, неоднородности состава, и фазовых переходов на фильтрационную конвекцию жидкости и газа. ……. 10

1.2 Изучение влияния процессов переноса, растворения и осаждения компонент, а также модуляции граничных условий на эволюцию гидротермальных систем…….22

1.3 Изучение формирования техногенной геотермальной аномалии, оценка выброса тепла в атмосферу, в поверхностные и грунтовые воды…….29

2 Неизотермическая фильтрация

Обзор мирового опыта использования глубинной тепловой энергии Земли……..….35

Заключение……..43

Список использованных источников……44

ВВЕДЕНИЕ

- Теория естественной конвекции сжимаемых жидкостей и газов является еще не законченным, но достаточно быстро развивающимся разделом гидродинамики [1,2]. Эта теория объясняют небуссинесковские эффекты, вызванные сильной сжимаемостью, нелинейной зависимостью плотности от температуры и адиабатическим расширением среды. Например, хорошо известен так называемый «поршневой эффект» имеющий место на начальной стадии развития конвекции [3].

В [4] Джеффри, исходя лишь из аналогии уравнений в случае сжимаемой среды и в приближении Буссинеска, выписал эффективное критическое число Рэлея. При этом спектральная задача на устойчивость не решалась. Такая задача для совершенного газа и газа Ван-дер-Ваальса решена в [5]. В результате были получены поправки к приближению Джеффри. Однако эти поправки для лабораторных условий оказались малы. Было сделано предположение, что в случае больших пространственных масштабов, и в состоянии близком к термодинамической критической точке поправки могут быть существенны. Было так же получено, что критическое число Рэлея убывает с ростом заданного градиента температуры и растет с ростом критерия сжимаемости. Однако в [5] использовано приближение линейного равновесия, т.е. решая задачу на устойчивость, истинные распределения термомеханических полей при механическом равновесии линеаризовались. В [6- 8] показано, что при больших значениях критерия сжимаемости и заданного градиента температуры линеаризация равновесия не приемлема и критическое число Рэлея на самом деле зависит от этих параметров немонотонным образом. В [9] показано, что эти выводы не зависят от геометрии области и конкретного газа и связаны с сильной сжимаемостью и нелинейной зависимостью плотности от температуры.

Для нелинейной конвекции так же был получен ряд важных результатов. В частности, были получены калибровочные формулы, позволяющие рассчитать тепловые и динамические характеристики сильно сжимаемого околокритического газа Ван-дер-Ваальса на основе решения задачи для относительно слабо сжимаемого совершенного газа с модельными параметрами [3]. Однако, как выяснилось, калибровочные формулы справедливы лишь при относительно слабом пространственном изменении свойств газа [7].

При исследовании конвекции вблизи термодинамической критической точки, как правило, близость к ней определялась с помощью одного параметра-относительного отклонения средней

температуры от критической. При этом средняя плотность обычно полагалась равной критической. В [9] изучена конвективная устойчивость газа Ван-дер-Ваальса в зависимости от обоих параметров близости к критической точке. Было показано, что максимум критического числа Рэлея достигается как раз, когда средняя плотность достигает критической плотности.

В ряде работ, например [10], изучена конвекция бинарной смеси в пористой среде в приближении Буссинеска. Однако, почти нет работ где изучается небуссинесковская конвекция смесей газов. Представляет большой интерес выявление закономерностей совместного влияния на конвекцию наличия примеси и сильной сжимаемости. Цель настоящей работы заключается в том, чтобы частично восполнить указанный пробел и попытаться ответить на отмеченный вопрос.

- В условиях земной коры мы чаще всего имеем дело с пористыми средами, которые имеют большие площади поверхности на единицу объема, следовательно, процесс адсорбции примеси может повлиять на условия возникновения и характер конвективных течений, а также на процессы перераспределения ценных компонент. Естественная конвекция играет большую роль в формировании и эволюции геотермальных месторождений конвекционного типа. Для высокотемпературных гидротермальных систем источником тепла могут быть только магматические камеры. В работах [11, 12] показана кривая флуктуации мощности вулканизма на Камчатке за последние 850 тыс.лет. Из этой кривой видно, что мощность вулканической деятельности носит колебательный характер, что естественно отражается и на гидротермальной активности, т.е тепловой поток, формирующий системы, изменялся во времени. Поэтому наличие конвекции в данный момент может зависеть от градиента температуры, который существовал 100 тыс лет назад. Таким образом, в задачах о конвекции жидкости в земной коре такие факторы, как влияние нестационарных граничных условий, наличие примеси, насыщающей ее жидкости, адсорбция одной из компонент могут существенно повлиять на формирующиеся конвективные движения и эволюцию гидротермальных систем.

- Существенное изменение характера распределения температуры в прискважинной зоне при эксплуатации геотермальной скважины приводит к возникновению локальной температурной аномалии, которая в приповерхностной зоне (деятельном слое) усложняется воздействием проникающего до глубины 1,6 м влияния температуры воздуха. Значительное превышение температуры над фоновой становится причиной повышенной агрессивности не только грунтовой толщи, но и подземных вод и открытых водоёмов, находящихся в зоне геоэкологического влияния аномалий. Повышение температуры воды в открытых водоёмах может существенно влиять и на микроклимат окружающей территории, повышая относительную влажность и норму естественных осадков, а также пагубно влиять на жизнь водных организмов и структуру подводного растительного мира.

Для изучения динамики изменения теплового поля вокруг добывающей скважины сформулирована и численно решена нестационарная задача теплопереноса для различных временных промежутков и параметров пласта. Карты изотерм, построенные по результатам многовариантных решений, характеризуют профильные температурные поля приповерхностного слоя почвы для различных периодов эксплуатации скважины. Построена совмещённая профильная карта изотерм для периода эксплуатации t=1год, на которой можно видеть, чем отличается температурное поле приповерхностного деятельного слоя почвы, не содержащего грунтовые и поверхностные воды, от картины температурного поля с открытым искусственным водоёмом, находящимся на расстоянии R от устья скважины. Построены зависимости изменения тепловых потоков к поверхности почвы со временем (начальные и за период от 1 до 10 лет) для каждого месяца года. Показано, что если в естественных условиях тепловой поток, например в зимние месяцы, был разнонаправленным, т.е. как от поверхности, так и к поверхности почвы, причём баланс примерно нулевой, то уже через год эксплуатации тепловой поток направлен исключительно от поверхности по всей площади, оконтуренной радиусом теплового влияния (как было исследовано ранее, радиус теплового влияния скважины на поверхности почвы, во всяком случае, не превышает 8 метров).

-Земной шар и другие планеты Солнечной системы представляют собой сфероиды расплавленных пород, покрытые твёрдой корой, жидкой и газовой сферами. Гравитационная «сборка» астероидов в планету за миллиарды лет приводила к росту температуры пород из-за ударов, трения, химических реакций и сжатия. Постоянное внутреннее движение вещества планеты обуславливало всё новый разогрев, а тепловое излучение в космос обеспечивало охлаждение планеты до твёрдого состояния её коры.

Кора Земли почти сплошной сфероид, разбитый разломами на материковые плиты. Толщина коры изменчива, от 5 и более, в среднем 30 км. Через разломы происходит выход газов и разгрузка накопленной энергии мантийного вещества в виде вулканических извержений и землетрясений. Границы движущихся плит и есть наиболее вероятные места аномально высоких температур горных пород, где может накапливаться энергия и легче может быть добыта. Температура приповерхностных слоёв зависит в основном от внешних факторов — солнечного освещения и её атмосферы. Летом и в дневное время грунт до определённых глубин прогревается, а зимой и ночью охлаждается вслед за изменением температуры воздуха и с некоторым запаздыванием, растущим с глубиной. Влияние суточных колебаний температуры воздуха в земных условиях заканчивается на глубинах десятков сантиметров. Сезонные колебания захватывают более глубокие пласты грунта — до десятка и более метров. Незначительность теплового потока из недр Земли к поверхности на большей части связана с низкой теплопроводностью горных пород. В

зонах тектонических разломов, повышенной сейсмической активности и вулканизма, где энергия земных недр находит выход, люди первыми начали её успешное использование. Огромное количество тепла на поверхность выносят извержения гейзеров и источники термальной воды. На территории России это Камчатка Курилы и Кавказ [13,14].

В принципе развитие геотермальной энергетики возможно практически везде, поскольку рост температуры с глубиной — явление повсеместное, и задача заключается в «добыче» тепла из недр, подобно тому, как оттуда добывается минеральное сырьё. В среднем температура с глубиной растёт на 2,5–3°С на каждые 100 м. Отношение разности температур между двумя точками, лежащими на разной глубине, к разности глубин между ними называют геотермическим градиентом. Обратная величина — геотермическая ступень, это интервал глубин, на котором температура повышается на 1°С. Чем выше градиент и соответственно ниже ступень, тем ближе тепло глубин Земли подходит к поверхности и тем более перспективен данный район для развития геотермальной энергетики. В разных районах, в зависимости от геологического строения и других региональных и местных условий, скорость роста температуры с глубиной может резко различаться. В масштабах Земли колебания величин геотермических градиентов и ступеней достигают 25 крат. Например, в штате Орегон (США) градиент составляет 150°С на 1 км, а в Южной Африке — 6°С на 1 км. В Кольской сверхглубокой скважине температура до глубины 3 км меняется с градиентом 10 °С/км, а далее геотермический градиент становится в 2–2,5 раза больше. На глубине 7 км зафиксирована уже температура 120°С, на 10 км — 180°С, а на 12 км — 220°С. Другой пример — скважина, заложенная в Северном Каспии, где на глубине 500 м зарегистрирована температура 42°С, на 1,5 км — 70°С, на 2 км — 80°С, на 3 км — 108°С [15,16].

Таблица 1. Установленные мощности геотермальных электростанций стран мира, МВт [16]

Страна	Годы						Доля в общем производстве электроэнергии, %
	1990	1995	2000	2005	2007	2010	
США	2774,6	2816,7	2228,0	2544,0	2687,0	3093,0	0,30
Филиппины	891,0	1227,0	1909,0	1931,0	1969,7	1904,0	27,00
Индонезия	144,8	309,8	589,5	797,0	992,0	1197,0	3,70
Мексика	700,0	753,0	755,0	953,0	953,0	958,0	3,00
Италия	545,0	631,7	785,0	790,0	810,5	843,0	1,50
Новая Зеландия	283,2	286,0	437,0	435,0	471,6	628,0	10,00
Исландия	44,6	50,0	170,0	322,0	421,2	575,0	30,00
Япония	214,6	413,7	546,9	535,0	535,2	536,0	0,10
Сальвадор	95,0	105,0	161,0	151,0	204,4	204,0	25,00
Кения	45,0	45,0	45,0	127,0	128,8	167,0	11,20
Коста-Рика	0,0	55,0	142,5	163,0	162,5	166,0	14,00
Никарагуа	35,0	70,0	70,0	77,0	87,4	88,0	10,00
Россия (Камчатка)	11,0	11,0	23,0	79,0	79,0	82,0	0,04
Турция	20,6	20,4	20,4	20,4	38,0	82,0	0,20
Папуа-Новая Гвинея	0,0	0,0	0,0	39,0	56,0	56,0	2,70
Гватемала	0,0	33,4	33,4	33,0	53,0	52,0	3,41
Португалия (Азорские острова)	3,0	5,0	16,0	16,0	23,0	29,0	0,26
Китай	19,2	28,8	29,2	28,0	27,8	24,0	0,003

Воды с температурой до 150°С пригодны для отопления, теплиц и в бальнеологии, с температурой от 180°С и выше — и для выработки электроэнергии на геотермальных электростанциях.

В Исландии в настоящее время более половины всей потребляемой энергии берут из Земли. В том числе за счёт геотермальных источников обеспечивается 90% отопления и так же 30% выработки электроэнергии. Остальная часть электроэнергии в стране производится на ГЭС, то есть также с использованием возобновляемого источника энергии, благодаря чему Исландия выглядит неким мировым экологическим эталоном.

Помимо Исландии высокая доля геотермальной энергетики в общем балансе производства электроэнергии обеспечивается в Новой Зеландии и островных государствах Юго-Восточной Азии (Филиппины и Индонезия), странах Центральной Америки и Восточной Африки, территория которых также характеризуется высокой сейсмической и вулканической активностью.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Течения, теплообмен и фазовые переходы в пористых средах и геотермальных системах

1.1 Исследование влияния сильной сжимаемости, эффекта адиабатического расширения и неоднородности состава на фильтрационную конвекцию жидкости и газа.

1.1.1 **Постановка задачи**. Насыщенная бинарной смесью совершенных газов пористая среда заполняет тонкий зазор между двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами большой

длины. Рассматривается двухмерная задача в плоскости ортогональной оси цилиндров. Средний радиус цилиндров обозначим r_0, а толщину зазора h ($h << r_0$).

На границе кольца заданы условия третьего рода относительно температуры и концентрации. В качестве предельных случаев имеем кольцо с заданными на границах условиями, и кольцо, расположенное в непроницаемой теплопроводной среде с диффузией. При механическом равновесии температура и концентрация в кольце линейно растут с глубиной. Полная масса газа в нем фиксирована.

Все теплофизические коэффициенты и проницаемость контура считаем постоянными, и пренебрегаем диссипацией энергии, связанной с трением между газом и вмещающими породами.

В [8], показано, что для описания конвекции в рассматриваемой задаче с точностью порядка отношения толщины кольца h к его радиусу r_0, можно использовать гидравлическое приближение (пренебрегается изменением термомеханических полей по толщине кольца). Таким образом, все величины внутри контура зависят от одной пространственной координаты: угла ϕ. Учитывая сказанное систему уравнений, описывающую конвекцию в рассматриваемых условиях и включающую уравнения Дарси, неразрывности, баланса энергии, баланса массы примеси и уравнение состояния запишем в виде

$$\frac{\mu}{k}u+\frac{1}{r_0}p'+\rho g\cos\phi=0$$

$$m\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{1}{r_0}(\rho u)'=\rho\frac{D_m}{h}\left[\frac{\partial c}{\partial r}\right]$$

$$\frac{\partial U_m}{\partial t}+\frac{1}{r_0}(\rho uH)'=\frac{\lambda_{mn}}{h}\left[\frac{\partial T}{\partial r}\right]+\lambda_m\left(\left\langle\frac{\partial T}{\partial r}\right\rangle+T''\right)-\rho gu\cos\phi \qquad (1.1)$$

$$m\frac{\partial c}{\partial t}+uc'=\frac{D_m(1-c)}{h}\left[\frac{\partial c}{\partial r}\right]+D_m\left(\left\langle\frac{\partial c_n}{\partial r}\right\rangle+c''\right)$$

$$\rho=\frac{p}{RTc}\frac{1}{1+\alpha},\qquad \alpha=\frac{m_1-m_2}{m_2}$$

$$U_m=(1-m)U_s+m\rho U$$

Здесь m_1, m_2 - молярные массы компонент, c - массовая концентрация примеси, т.е. второго компонента; u - скорость фильтрации газа; ρ, μ – плотность и вязкость смеси газов

соответственно; k - проницаемость контура; m - пористость контура; T - температура; U_m , U_s - внутренние энергии единицы объема насыщенной газом пористой среды и вмещающих пород соответственно; U , H - удельные внутренняя энергия и энтальпия смеси газов; T_n - температура среды вне контура; λ_m, λ - эффективные коэффициенты теплопроводности внутри и вне кольца; R - удельная газовая постоянная для первого компонента; $[f] = f_+ - f_-$ – скачок функции f на контуре; $< f >= (f_+ + f_-)/2$; штрих означает производную по угловой координате ϕ .

Введем следующие характерные масштабы: r_0 - длины; $\lambda_m / \rho^0 C_p r_0$ -скорости; T^0 - температуры; c^0 -концентрации; $\rho^0 C_p r_0^2 / \lambda_m$ - времени; ρ^0 – плотности (ρ^0 - средняя плотность газа, определяемая по заданной полной массе газа в контуре); $p^0 = R\rho^0 T^0 (1+\alpha)$ - давления.

Перепишем систему (1.1) в безразмерном виде, используя указанные масштабы величин.

$$\frac{\varepsilon\delta_T \gamma u}{Ra} + p' + \varepsilon\gamma\rho\cos\phi = 0$$

$$m\frac{\partial\rho}{\partial t} + (\rho u)' = \frac{\rho}{Leh}\left[\frac{\partial c}{\partial r}\right] \qquad (1.2)$$

$$b\frac{\partial T}{\partial t} + \rho u T' - \frac{m(\gamma-1)}{\gamma}\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{h}\left[\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \left\langle\frac{\partial T}{\partial r}\right\rangle + T'' - \varepsilon(\gamma-1)\rho u\cos\phi$$

$$m\frac{\partial c}{\partial t} + uc' = \frac{1-c}{Leh}\left[\frac{\partial c}{\partial r}\right] + \frac{1}{Le}\left(\left\langle\frac{\partial c}{\partial r}\right\rangle + c''\right)$$

$$\rho = \frac{p}{Tc}\frac{1+\alpha}{1+\alpha}, \qquad \alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_2}c^0$$

$$Ra = \frac{k\left(\rho^0\right)^2 C_p g \beta_T^0 G_T r_0^2}{\mu \lambda_m}, \qquad Le = \frac{\lambda_m}{\rho^0 C_p D_m}, \qquad b = \frac{C_m}{\rho C_p}, \qquad \varepsilon = \frac{g r_0}{\gamma R T^0}, \qquad \delta_T = \frac{G_T r_0}{T^0},$$

$$\delta_c = \frac{G_c r_0}{c^0}, \qquad \beta_T^0 = \frac{1}{T^0}$$

Здесь: Ra - число Релея, h - отношение толщины контура к его радиусу, G_T, G_c - градиенты температуры и концентрации при механическом равновесии; R - удельная газовая постоянная для первого компонента, γ - показатель адиабаты, ε - критерий гидростатической сжимаемости, δ_T, δ_c - характерные перепады температуры и концентрации в безразмерном виде.

Используем законы тепло и массообмена через границы кольца в виде

$$\left[\frac{\partial T}{\partial r}\right] = Nu_{Tn}\left(T - T\right), \qquad \left[\frac{\partial c}{\partial r}\right] = Nu_{cn}\left(c - c\right) \tag{1.3}$$

$$T_n = 1 - \delta_T \sin\phi, \qquad c_n = 1 - \delta_c \sin\phi$$

Здесь, Nu_T, Nu_c тепловое и концентрационное числа Нуссельта.

С учетом (1.3) запишем (1.2) в виде

$$\frac{\varepsilon \delta_T \gamma u}{Ra} + p' + \varepsilon \gamma \rho \cos\phi = 0$$

$$m\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u)' = \frac{\rho}{Leh}\left[\frac{\partial c}{\partial r}\right] \tag{1.4}$$

$$b\frac{\partial T}{\partial t} + \rho u T' - \frac{m(\gamma - 1)}{\gamma}\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{Nu_T}{h}\left(T_n - T\right) + \left\langle \frac{\partial T}{\partial r} \right\rangle + T'' - \varepsilon(\gamma - 1)\rho u \cos\phi$$

$$m\frac{\partial c}{\partial t} + u c' = \frac{1 - c}{Le}\frac{Nu_c}{h}\left(c_n - c\right) + \frac{1}{Le}\left(\left\langle \frac{\partial c}{\partial r} \right\rangle + c''\right)$$

$$\rho = \frac{p}{Tc}\frac{1 + \alpha}{1 + \alpha}, \qquad \alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_2} c^0$$

1.1.2 Конвективная устойчивость механического равновесия

При механическом равновесии из (1.4) получим следующую систему уравнений

$$p_0' + \varepsilon\gamma\rho_0 \cos\phi = 0, \quad \rho_0 = \frac{p_0}{T_0 c_0}\frac{1+\alpha}{1+\alpha}, \quad \alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_2} c^0 \qquad (2.1)$$

$$T_0 = 1 - \delta_T \sin\phi, \quad c_0 = 1 - \delta_c \sin\phi$$

Интегрируя эту систему, найдем

$$T_0 = 1 - \delta_T \sin\phi, \quad c_0 = 1 - \delta_c \sin\phi$$

$$p_0 = A\left(\frac{1-\delta_T \sin\phi}{1-\varsigma_c \sin\phi}\right)^{\beta}, \quad \beta = \frac{\varepsilon\gamma}{\delta_T - \varsigma_c}, \quad \varsigma_c = \frac{\alpha\delta_c}{1+\alpha} \qquad (2.2)$$

$$\rho_0 = A\frac{(1-\delta_T \sin\phi)^{\beta-1}}{(1-\varsigma_c \sin\phi)^{\beta+1}}, \quad T_{n0} = 1 - \delta_T r \sin\phi, \quad c_{n0} = 1 - \delta_c r \sin\phi$$

Линеаризуем систему уравнений (1.4) около механического равновесия (2.2) используя разложение.

$$p = p_0 + e^{-\sigma t} Q_0 p_1, \quad T = T_0 + e^{-\sigma t} Q_0 T_1, \quad \rho = \rho_0 + e^{-\sigma t} Q_0 \rho_1 \qquad (2.3)$$

$$c = c_0 + e^{-\sigma t} Q_0 c_1, \quad Q = e^{-\sigma t} Q_0, \quad Q_0 = \rho_0 u = const << 1$$

Можно показать, что в уравнении неразрывности в системе (1.4) первое слагаемое мало, по крайней мере, при $\varepsilon << 1, \ \delta_T << 1$. Условие $\varepsilon << 1$ гарантирует, что мал так же член с производной по давлению в уравнении переноса тепла. Малость указанных членов означает, что характерное время термоакустических процессов мало по сравнению с характерным временем развития конвекции. Пренебрегая этими слагаемыми в итоге получим

$$p_1' + \frac{\varepsilon\gamma(1+\alpha)\cos\varphi}{1+\alpha c_0}\left(\frac{1}{T_0} p_1 - \frac{p_0}{T_0^2} T_1 - \frac{\alpha\rho_0}{1+\alpha} c_1\right) + \frac{\varepsilon\delta_T\gamma}{Ra\,\rho_0} = 0$$

$$-\sigma b T_1 + T_0' = -\frac{Nu_T}{h} T_1 + \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial r} \right\rangle + T_1'' - \varepsilon(\gamma - 1)\cos\phi$$

$$-\sigma a c_1 + c_0' = -\frac{Nu_c}{hLe} c_1 + \frac{1}{Le}\left(\left\langle \frac{\partial c_1}{\partial r} \right\rangle + c_1''\right), \qquad a = m\rho_0 \approx m \qquad (2.4)$$

$$\rho_1 = \frac{1+\alpha}{1+\alpha c_0}\left[\frac{T_0 p_1 - T_1 p_0}{T_0^{\,2}} - \frac{\alpha}{1+\alpha}\rho_0 c_1\right]$$

Из условия существования нетривиального периодического решения этой системы получим следующие искомые критические значения чисел Рэлея для монотонной и колебательной неустойчивости соответственно

$$Rar_c = \frac{I1\delta_T A_T B_T}{I2\delta_T\left(1-K\right)A_T + I3\delta_c B_T} \qquad (2.5)$$

$$Rai_c = \frac{I1\delta_T\left(B_T a + A_T b\right)}{I2\delta_T\left(1-K\right)a + I3\delta_c b} \qquad (2.6)$$

Здесь

$$I1 = \int_0^{2\pi}\frac{1}{p_0\rho_0}d\varphi, \qquad I2 = \int_0^{2\pi}\frac{\left(1+\alpha\right)\cos^2\varphi}{\left(1+\alpha c_0\right)T_0^2}d\varphi$$

$$I3 = \int_0^{2\pi}\frac{\left(1+\alpha\right)\cos^2\varphi}{\left(1+\alpha c_0\right)T_0}\frac{\alpha}{1+\alpha c_0}d\varphi \qquad (2.7)$$

$$A_T = \frac{1}{Le}\left(\frac{Nu_c}{h}+1\right), \qquad B_T = \frac{Nu_T}{h}+1$$

Используя (2.5)-(2.7) из (2.4) не трудно найти соответствующие критические возмущения полей.

Таким образом, если число Рэлея превосходит минимальное из чисел (2.5) и (2.6), механическое равновесие теряет устойчивость и возникает конвекция.

1.1.3 **Нелинейная конвекция.** Рассмотрим систему (1.4) в стационарном случае

$$\frac{\varepsilon\delta_T\gamma Q}{Ra\rho} + p' + \varepsilon\gamma\rho\cos\phi = 0, \qquad Q = \rho u$$

$$Q = const$$

$$QT' = \frac{Nu_T}{h}\left(T_n - T\right) + \left\langle\frac{\partial T}{\partial r}\right\rangle + T'' - \varepsilon(\gamma-1)Q\cos\phi \qquad (3.1)$$

$$Qc' = \frac{1}{Le}\frac{Nu_c}{h}\left(c_n - c\right) + \frac{1}{Le}\left(\left\langle\frac{\partial c}{\partial r}\right\rangle + c''\right)$$

$$\rho = \frac{p}{Tc}\frac{1+\alpha}{1+\alpha}, \qquad \alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_2}c^0$$

Отсюда интегрируя уравнения для температуры и концентрации получим

$$T = 1 + \delta_T (a_T \cos\phi + (b_T - 1)\sin\phi)$$
$$c = 1 + \delta_c (a_c \cos\phi + (b_c - 1)\sin\phi) \qquad (3.2)$$
$$a_T = \frac{(Nu_T + h)(1-K)Q}{(Nu_T + h)^2 + Q^2}, \qquad b_T = \frac{(1-K)Q^2}{(Nu_T + h)^2 + Q^2}$$
$$a_c = \frac{(Nu_c + h)Q/Le}{(Nu_c + h)^2/(Le)^2 + Q^2}, \qquad b_c = \frac{Q^2}{(Nu_c + h)^2/(Le)^2 + Q^2}$$

Запишем первое уравнение (3.1) в виде

$$\frac{\varepsilon\delta_T\gamma Q}{Ra\,h}\frac{T\phi(1+\alpha)}{(1+\alpha)\,p} + p' + \frac{\varepsilon\gamma\cos\phi}{Tc}\frac{1+\alpha}{1+\alpha}p = 0 \qquad (3.3)$$

Отсюда

$$\frac{1}{2}\frac{dp^2}{d\phi} + \frac{\varepsilon\gamma\cos\phi}{Tc}\frac{1+\alpha}{1+\alpha}p^2 + \frac{\varepsilon\delta_T\gamma Q}{Ra\,h}\frac{T\phi(1+\alpha)}{(1+\alpha)} = 0 \qquad (3.4)$$

Обозначим

$$f(\phi) = \frac{1}{Tc}\frac{1+\alpha}{1+\alpha} = \frac{1}{\left[1+\delta_T\left(a_T\cos\phi + (b_T-1)\sin\phi\right)\right]\left[1+\zeta_c\left(a_c\cos\phi + (b_c-1)\sin\phi\right)\right]}$$

$$s(\phi) = \int_0^{\phi}\cos\phi\, f(\phi)\,d\phi$$

Тогда

$$\frac{1}{2}\frac{dp^2}{d\phi} + \varepsilon\gamma\cos\phi\, f(\phi)\,p^2 + \frac{\varepsilon\delta_T\gamma Q}{Ra\,h f(\phi)} = 0$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$p^2 = \frac{\varepsilon\delta_T\gamma Q}{Ra\,h} e^{-2\varepsilon\gamma s(\phi)} \left[c_0 \int_0^{2\pi} \frac{e^{2\varepsilon\gamma s(\phi)}}{f(\phi)} d\phi - \int_0^{\phi} \frac{e^{2\varepsilon\gamma s(\phi)}}{f(\phi)} d\phi \right] \tag{3.5}$$

$$c_0 = \frac{1}{1 - e^{2\varepsilon\gamma s(2\pi)}}$$

Расход найдем из условия сохранения полной массы газа

$$\int_0^{2\pi} \rho d\phi \equiv \int_0^{2\pi} \frac{p}{Tc} \frac{1+\alpha}{1+\alpha} d\phi = \int_0^{2\pi} p(Q,\phi) f(Q,\phi) d\phi = 2\pi \tag{3.6}$$

Таким образом, полученное решение нелинейной стационарной задачи имеет вид

$$T = 1 + \delta_T (a_T \cos\phi + (b_T - 1)\sin\phi), \quad c = 1 + \delta_c (a_c \cos\phi + (b_c - 1)\sin\phi)$$

$$p^2 = \frac{\varepsilon\delta_T\gamma Q}{Ra\,h} e^{-2\varepsilon\gamma s(\phi)} \left[c_0 \int_0^{2\pi} \frac{e^{2\varepsilon\gamma s(\phi)}}{f(\phi)} d\phi - \int_0^{\phi} \frac{e^{2\varepsilon\gamma s(\phi)}}{f(\phi)} d\phi \right]$$

$$\rho = \frac{p}{Tc} \frac{1+\alpha}{1+\alpha}$$

$$\int_0^{2\pi} \rho d\phi \equiv \int_0^{2\pi} \frac{p}{Tc} \frac{1+\alpha}{1+\alpha} d\phi = \int_0^{2\pi} p(Q,\phi) f(Q,\phi) d\phi = 2\pi \tag{3.7}$$

$$c_0 = \frac{1}{1 - e^{2\varepsilon\gamma s(2\pi)}}$$

$$a_T = \frac{(Nu_T + h)(1-K)Q}{(Nu_T + h)^2 + Q^2}, \qquad b_T = \frac{(1-K)Q^2}{(Nu_T + h)^2 + Q^2}$$

$$a_c = \frac{(Nu_c + h)Q/Le}{(Nu_c + h)^2/(Le)^2 + Q^2}, \qquad b_c = \frac{Q^2}{(Nu_c + h)^2/(Le)^2 + Q^2}$$

$$f(\phi) = \frac{1}{Tc} \frac{1+\alpha}{1+\alpha} = \frac{1}{\left[1 + \delta_T (a_T \cos\phi + (b_T - 1)\sin\phi)\right]\left[1 + \zeta_c (a_c \cos\phi + (b_c - 1)\sin\phi)\right]}$$

$$s(\phi) = \int_0^{\phi} \cos\phi\, f(\phi) d\phi$$

1.1.4 **Основные результаты.** Согласно результатам, полученным в разделе 2, границы колебательной и монотонной неустойчивости определяются соответственно следующими критическими числами Рэлея

$$Rai_c = \frac{I1\delta_T \left(B_T a + A_T b \right)}{I2\delta_T \left(1 - K \right) a + I3\delta_c b} \tag{4.1}$$

$$Rar_c = \frac{I1\delta_T A_T B_T}{I2\delta_T \left(1 - K \right) A_T + I3\delta_c B_T} \tag{4.2}$$

Поделим обе части этих равенств на B_T, и перепишем их в виде

$$\frac{Rai_c h}{Nu_T} = \frac{I1\delta_T \left[a + b / Le_m \right]}{I2\delta_T \left(1 - K \right) a + I3\delta_c b} \tag{4.3}$$

$$\frac{Rar_c h}{Nu_T} = \frac{I1\delta_T}{I2\delta_T \left(1 - K \right) + I3\delta_c Le_m} \tag{4.4}$$

$$Le_m = \frac{B_T}{A_T} = \frac{\left(Nu_T + h \right) Le}{Nu_c + h} \tag{4.5}$$

Здесь Le_m -эффективное число Льюиса

В этих равенствах для кольца с заданными на границе линейно меняющимися распределениями температуры и концентрации можно положить $Nu_T \approx Nu_c \approx 2/h$, а для кольца расположенном в непроницаемой теплопроводной среде с диффузией $Nu_{Tn} \approx 2\lambda_m / \lambda$, $Nu_c \approx 2D_n / D_m$.

В данной работе рассмотрен случай, когда и температура, и концентрация растворенного компонента на границах кольца заданы и линейно растут с глубиной. При этом примесь может быть, как легким, так и тяжелым компонентом. Кроме того, полагаем, что $Nu_T \approx Nu_c \approx 2/h.$

Рассмотрим сначала случай, когда примесь является более легким компонентом, т.е. $\alpha = c^0\left(m_1 - m_2\right)/m_2 > 0.$

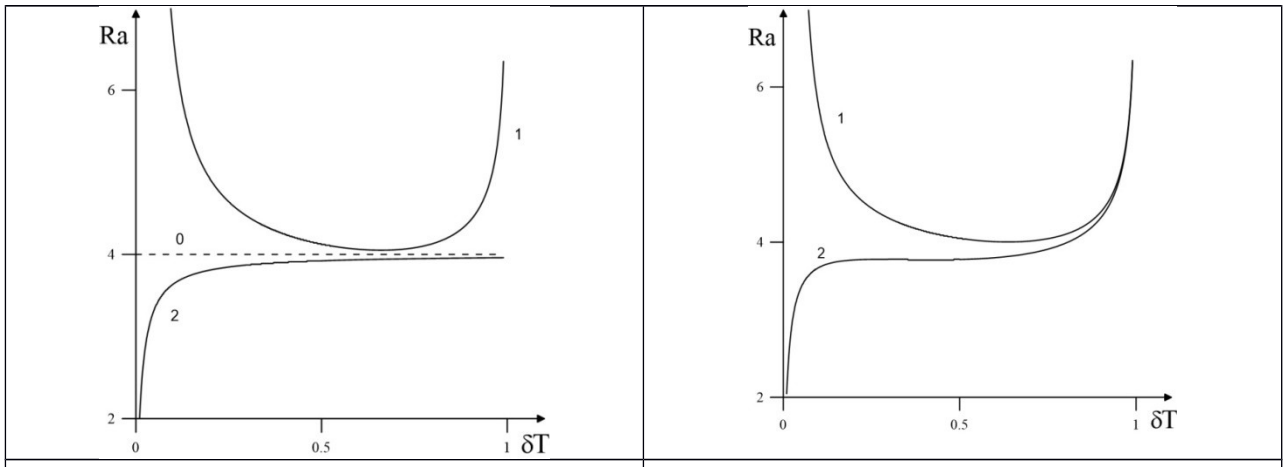


Рис.1.1.4.1a Зависимость критического числа Рэлея от перепада температуры: 0-приближение Буссинеска; 1- Совершенный газ без примеси ($\alpha = 0$); 2. Приближение Буссинеска для смеси газов (подогрев снизу и градиент концентрации легкого компонента направлен вниз)	Рис.1.1.4.1b Два характерных типа кривых зависимости критического числа Рэлея от перепада температуры для смеси двух совершенных газов.

На рис.1.1.4.1a показаны типичные кривые зависимости критического числа Рэлея от безразмерного перепада температуры для трех основных случаев: 0-Приближение Буссинеска для однокомпонентной жидкости (газа); 1-Совершенный газ без примеси; 2- Приближение Буссинеска для смеси газов. Кривая -0 показывает, что в приближении Буссинеска для однокомпонентной жидкости критическое число Рэлея не зависит от перепада температуры на границе, хотя само число Рэлея линейно зависит от него. Как показывает кривая 1, одно из проявлений небуссинесковских эффектов приводит к тому, что указанная зависимость имеет место быть. Заметим, что кривая 1 имеет вертикальную асимптоту, левее которой решения нет. Это связано с эффектом адиабатического расширения, т.е. с хорошо известным фактом, что если градиент температуры направленный вниз меньше адиабатического, возникновение конвекции невозможно

(критерий Шварцшильда). На рис.1.1.4.1b снова приводятся две типичные нейтральные кривые, которые ниже будем иметь в виду, говоря кривая типа 1 или кривая типа 2.

На рис.1.1.4.2 показано как влияет на критерий возникновения конвекции сжимаемость смеси. Наиболее характерным и типичным является случай малых и относительно небольших перепадов температуры на границе. В этих случаях, как следует из рис.2 сжимаемость затрудняет возникновение конвекции, т.е. играет стабилизирующую роль. Хорошо известно, что в рассматриваемом случае, когда имеет место подогрев снизу и рост концентрации легкого компонента с глубиной в приближении Буссинеска неустойчивость может быть только монотонной. Однако небуссинесковский эффект сжимаемости приводит к тому, что это не так. Как показано на рис.3 имеется область параметров, где неустойчивые возмущения нарастают колебательным образом (область под кривой 1).

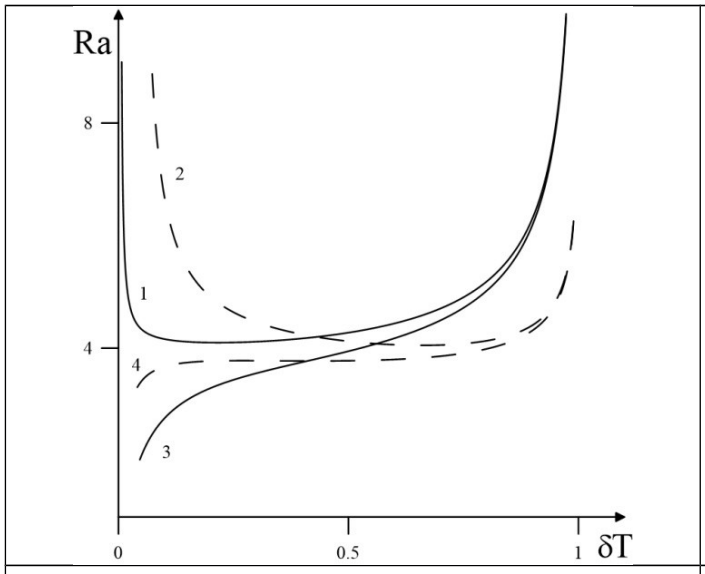


Рис.1.1.4.2 Зависимость критического числа Рэлея от перепада температуры: $Le_m = 10,\ \alpha = 0.01$; $\delta_c = 0.001$, $\varepsilon = 0.01,\ 0.1\ (1-2)$; $\delta_c = 0.1$, $\varepsilon = 0.01,\ 0.1\ (3-4)$.

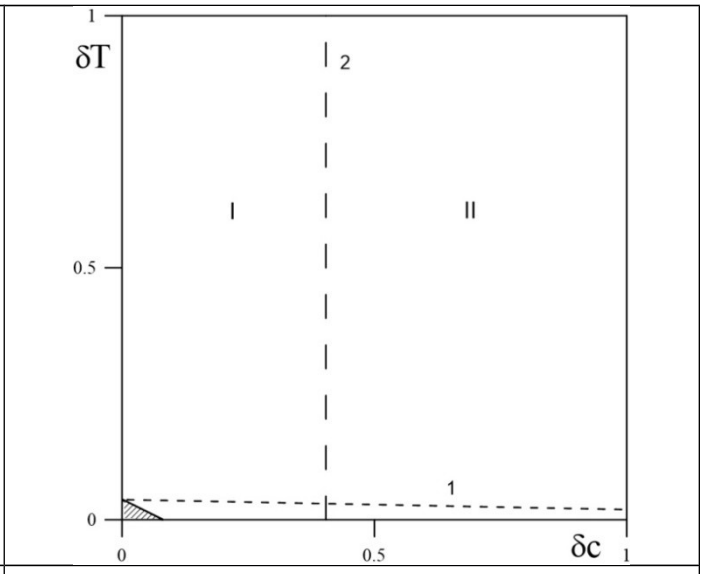


Рис.1.1.4.3 Карта конвективной устойчивости бинарной смеси совершенных газов при $\alpha = 0.01,\ Le_m = 10$; Штриховка - область абсолютной устойчивости; Область под кривой 1- область колебательной неустойчивости; I, II- Области, которым соответствуют нейтральные кривые первого и второго типов, показанных на рис.1b.

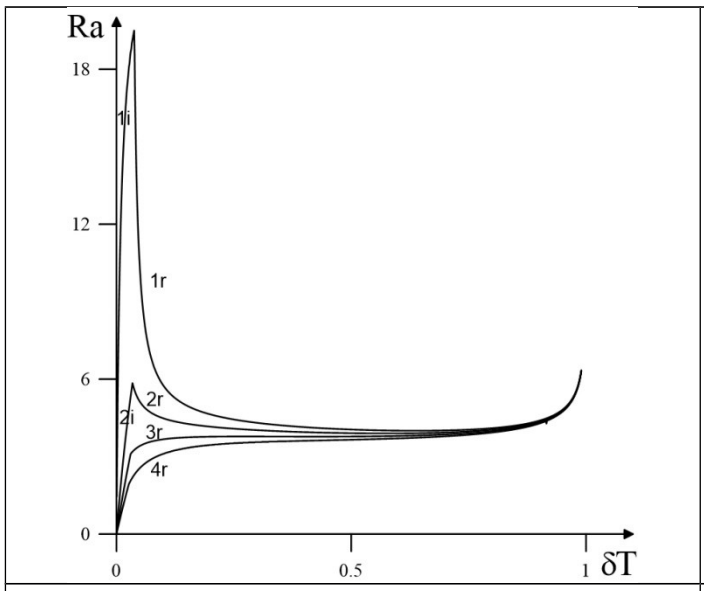


Рис.1.1.4.4 Зависимость критического числа Рэлея от перепада температуры: $Le_m = 10,\ \alpha = 0.01,\ \varepsilon = 0.1$: $\delta_c = 0.1,\ 0.3,\ 0.5,\ 0.7$ (1-4) .

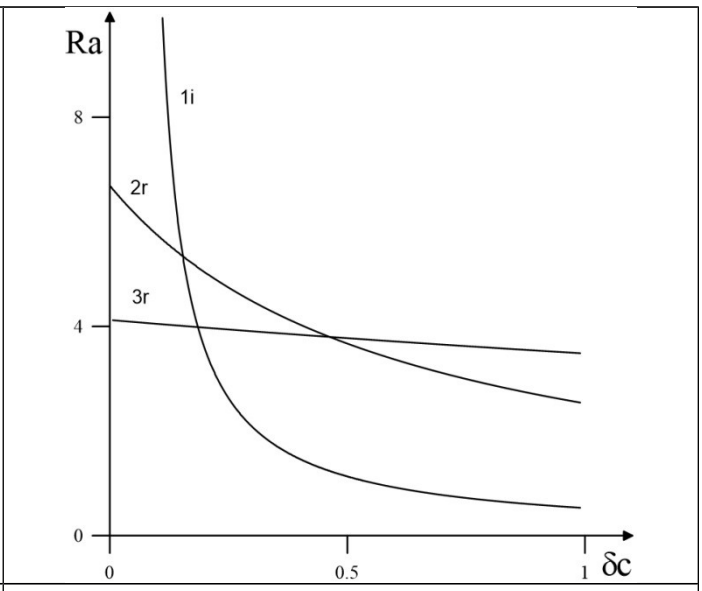


Рис. 1.1.4.5 Зависимость критического числа Рэлея от перепада концентрации: $Le_m = 10,\ \alpha = 0.01,\ \varepsilon = 0.1$: $\delta_T = 0.01,\ 0.1,\ 0.5$ (1-3) .

На рис. 1.1.4.4 показана зависимость критического числа Рэлея от перепада температуры для различных значений перепада концентраций при фиксированных прочих параметрах. Из этого рисунка следует, что небуссинесковские эффекты приводят к тому, что при не слишком малых перепадах температуры превалирует эффект сжимаемости и нейтральная кривая имеет тип 1. Если же перепад температуры достаточно мал, доминирует наличие примеси над эффектом сжимаемости и на данном участке нейтральная кривая близка к типу 2. На этом рисунке и далее буква r относится к монотонным критическим возмущениям, а буква i к колебательным. Рис. 1.1.4.5 показывает, как зависит критическое число Рэлея от перепада концентраций при различных значениях перепада температуры и фиксированных прочих параметрах.

Перейдем к случаю, когда примесь является более тяжелым компонентом, чем растворитель и его концентрация с глубиной растет, т.е. $\alpha = c^0 \left(m_1 - m_2 \right) / m_2 < 0.$ Типичная карта устойчивости в этом случае показана на рис. 1.1.4.6. В заштрихованной области конвекция не возникает ни при каких числах Релея, т.е. это область абсолютной устойчивости. В области между кривыми 1 и 2 конвекция возникает колебательным образом. В остальной области квадрата неустойчивость возникает относительно монотонных возмущений. На рис. 1.1.4.7 показаны значения критического числа Рэлея вдоль различных прямых параллельных оси ординат на карте, показанной на рис. 1.1.4.6. Видно, что часть кривых относится к колебательным возмущениям, а часть - к монотонным. Аналогично, значения критического числа Рэлея вдоль различных прямых параллельных оси абсцисс на карте (рис. 1.1.4.6) показаны на рис. 1.1.4.8. Эти кривые имеют

асимптоты левее (правее) которых имеет место абсолютная конвективная устойчивость рис. 1.1.4.7 (рис. 1.1.4.8), что согласуется с штрихованной областью на карте (рис. 1.1.4.6).

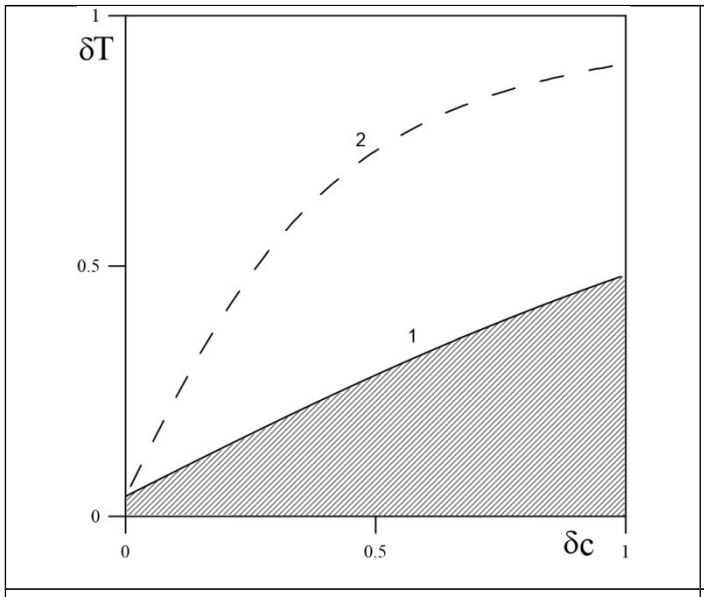


Рис. 1.1.4.6 Карта конвективной устойчивости бинарной смеси совершенных газов при $\alpha = -0.01,\ \ Le_m = 100$; Штриховка - область абсолютной устойчивости; Область между кривыми 1 и 2 - область колебательной неустойчивости.

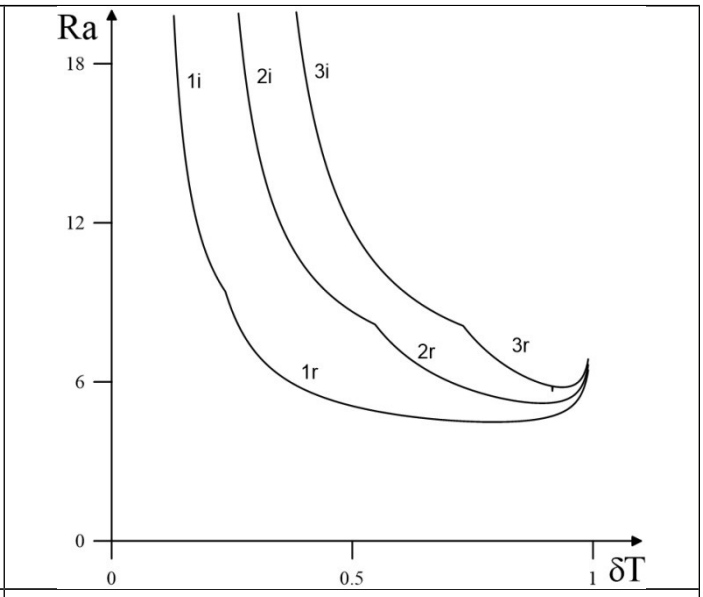


Рис. 1.1.4.7 Зависимость критического числа Рэлея от перепада температуры: $Le_m = 100,\ \alpha = -0.01$, $\varepsilon = 0.1$: $\delta_c = 0.1,\ 0.3,\ 0.5$ (1-3) .

В случае нелинейной стационарной конвекции имеем следующие результаты. Рассмотрим случай, когда примесь является легким компонентом и растет с глубиной. На рис. 1.1.4.9 показаны кривые зависимости массового расхода газа от безразмерного перепада температуры для различных значений критерия сжимаемости. Как и ранее большим пунктиром показаны соответствующие кривые для чистого газа без примеси. Малым пунктиром показана соответствующая зависимости для бинарной смеси в приближении Буссинеска. Из этой фигуры следует, что при малых значениях сжимаемости картина близка к приближению Буссинеска (кривые типа 2), а при больших к сильно сжимаемой однокомпонентной жидкости (кривые типа 1). Однако при больших перепадах температуры сказываются небуссинесковские эффекты и кривые (рис. 1.1.4.9) плавно переходят от второго типа к первому. Из рис. 1.1.4.9 так же следует, что в наиболее характерном случае малых и относительно малых перепадов температуры сжимаемость приводит к уменьшению расхода, а примесь легкого компонента к его росту.

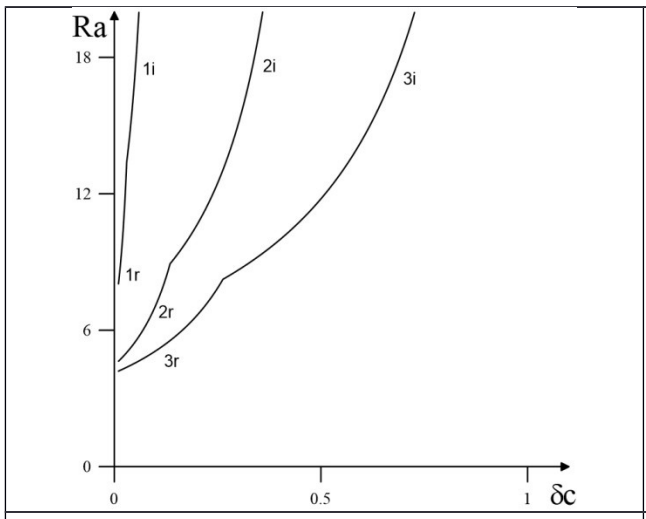


Рис. 1.1.4.8 Зависимость критического числа Рэлея от перепада концентрации: $Le_m = 100,\ \alpha = -0.01$, $\varepsilon = 0.1$; $\delta_T = 0.1,\ 0.3,\ 0.5$ (1-3) .

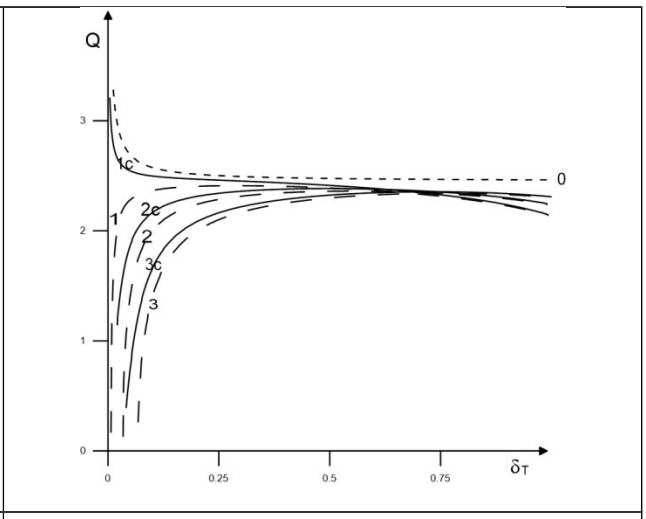


Рис1.1.4.9 Зависимость массового расхода газа от перепада температуры: $Ra = 10$, $Le_m = 2$, $\delta_c = 0.1$, $\alpha = 0,\ 0.1$, $\varepsilon = 0.01,\ 0.05,\ 0.1$ $(1-3)$; крупный пунктир-случай $\alpha = 0$; мелкий пунктир-приближение Буссинеска.

1.2 Изучение влияния процессов переноса, растворения и осаждения компонент, а также модуляции граничных условий на эволюцию гидротермальных систем.

Геологические данные по некоторым гидротермальным системам подтверждают, что они являются долгоживущими в пределах 250000-500000 лет. Отсюда возникает проблема о длительно действующем источнике тепла. Расчёты простого энергетического потока показывают, что для обеспечения активности этих систем в течение периода их жизни требуется, совершено неприемлемое количество магмы. Так, например, Grindley [17] рассчитал, что для Вайракейской системы в Новой Зеландии для обеспечения теплового потока на протяжении её активности необходимо разместить и охладить 3750 км^3 магмы. Современный размер зоны восходящего потока не обеспечит размещение такого объёма магмы в земной коре. Cathles, Erendi [18] пришли к выводу, что одна интрузия могла бы обеспечить гидротермальную деятельность теплом до 800000 лет, но только в особых условиях и более высокотемпературными ультраосновными силами. В [19] рассчитано, что гидротермальная активность Стимбоатских источников происходила в течение 3 млн. лет, но периодически.

Напрашивается вывод, что тепловой поток, формирующий системы, изменялся во времени. Таким образом, модели с установившимся режимом теплового питания гидротермальных систем,

какие используют геотермальные резервуарные инженеры, не приемлемы для долгоживущих гидротермальных систем.

Придя к выводу, что тепловая разгрузка гидротермальных систем изменяется со временем и необходимо его возобновление, следующим шагом будет рассмотрение проблемы магматизма. Наиболее очевидным является периодическое внедрение даек. Обычно гидротермальные системы располагаются в зонах структурно ослабленных, где может ожидаться повторное внедрение магмы. Оценки общего теплового потока во времени в больших вулканно-тектонических структурах, таких как Вулканическая зона Таупо в Новой Зеландии, показывают, что около половины теплового потока непосредственно обеспечивается вулканизмом, а остальная часть - это конвективный теплоперенос обеспеченный гидротермальной деятельностью [20, 21].

Ожидается, что тепловая разгрузка гидротермальной системы разделяется на два перемежающихся цикла: короткий цикл, как ответная реакция на гидротермальные взрывы и самоизоляцию, и более продолжительный цикл, связанный с внедрением интрузий.

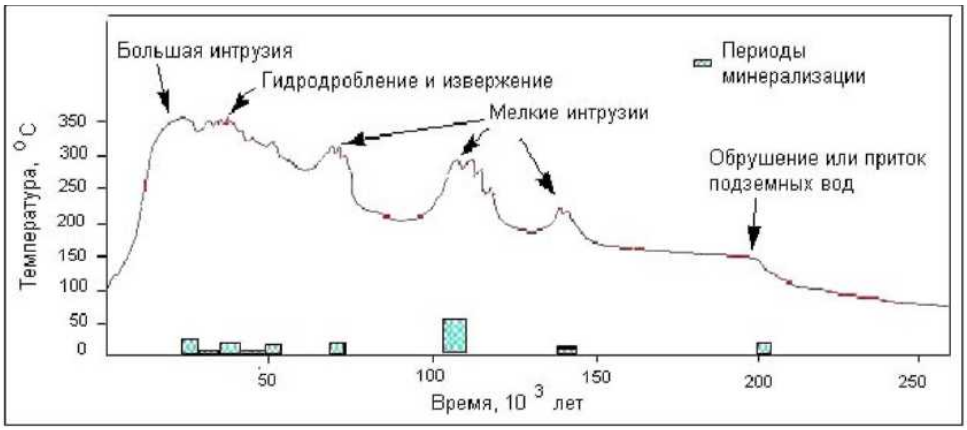


Рис.1.2.1 Изменение температуры во времени в периодически обновляемой гидротермальной системе.

Эпизоды магматических инъекций могут оказывать более значительное влияние на гидротермальную систему, чем события «нормальных» гидротермальных извержений, даже если ряд энергетических инъекций был не очень значительным. Легко вообразить гидротермальную систему, которая со временем будет иметь конвективный температурный градиент, который обеспечит процесс кипения в недрах системы. Любой приток энергии к корням гидротермальной системы (в отличие от падения давления в кровле системы) сможет спровоцировать большой сброс накопленной энергии, а также потока энергии, фактически, обеспеченного внедрением магмы в систему.

Численно исследована конвективная устойчивость бинарной смеси в пористом прямоугольнике при модуляции градиента температуры около некоторого среднего значения. Получено, что в данном случае модуляция параметров играет только дестабилизирующую роль. Построены нейтральные кривые в случаях отсутствия и наличия примеси, а также с учетом

адсорбции. Проведен анализ влияния модуляции градиента температуры на нелинейные режимы конвекции бинарной смеси в пористом прямоугольнике.

Система уравнений, описывающих конвекцию бинарной смеси в пористой среде в приближении Дарси-Буссинеска без учета перекрестных эффектов имеет вид:

$$\frac{\eta}{k}u=-\nabla p-\rho_0 g(1-\beta_1 T-\beta_2 C)\gamma$$
$$C_m\frac{\partial T}{\partial t}+C_p\rho_0 u\nabla T=\lambda\Delta T$$
$$m\frac{\partial C}{\partial t}+u\nabla C=D\Delta C$$
$$div\, u=0$$
$$z=0:\ T=T_1,\ C=C_1,\ u_x=0$$
$$z=L:\ T=T_2+T_0\sin\omega t,\ C=C_2,\ u_z=0$$
$$x=-L;L:\ \frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\partial C}{\partial x}=0,\ u_x=0$$

Где $\rho=\rho_0(1-\beta_1 T-\beta_2 C)$, ρ_0 - характерная плотность среды соответствующая средним значениям концентрации и температуры, а через *T* и *C* обозначим отклонения от этих средних значений, β_1 и β_2 - коэффициенты температурного и концентрационного расширения (если *C* – концентрация легкой компоненты, то $\beta_2>0$). Здесь u - поле скоростей, *p*- давление в смеси, отсчитываемое от гидростатического, соответствующего ρ_0, η - кинематическая вязкость, λ -эффективная теплопроводность пористой среды, C_m - эффективная теплоемкость единицы объема пористой среды, C_p - теплоемкость смеси при постоянном давлении, *D* – коэффициент диффузии, k - проницаемость, m- пористость, γ - единичный вектор направленный против поля тяжести. Введем систему координат следующим образом: ось x направим вдоль нижней границы слоя, а ось z – вертикально вверх.

Рассматривая возмущения около механического равновесия, введем функцию тока ψ и исключим из системы давление:

$$\Delta\psi=-sign(R)\frac{\partial T}{\partial x}-\frac{Rd}{Le|R|}\frac{\partial C}{\partial x}$$
$$\frac{\partial T}{\partial t}u_x+\frac{\partial T}{\partial x}+u_z\frac{\partial T}{\partial z}-\left(1-\frac{\partial Q_s}{\partial z}\right)u_z=\frac{1}{|R|}\Delta T$$
$$\frac{1}{b}\frac{\partial C}{\partial t}+u_x\frac{\partial C_2}{\partial x}+u_z\frac{\partial C_2}{\partial z}-u_z=\frac{1}{Le|R|}\Delta C \quad ;$$

При граничных условиях:

$$x=-1;1:\ \frac{\partial T}{\partial x}=0,\ \frac{\partial C}{\partial x}=0,\ \psi=0 \quad ,$$

$z=0;1: T=0, C=0, \psi=0$

Le - число Льюиса, δ - безразмерная амплитуда модуляции, R, Rd - число Рэлея и его диффузионный аналог.

Было показано, что точкам области равновесия смеси в параметрическом пространстве (при отсутствии модуляции), на плоскости амплитуда-частота модуляции соответствует нейтральная кривая, ниже которой возмущения затухают, выше – нарастают. Каждая нейтральная кривая имеет либо «целый» тип (период колебаний соответствует периоду модуляции), либо «полуцелый (период колебаний вдвое больше периода модуляции), либо состоит из чередующихся участков «целого» и «полуцелого» типов.

Численный расчет конвекции бинарной смеси в пористой среде на основе полных уравнений был выполнен как с постоянным, так и с модулируемым во времени градиентом температуры. Основные характеристики возмущений: безразмерный поток тепла (число Нуссельта):, линии тока и изотермы. Для решения данной системы уравнений использовалась неявная монотонная разностная схема расщепления для уравнений переноса в сочетании с методом переменных направлений с постоянными параметрами для уравнения Пуассона.

Полученная разностная схема решалась методом продольно-поперечной прогонки, с проверкой невязок на каждом временном шаге.

Были проведены многовариантные расчеты, которые показали, что при модуляции градиента температуры нейтральные кривые, построенные для каждой пары чисел Рэлея (по линеаризованным уравнениям), завышают критерий и дают границу лишь условной устойчивости (устойчиво относительно бесконечно малых возмущений, и не устойчиво относительно конечных). Причем по линейной теории критическая амплитуда с уменьшением частоты модуляции растет, а решение задачи в нелинейной постановке показывает, что при этом наблюдается расширение области подкритической неустойчивости. Например, по линейной теории, для точки Rd=-0.5, R=0.5 при частоте модуляции 1/w=1.5 критическая амплитуда, выше которой возмущения нарастают равна r=5.564, для 1/w=7.9 - r= 10.457. Расчеты по нелинейной системе уравнений, показали, что для 1/w=1.5 при r=4.6, через определенный промежуток времени возникает трех ячеистое движение (рис. 2), при увеличении амплитуды модуляции, с течением времени происходит перестройка режимов конвекции, изменяется количество ячеек и направление движения (рис. 3). Для 1/w=7.9 уже при r=4.5, также устанавливается конвективное движение, которое с течением времени может менять направление и количество ячеек. (рис.4).

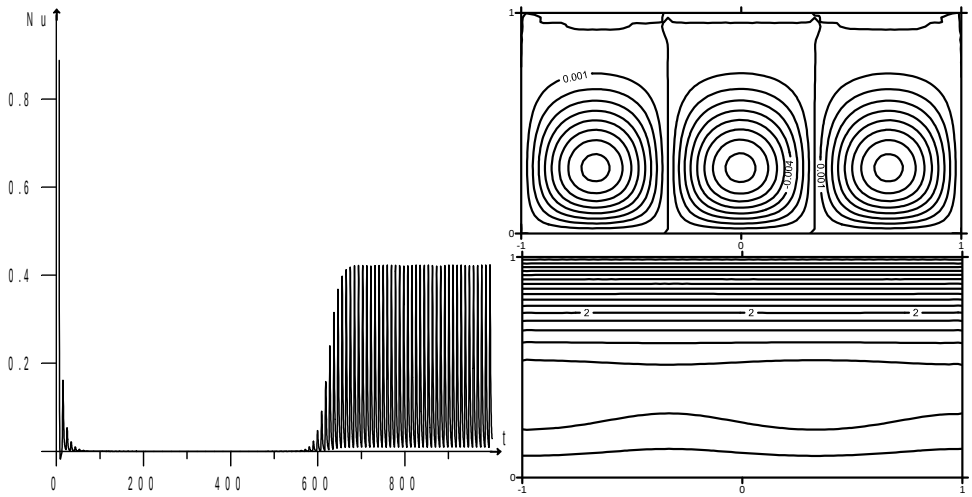


Рис. 1.2. 2 Зависимость усредненного числа Нуссельта от времени, справа показаны линии тока и под ними изотермы при Rd=-0.5 R=0.5, 1/w=1.5 и r=4.6.

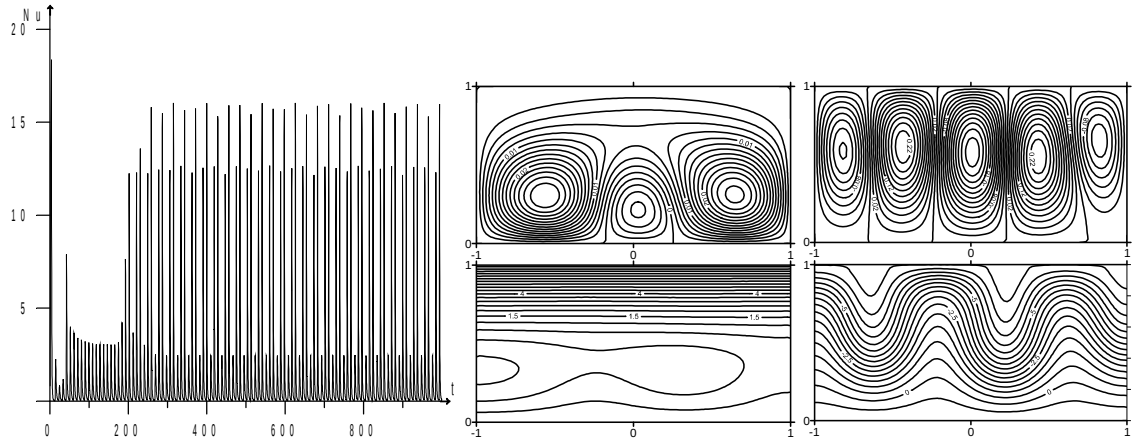


Рис. 1.2.3 Зависимость усредненного числа Нуссельта от времени, справа показаны линии тока и под ними изотермы в различные моменты времени, Rd=-0.5 R=0.5, 1/w=1.5 и r=5.5.

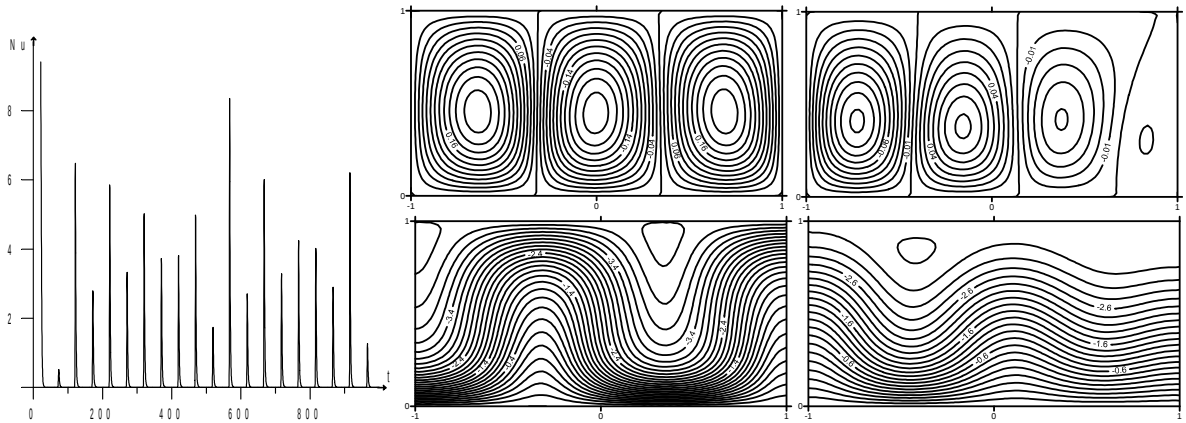


Рис 1.2.4 Зависимость усредненного числа Нуссельта от времени, справа показаны линии тока и ними изотермы в различные моменты времени, Rd=-0.5 R=0.5, 1/w=7.9 , r=4.5

При постоянных граничных условиях в надкритической области монотонной неустойчивости, в зависимости от начальных условий устанавливаются по две пары разнонаправленных движений, причем одна пара (1,2) соответствует двух ячеистому движению, а вторая (3,4) – четырех ячеистому (рис.5).

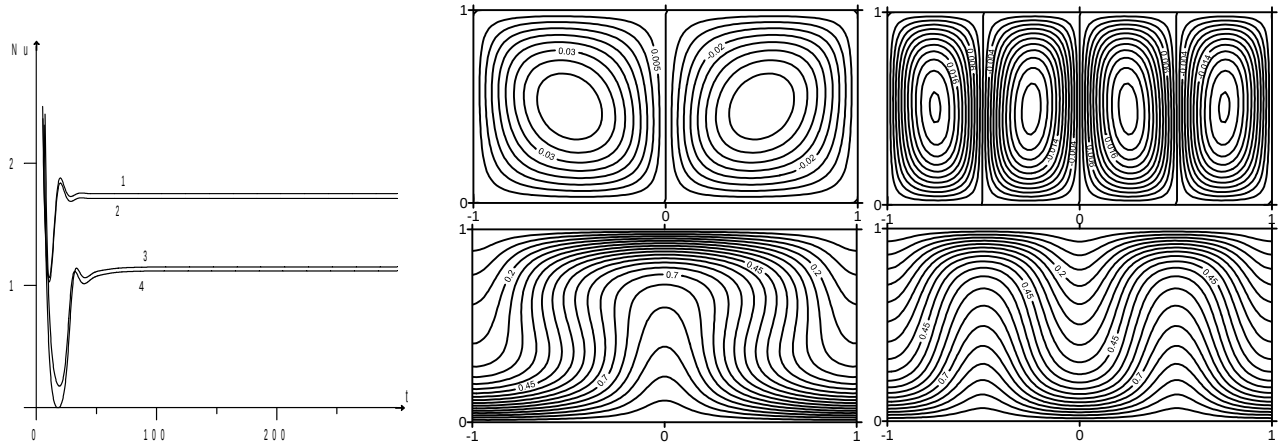


Рис. 1.2.5 Зависимость числа Нуссельта от времени при постоянных граничных условиях,*Rd=-0.5 Rt=3,* (1,2) – стационарное двух ячеистое движение, (3,4) - стационарное четырех ячеистое. Снизу линии тока и под ними изолинии, соответственно для линий (1) и (3). Для линий (2) и (4) течения противоположны соответственно (1) и (3).

Модуляция градиента температуры приводит к тому, что для любых частот при малых амплитудах модуляции появляются колебания вокруг стационарных решений (рис. 1.2.6а), число ячеек при этом соответствует их числу при постоянных граничных условиях (рис. 1.2.5). С возрастанием амплитуды модуляции возмущения исходных движений нарастают, линии (1-4) сливаясь переходят в одно установившееся двух ячеистое решение (рис. 1.2.6б). При дальнейшем увеличении амплитуды модуляции количество конвективных ячеек возрастает до четырех.

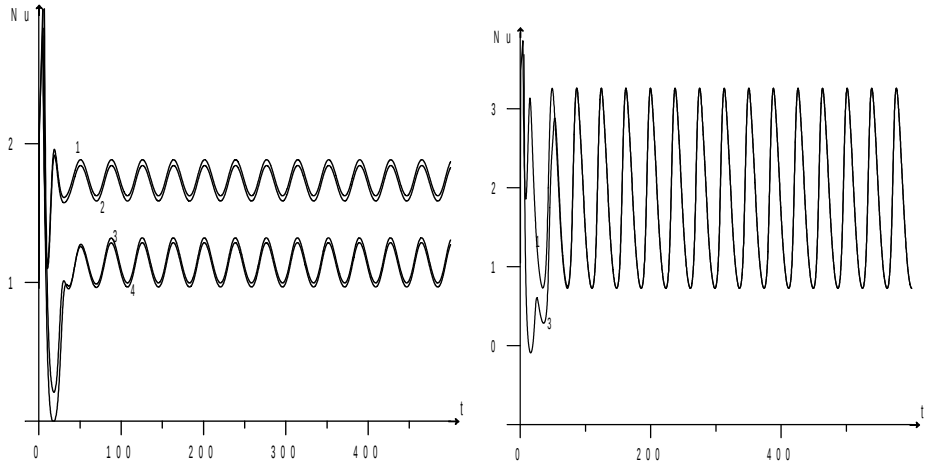


Рис. 1.2.6 Зависимость числа Нуссельта от времени для *Rd=-0.5 Rt=3,* при частоте модуляции а) 1/w=1 и амплитуде r=0.1; б) 1/w=1 и амплитуде r=1.

В области колебательной неустойчивости, при R<0 (подогрев сверху) возникает двух ячеистая концентрационная конвекция (стационарный или колебательный режимы) при тепловом потоке направленном вниз (число Нуссельта отрицательно). Модуляция градиента температуры с малой амплитудой (r=0.1,w=1) практически не изменяет зависимость числа Нуссельта от времени. При амплитудах модуляции порядка r=1 число Нуссельта периодически меняет знак, при этом сохраняется двух ячеистое движение (рис. 1.2.7). В случае достаточно больших амплитуд модуляции с течением времени изменяется число конвективных ячеек и происходит инверсия движений (рис. 1.2.8). Для различных начальных условий, колебания числа Нуссельта во времени смещаются по фазе и движение может быть как двух- так и четырех ячеистым. Для малых частот модуляции (w=0.1), требуется большая амплитуда модуляции, чтобы возник тепловой поток, направленный вверх.

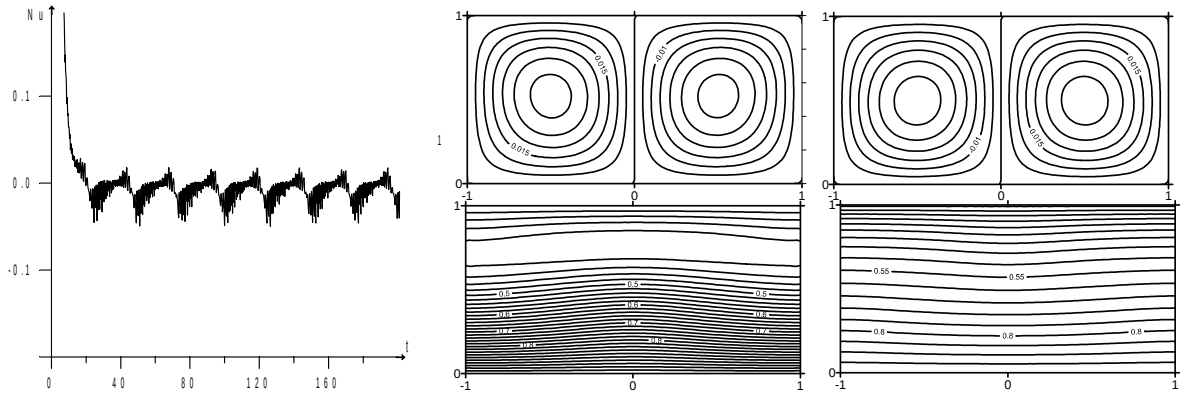


Рис 1.2.7. Зависимость числа Нуссельта от времени для *Rd=1.5 Rt=-2*, при частоте модуляции 1/w=1 и амплитуде r=1 (справа - функции тока и под ними изотермы в различные моменты времени)

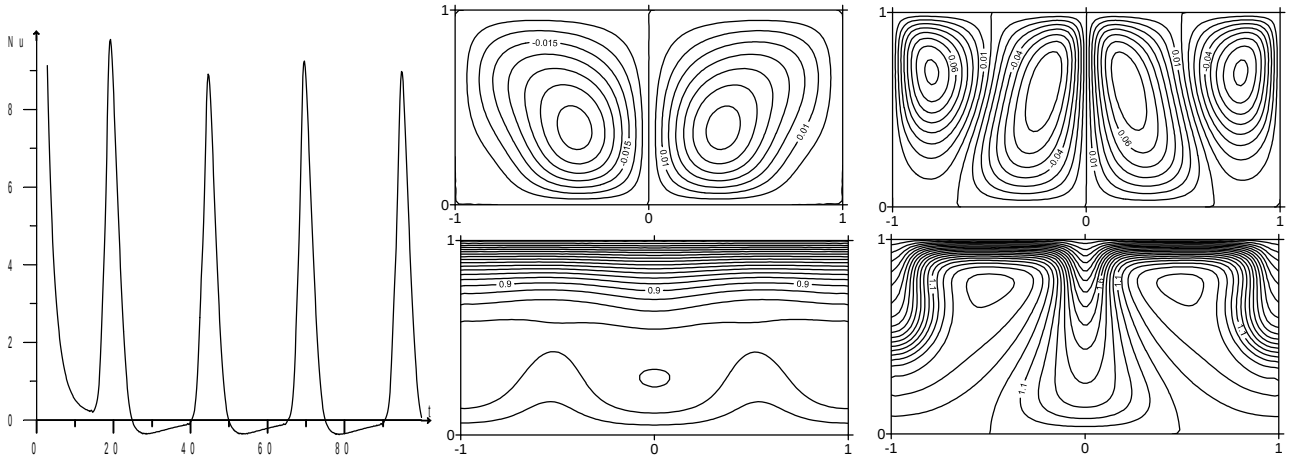


Рис. 1.2.8. Зависимость числа Нуссельта от времени для *Rd=1.5 Rt=-2*, при частоте модуляции 1/w=1 , r=5. (справа - функции тока и под ними изотермы в различные моменты времени)

Включение в модель конвекции бинарной смеси уравнения неравновесной адсорбции и сравнение с ранее полученными результатами позволило оценить влияние параметров равновесной адсорбции и кинетических коэффициентов неравновесной адсорбции на критерий

возникновения конвекции. Получено, что в области колебательных возмущений, где происходит конкуренция теплового и гравитационного градиентов, учет равновесной адсорбции может приводить как к стабилизации равновесия, так и играть дестабилизирующую роль в зависимости от значений параметров процесса адсорбции (масса в адсорбированном состоянии уменьшается с ростом температуры и увеличивается с ростом концентрации компонента в смеси). При этом если на нижней (верхней) границе рассматриваемого слоя смесь более горячая и обогащена тяжелым компонентом, то изотермическая составляющая адсорбции играет дестабилизирующую (стабилизирующую) роль, а составляющая, связанная с градиентом температуры вызывает стабилизацию (дестабилизацию), что приводит к конкурирующему эффекту. В общем случае критерий устойчивости в области колебательных возмущений зависит от величин кинетических коэффициентов неравновесной адсорбции. Численное решение полных дифференциальных уравнений при различных параметрах равновесной и неравновесной адсорбции показало, что в этом случае, как и в случае отсутствия адсорбции, линейная теория дает границу лишь условной устойчивости (устойчиво относительно бесконечно малых возмущений, и не устойчиво относительно конечных). То есть ниже границы устойчивости в зависимости от начальных условий кроме затухающих возмущений имеются также стационарные двух ячеистые течения, различающиеся направлением движения, и установившиеся колебательные течения.

1.3. Изучение формирования техногенной геотермальной аномалии, оценка выброса тепла в атмосферу, в поверхностные и грунтовые воды.

Произведены расчёты по трём ранее приведённым моделям профильного разреза, содержащего: 1)одиночную добывающую геотермальную скважину и водонасыщенный пласт; 2) добывающую геотермальную скважину, водонасыщенный пласт и грунтовые воды; 3) добывающую геотермальную скважину, водонасыщенный пласт и открытый малый водоём, находящийся в приповерхностной зоне кровли пласта на некотором расстоянии R от скважины. Для всех трёх задач предполагается, что 1) температура водонасыщенного горизонтального пласта постоянна и равна $T_{пл}$; 2) температура по стволу скважины с начального момента времени постоянна и равна пластовой. Для третьей задачи предполагается , что малый водоём, типа испарительного бассейна, имеет площадь 20 м^2 и находится на открытой, ровной местности. Приведём постановку последней задачи, где для кровли эксплуатационного пласта и водоёма пишется два уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} = a_v^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \qquad (1.3.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_c^2\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad ,$$

(1.3.2)

где a_v – температуропроводность воды, a_c - температуропроводность глинистой кровли.

Начальные и граничные условия для уравнений теплопроводности можно записать в следующем виде:

1) $T(x,y,t)/_{t=0} = T_0(y)$; (1.3.3)

Для всей области:

2) $T(x,y,t)/_{y=H} = T_{пл}$, $0 \le x \le L$, $y=H$ (1.3.4)

3) $T(x,y,t)/_{y=-h} = T_в(t)$, $0 \le x \le L$, $y=-h$ (1.3.5)

4) $T(x,y,t)/_{x=0} = T_{пл}$, $x=0$, $0 \le y \le H$ (1.3.6)

5) $\partial T/\partial x /_{x=L} = 0$, $x=L$, $0 \le y \le H$ (1.3.7)

Если обозначить через L_2 – длину, H_w – глубину водоёма, то для границ водоёма:

6) $a_w \frac{\partial T}{\partial y} ¿_{y=0} = a_v \frac{\partial T}{\partial y} ¿_{y=0}$, $L_1+1 \le x \le L_1+L_2-1$, $y=0$ (1.3.8)

$a_w \frac{\partial T}{\partial y} ¿_{y=Hw} = a_c \frac{\partial T}{\partial y} ¿_{y=Hw}$, $L_1+1 \le x \le L_1+L_2-1$, $y=H_w$ (1.3.9)

8) $a_c \frac{\partial T}{\partial x} ¿_{x=L1} = a_w \frac{\partial T}{\partial x} ¿_{x=L1}$, $x=L_1$, $1 \le y \le H_w-1$ (1.3.10)

9) $a_w \frac{\partial T}{\partial x} ¿_{x=L1+L2} = a_c \frac{\partial T}{\partial x} ¿_{x=L1+L2}$, $x=L_1+L_2$, $1 \le y \le H_w-1$ (1.3.11)

Зная естественный годовой ход среднесуточных температур воздуха $T_в(t)$, поверхности и почвы на глубинах 0,05м; 0,2м; 0,4м; 0,8м; 1,2м; 1,6м, в качестве начального температурного поля возьмём температурное поле, фиксируемое на момент начала расчёта, предполагая, что с глубины 1,6м, где температура фактическая, до глубины H, где температура постоянная (равная $T_{пл}$), температура распределяется по линейному закону. Численное решение поставленной задачи (1.3.1)-(1.3.11) проводится по явной схеме на неравномерной сетке, аппроксимация уравнений для внутренних точек областей с определенным шагом по Y будет выглядеть следующим образом:

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^{k} + a_l \Delta t\left[\frac{T_{i+1,j}^{k} - 2T_{i,j}^{k} + T_{i-1,j}^{k}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k} - 2T_{i,j}^{k} + T_{i,j-1}^{k}}{\Delta y^2}\right] \quad ,$$

где для глинистой кровли $a_l=a_c$, для воды $a_l=a_w$.

Аппроксимация на границах двух областей с разными шагами по Y (при переходе от Δy_n к Δy_{n+1}) запишется в виде:

$$T_{i,j}^{k+1}=T_{i,j}^{k}+a\Delta t\left[\frac{T_{i+1,j}^{k}-2T_{i,j}^{k}+T_{i-1,j}^{k}}{\Delta x^2}+\frac{2T_{i,j-1}^{k}}{\Delta y_n\left(\Delta y_n+\Delta y_{n+1}\right)}-\frac{2T_{i,j}^{k}}{\Delta y_n.\Delta y_{n+1}}+\frac{2T_{i,j+1}^{k}}{\left(\Delta y_n+\Delta y_{n+1}\right)\Delta y_{n+1}}\right]$$

Приведём пример аппроксимации для нижней границы водоёма (1.3.9):

$$T_{i,j}^{k+1}=\left(\frac{a_c}{a_w+a_c}\right)T_{i,j+1}^{k+1}+\left(\frac{a_w}{a_w+a_c}\right)T_{i,j-1}^{k+1}$$

и для одной из угловых точек водоёма (L_1,0) :

$$T_{i,j}^{k+1}=T_{i,j}^{k}+\Delta t\left[a_w\frac{T_{i+1,j}^{k}-T_{i,j}^{k}}{\Delta x^2}-a_c\frac{T_{i,j}^{k}-T_{i-1,j}^{k}}{\Delta x^2}+a_c\frac{T_{i,j+1}^{k}-T_{i,j}^{k}}{\Delta y_1^2}-a_v\frac{T_{i,j}^{k}-T_{i,j-1}^{k}}{\Delta y^2}\right]$$

В первой постановке задача не содержит уравнения 1.3.2 и соответственно изменены начальные и граничные условия. Во второй задаче уравнение 1.3.2 описывает теплоперенос в пласте, содержащем грунтовые воды, находящиеся на глубине 2 метра. Расчёты велись для глубины водоносного горизонта H =1000м, пластовой температуры $T_{пл.}$=150°C и глубины водоёма 2 метра. R – расстояние водоёма от центра скважины принимает значения 5м,10м и 20м.

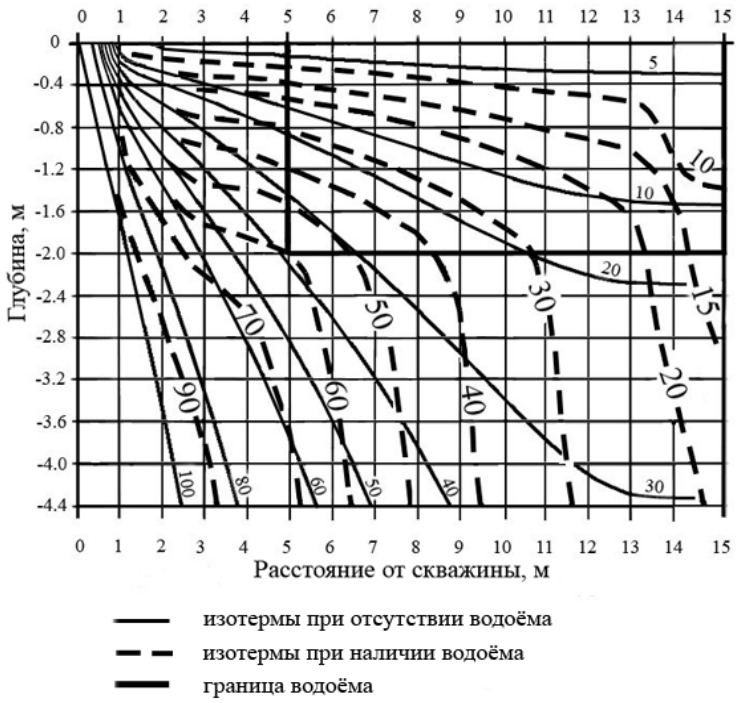


Рис.1.3.1. Температурное поле через 1год эксплуатации геотермальной скважины

По результатам численных расчётов задач 1 и 3 построены карты изотерм, одна из которых приведена на рис.1.3.1: на профильное температурное поле эксплуатирующейся в течение одного года одиночной геотермальной скважины наложено изображение температурного поля прискважинной зоны, содержащей водоём на расстоянии 5 метров от центра скважины. На рис. 1.3.1 можно видеть, что наличие водоёма уже через год меняет картину изотерм: они круто

разворачиваются в сторону водоёма, тем самым увеличивая значения температур в деятельном слое почвы в области между скважиной и водоёмом, а также в самом водоёме.

Рассмотрим как изменяется перепад температур от поверхности почвы к воздуху на расстоянии одного метра от скважины через год эксплуатации. На рис.1.3.2а изображён естественный перепад температур, характерный для января месяца: тепловой поток разнонаправлен, баланс же почти нулевой, т.е. в одни дни месяца средняя температура поверхности почвы выше температуры воздуха, в другие тепловой поток направлен к поверхности. На рис.1.3.2б тепловой поток направлен только от поверхности почвы в воздушное пространство. Рис. 1.3.3а и рис. 1.3.3б показывают изменение теплового потока из глубины 0,2м к поверхности: если в ненарушенных эксплуатацией условиях температурный тренд указывает на незначительноё превышение баланса в сторону из глубины - к поверхности, то через год наблюдается значительное повышение перепада температур из глубины - к поверхности, достигающее 22°С, причём, как показывают расчёты, дальнейшего повышения не происходит и тепловой поток стабилизируется.

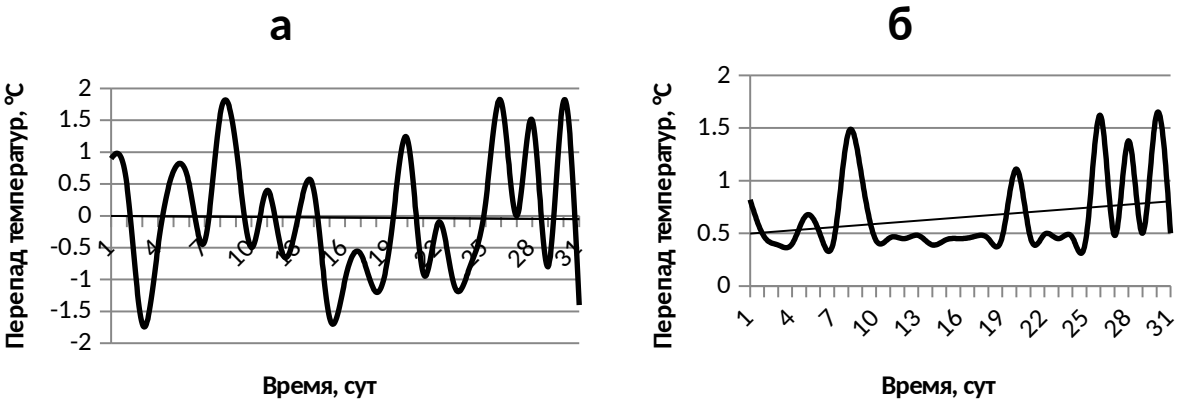


Рис.1.3.2. Перепад температур почва – воздух в январе при R=1:
а) начальный; б) через 1год эксплуатации геотермальной скважины

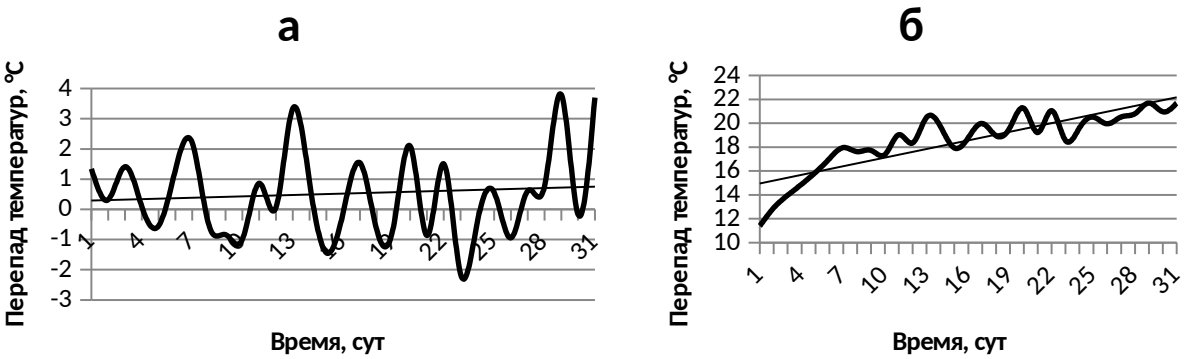


Рис.1.3.3. Перепад температур -0,2м - поверхность в январе при R=1:

а) начальный; б) через 1год эксплуатации геотермальной скважины

На рис.1.3.2а и рис. 1.3.2б изображёны естественный перепад температур почва - воздух, характерный для середины лета и перепад через 1 год. Незначительное понижение теплового потока можно объяснить тем, что температура почвы постепенно возрастает от нагрева из глубины, а температура воздуха не изменяется.

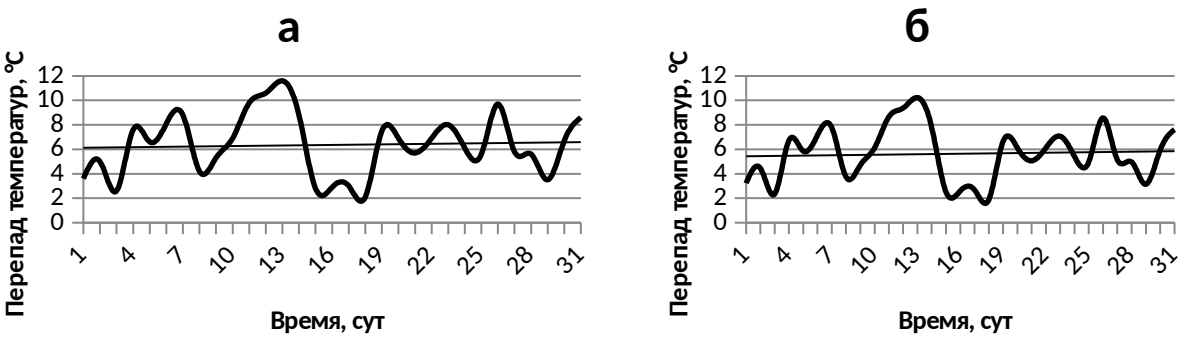


Рис.1.3.2. Перепад температур почва – воздух в июле при R=1:

а) начальный; б) через 1год эксплуатации геотермальной скважины

Летом естественный суммарный тепловой поток из глубины к поверхности почвы примерно равен обратному- от поверхности вглубь, через год же, вследствие сильного разогрева почвы на глубине 0,2м направление теплового потока устанавливается: только из глубины к поверхности почвы (рис.1.3.3а и рис.1.3.3.б).

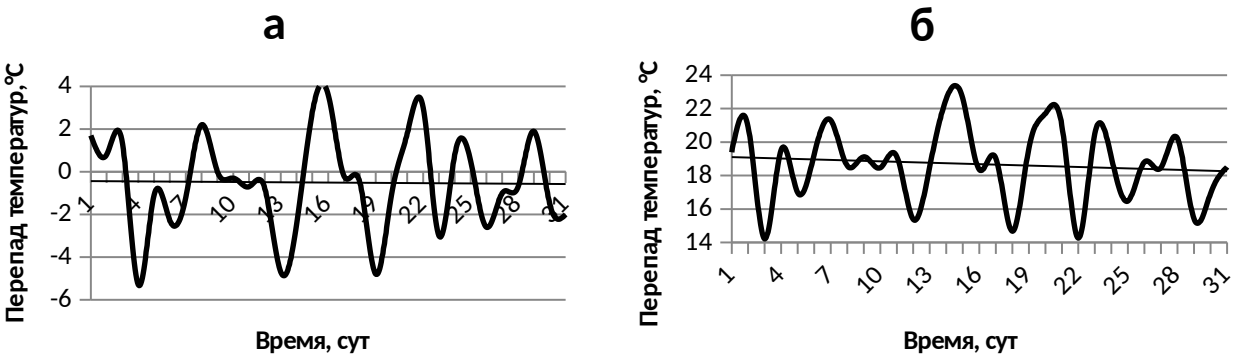


Рис.1.3.3. Перепад температур -0,2м - поверхность в июле при R=1:

а) начальный; б) через 1год эксплуатации геотермальной скважины

В годовом разрезе картина изменения тепловых потоков к поверхности почвы выглядит следующим образом (рис.1.3.4 и рис.1.3.5)

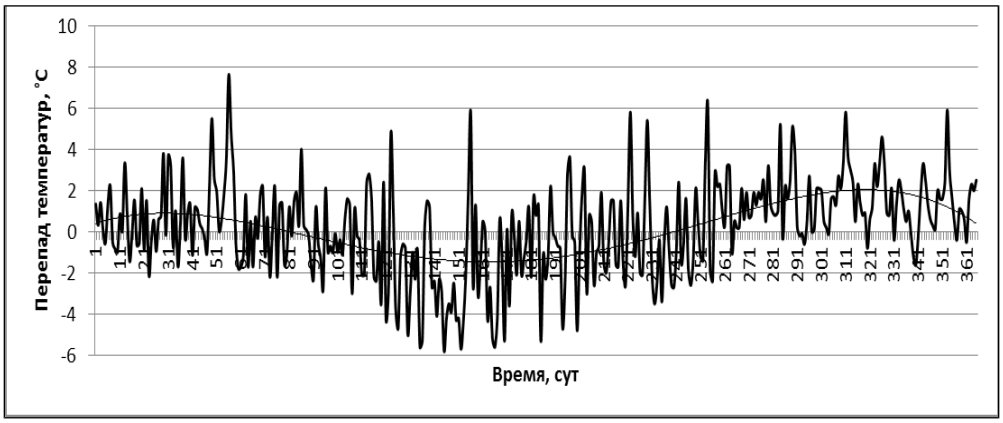


Рис. 1.3.4. Начальный перепад температур -0,2м – поверхность почвы для R=1

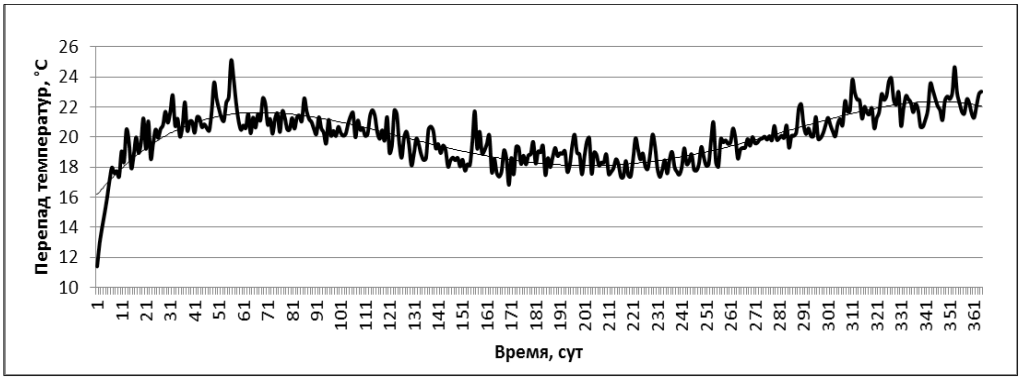


Рис. 1.3.5. Перепад температур -0,2м – поверхность почвы через 1 год эксплуатации геотермальной скважины для R=1

Если рассматривать перепады среднемесячных температур -0,2м – воздух, то они меняются в интервале от 19 до 22°С (рис.1.3.6). Среднегодовой перепад температур за год увеличился на расстоянии 1 метра от добывающей скважины в 6.6 раз.

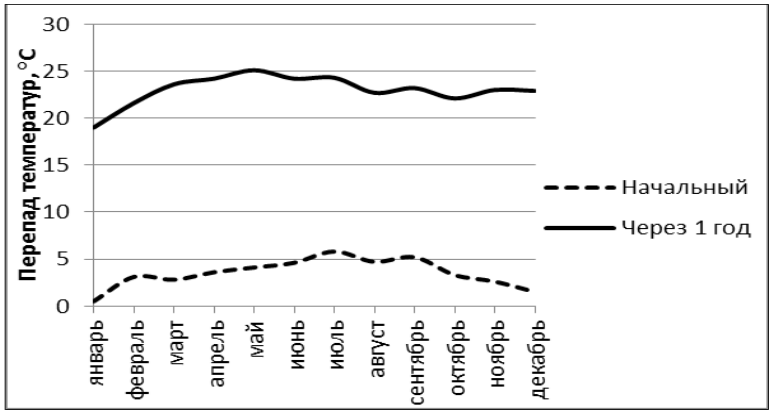


Рис. 1.3.4. Перепад температур -0,2м – воздух для R=1

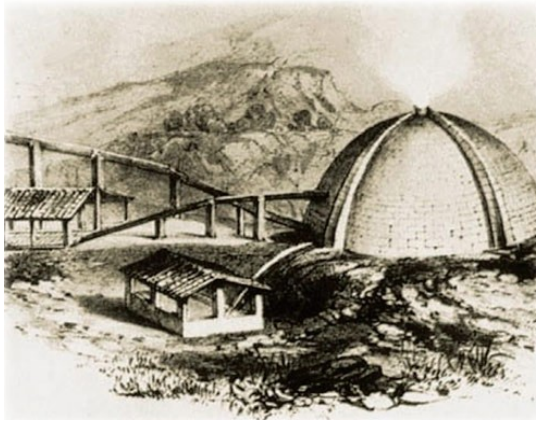
Результаты расчётов показывают значительное возрастание глубинных тепловых потоков к поверхности почвы вокруг скважины (радиус теплового влияния на поверхности не превышает восьми метров, но увеличивается с глубиной).

Таким образом, через год эксплуатации скважины площадь вокруг неё, размером около 200 квадратных метров, становится искусственным источником теплового поля и теплового

загрязнения почвы, грунтовых и поверхностных вод, находящихся вблизи скважины. Последствия теплового загрязнения почвы и водоёмов многочисленны: от деградации ландшафтов до исчезновения видов, они наносят огромный вред природным экосистемам и способствуют изменению среды обитания человека.

2. Неизотермическая фильтрация

Из истории освоения. Использование геотермальной энергии имеет весьма давнюю историю. Один из первых известных примеров — Италия, местечко в провинции Тоскана, ныне называемое Лардерелло, где ещё в начале XIX века местные горячие термальные воды, изливавшиеся естественным путём или добываемые из неглубоких скважин, использовались в энергетических целях. Вода из подземных источников, богатая бором, употреблялась здесь для получения борной кислоты. Первоначально эту кислоту получали методом выпаривания, а в качестве топлива брали обычные дрова из ближайших лесов. В 1827 году Франческо Лардерел создал систему, работающую на тепле самих вод. Одновременно энергию природного водяного пара начали использовать для работы буровых установок, а в начале XX века — и для отопления местных домов и теплиц. Там же, в Лардерелло, в 1904 году термальный водяной пар стал энергетическим источником для получения электричества **[15]**. Примеру Италии в конце XIX—начале XX века последовали другие страны. Например, в 1892 году термальные воды впервые были использованы для местного отопления в США (Бойсе, штат Айдахо), в 1919-м — в Японии, в 1928-м — в Исландии.



Сбор термальной борной воды в Лардерелло

Первые электростанции, работающие на гидротермальной энергии, появилась в Калифорнии (США) в начале 1930-х годов, в Новой Зеландии в 1958 году, в Мексике в 1959 году. Вначале

были освоены электростанции на сухом пару. Пар, поступающий из скважины, пропускается непосредственно через турбину, которая вращает генератор. Одна из самых крупных геотермальных электростанций в мире мощностью 1400 МВт, расположенная в районе Гейзеры в Северной Калифорнии, также использует сухой пар. Мощность одного генератора – 55 МВт [15]. Одна скважина обеспечивает мощность в среднем 7 МВт. Лопатки турбин изготовлены из стали с содержанием хрома 13%. Температура сухого пара около 240°С, пластовое давление 3,4 МПа. Выработка электроэнергии требует более высокой температуры, чем для отопления, выше 180°С.

Экологически чистая энергетика? Геотермальная энергетика считается экологически чистой, что в целом справедливо. Прежде всего, в ней используется возобновляемый и практически неисчерпаемый ресурс. Геотермальная энергетика не требует больших площадей, в отличие от крупных ГЭС, и не загрязняет атмосферу, в отличие от углеводородной энергетики. В среднем ГеоЭС занимает 400 м^2 в пересчёте на 1 ГВт вырабатываемой электроэнергии. Тот же показатель для угольной ТЭС, к примеру, составляет 3600 м^2. К экологическим преимуществам ГеоЭС относят также низкое водопотребление — 20 литров пресной воды на 1 кВт, тогда как для ТЭС и АЭС требуется около 1000 литров **[16].**

Но отрицательные побочные эффекты всё же имеются. Среди них, прежде всего шум, тепловое загрязнение атмосферы и химическое загрязнение рек и почвы. Главный источник химического загрязнения среды термальная вода с высокой температурой и минерализацией, нередко содержащая токсичные соединения. ГеоЭС требует решения проблема утилизации отработанной воды и предотвращения выбросов опасных веществ. Термальная вода и также её пар зачастую содержат углекислый газ, сульфид серы, аммиак, метан, поваренную соль, бор, мышьяк, ртуть, фенолы. Кроме того, агрессивная химическая среда может вызывать коррозионные разрушения скважин и других конструкций станции. В то же время выбросы загрязняющих веществ на ГеоЭС в среднем ниже, чем на ТЭС. Выбросы углекислого газа на каждый киловатт-час выработанной электроэнергии составляют до 380 г на ГеоЭС, 1042 г — на угольных ТЭС и 453 г — на газовых ТЭС. Вопрос утилизации отработанной воды решается. При невысокой минерализации она может быть сброшена в поверхностные воды. Можно организовать её нагнетание обратно **в тот же** водоносный пласт в целях поддержания пластового давления, что и преимущественно применяется в настоящее время.

Добыча термальной воды из водоносных пластов (как и артезианской воды) может вызывать просадку и подвижки грунта, другие деформации геологических слоёв, микро землетрясения. Вероятность таких явлений, как правило, ничтожна, хотя отдельные случаи зафиксированы (например, на нефтепромыслах Баку замерена была просадка 6 см).

Следует подчеркнуть, что большая часть ГеоЭС расположена на сравнительно малонаселённых территориях, где экологические требования бывают менее жёсткими, чем в городских условиях. Кроме того, на данный момент количество ГеоЭС и их мощности сравнительно малы. При более масштабном развитии геотермальной энергетики экологические риски могут возрасти и перерасти по значимости в основное требование.

Почём энергия Земли? Инвестиционные затраты на строительство геотермальных систем варьируют в широком диапазоне — от 200 до 5000 долларов на 1 кВт мощности, то есть самые дешёвые варианты сопоставимы со стоимостью строительства ТЭС. Зависят они и от условий залегания термальных вод, их состава, температуры, выбора конструкции системы. Бурение на большую глубину, создание замкнутой системы с двумя скважинами, необходимость очистки воды могут многократно увеличивать стоимость. Пока геотермальная энергетика зависит во многом от везения. Инвестиции в создание циркуляционной системы оцениваются до $4000 на 1 кВт мощности, что превышает затраты на строительство атомной электростанции.

Очевидное экономическое преимущество ГеоЭС — бесплатный энергоноситель. Для сравнения — в структуре затрат работающей ТЭС или АЭС на топливо приходится 50–80% или даже больше, в зависимости от текущих цен на энергоносители. Отсюда ещё одно преимущество геотермальной системы: расходы при эксплуатации более стабильны и предсказуемы, поскольку не зависят от внешней конъюнктуры цен на энергоносители. Эксплуатационные затраты ГеоЭС оцениваются до 3 руб. на 1 кВт·ч произведённой мощности. В среднем себестоимость 1 кВт·ч геотермальной энергии сопоставима с таковой для ТЭС и на порядок выше себестоимости выработки электроэнергии на ГЭС.

Показатели экономической эффективности работы ГеоЭС зависят, и от того, возможно ли комбинированное использование ресурса. Так, химические элементы и соединения, извлечённые из термальной воды, могут дать дополнительный доход. В Лардерелло первичным там было именно извлечение бора, а использование геотермальной энергии первоначально носило побочный характер.

Российские геотермальные электростанции.

Паужетская ГеоЭС

Целью строительства в 1966 году Паужетской геотермальной электростанции, первой в России, стала необходимость обеспечения электроэнергией ряда жилых поселков и предприятий по переработке рыбы. Расположена станция на западном побережье Камчатки, вблизи села Паужетка, рядом с вулканом Камбальный. Установленная мощность на момент пуска электростанции в 1966 году составляла 5 МВт, в 2011 году – 12 МВт. В настоящее время реализуется введение бинарного энергоблока. Реализация данного проекта не только выведет

электростанцию на новые мощности – до 17 МВт, но и решит экологические проблемы, связанные со сбросом отработанного термальной воды на грунт. На Паужетской ГеоЭС используется только отсепарированный геотермальный пар из пароводяной смеси, получаемой из геотермальных скважин. Большое количество геотермальной воды (около 80% общего расхода ПВС) с температурой 120°С сбрасывается в нерестовую реку Озерная, что приводит не только к потерям теплового потенциала геотермального теплоносителя, но и существенно ухудшает экологическое состояние реки. Расход сбрасываемой воды на Паужетской ГеоЭС достаточен для энергоустановки мощностью 2 МВт, стоимость оборудования 1000$/кВт. Температура сбрасываемой воды снизится до 55°С, тем самым значительно уменьшится тепловое загрязнение реки.

Верхне-Мутновская опытно-промышленная ГеоЭС

Электростанция расположена на юго-востоке Камчатского полуострова на отметке 780 метров над уровнем моря на склонах вулкана Мутновский. Станция была введена в эксплуатацию в 1999-м году. Она имеет три энергоблока по 4 МВт, то есть ее проектная мощность составляет 12 МВт.

Мутновская ГеоЭС.

Станция использует паро-термальные источники вулкана Мутновский и расположена на юго-востоке полуострова, в 130 км от Петропавловска на Камчатке. Она введена в эксплуатацию в апреле 2003 года. Установленная мощность – 50 МВт, планируемая 80 МВт. Обслуживание данной станции полностью автоматизировано. Благодаря использованию геотермальных электростанций на Камчатке значительно ослаблена зависимость этого региона от привозного топлива. Примерно 30% затрат энергии Камчатки покрываются именно геотермальными источниками электрической энергии.

Менделéевская ГеоТЭС — располагается на острове Кунашир около вулкана Менделеева. Установленная электрическая мощность станции составляет 3,6 МВт, станция осуществляла теплоснабжение и электроснабжение Южно-Курильска. Эксплуатирует ЗАО «Энергия Южно-Курильска». В настоящее время на она ремонте.

Строить начали 1993 году. Ввели в эксплуатацию первый комплекс мощности 1,8 МВт (модуль «Туман-2А») в 2002 году. Линии электропередачи ввели в 2003 году. ГеоЭС ввели на полную проектную мощность 3,6 МВт в 2006 году, за счет пуска второго модуля «Туман-2А». 2007 год — ввод III очереди теплоснабжения, обеспечившей потребности в тепле посёлка Южно-Курильска. На строительство станции потребовалось 14 лет.

Поддержка социально-экономического развития Курильских островов осуществлялась ранее Федеральной целевой программой «Социально-экономическое развитие Курильских островов Сахалинской области (1994—2005 годы)», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 17

декабря 2001 г. N 872. В ноябре 2011 года начались работы по модернизации комплекса и увеличению мощности до 7,4 МВт.

Менделеевская ГеоЭС стала проблемным энергетическим объектом. Вышла из строя одна из четырех скважин. Потерю её мощности в 350 киловатт компенсировалось с помощью дизелей и подключения резервного топлива. Буксует вроде бы начатая масштабная модернизация ГеоЭС. Необходимые государственные субсидии в размере 500 млн руб. определены в 2017 году областным руководством. Использование термальной энергии для электроснабжения населенных пунктов Кунашира позволило несколько лет снизить зависимость производственных, жилых и иных объектов от завоза морским путем угля и дизельного топлива, обеспечивало население недорогой электрической энергией.

Океанская ГеоТЭС.

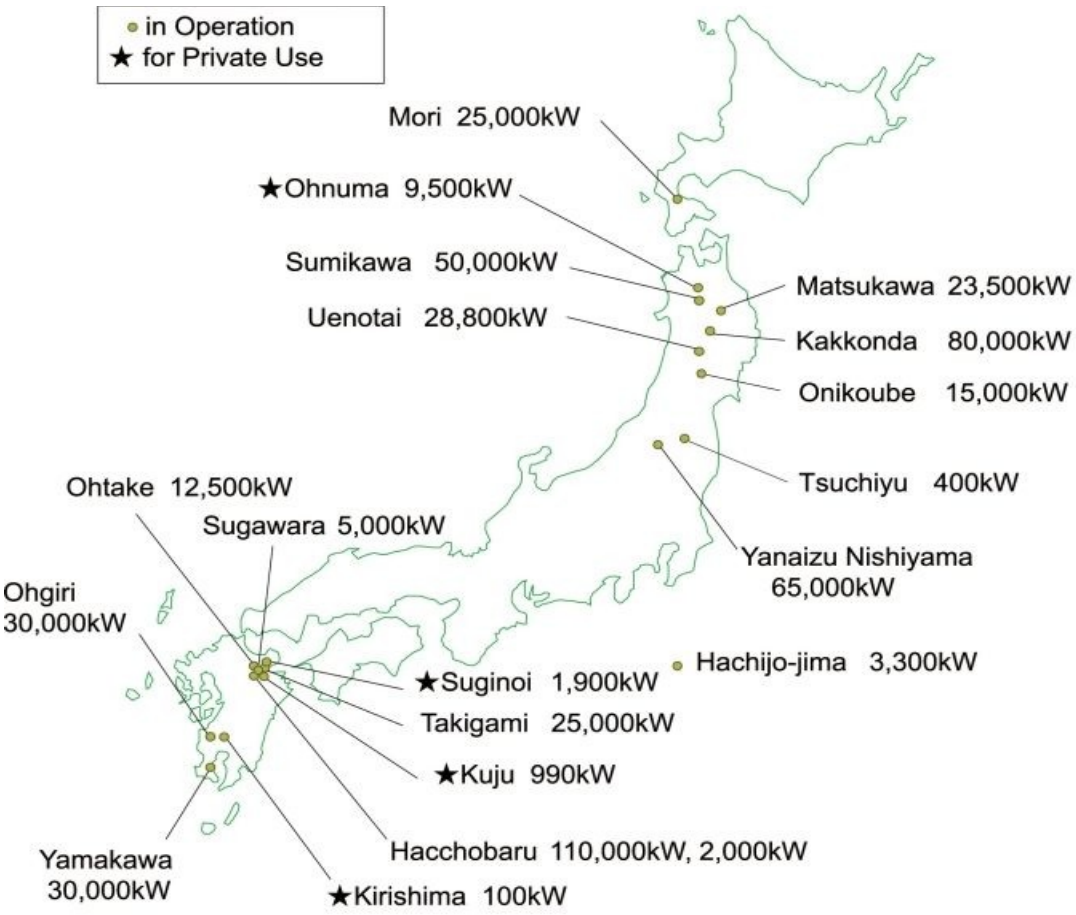
На острове Итуруп Курильской гряды построена и введена в действие геотермальная электростанция «Океанская». Начало строительства — 1993 год, ввод — 2006 год, мощность 2,5 МВт. Строили 13 лет. Сейчас не работает. Сахалинцев не на шутку взбудоражила новость о прекращении работы геотермальной электростанции "Океанская" на Итурупе. Построенная в 2007 году, ГеоЭС вдохнула жизнь в курильский остров. С ней связывали большие надежды. Работающие на привозном топливе дизельные генераторы раньше были на Итурупе единственным источником электроэнергии. "Океанская" же позволила получать ее из природных подземных трещинных коллекторов - станцию построили на месторождении горячей пароводяной смеси. Введение объекта в эксплуатацию экономила в год около 4000 тонн дизельного топлива, себестоимость электроэнергии снизилась в три раза, повысилось качество и надежность электроснабжения. Станцию с двумя модулями "Туман-2А" возвели у живописного подножия вулкана Баранского. В состав комплекса также вошли подстанции, кабельная линия до Курильска и подъездная автодорога [22].

Строили "Океанскую" дольше, чем она просуществовала. И, хотя турбины остановились еще в 2014-м, тогда мало кто обратил внимание на этот факт. К тому же в марте 2015 года власти региона официально заявили, что "проект модернизации ГеоЭС "Океанская" подготовлен, прошел государственную экспертизу". С тех пор о модернизации больше никто не упоминал, а вот недавнее известие, что операторам станции предложили "переквалифицироваться" в сторожей, вызвало серьезный общественный резонанс. В будущем на том же месте возведут новую станцию. «Мы сократили должности, которые там не нужны. Ну не работает станция, зачем ей начальник? Сейчас на объекте - четыре человека, они выполняют функции сторожей и откидывают снег», - рассказал "РГ" директор. «У нас нет доходов, чтобы содержать специалистов».

Так что же произошло с "Океанской"? Как объяснил начальник отдела ЖКХ администрации Курильского городского округа, «станция работала нестабильно с самого начала, причиной постоянных сбоев был некачественный пар. Возможно, у специалистов не было опыта эксплуатации данного типа оборудования. Там все сгнило. На лопатках ротора накопилась сера, да и не только она, фактически вся таблица Менделеева», подтвердили корреспонденту "РГ". Авария, "добившая" Океанскую ГеоЭС, случилась 27 февраля 2013 года. "В результате скачка напряжения вышел из строя один из двух турбогенераторов "Туман-2". Электроснабжение было переключено на четыре дизельные электростанции", - сообщала тогда прокуратура. По этому факту было возбуждено уголовное дело о повреждении имущества по неосторожности.

Глава администрации Курильского городского округа считает, что все возможное делалось в этих сложных условиях для поддержания ресурсов электростанции. Турбины "Туманы" - это морально и физически устаревшее оборудование, и не так просто было его использовать на Курилах, когда поблизости нет серьезной ремонтной базы, крупных машиностроительных заводов. Тем не менее, это делали в течение семи лет, - говорит он. Благодаря "Океанской" получен опыт в области геотермальной энергетики, который пригодится при строительстве новой станции бинарного типа. Ее будут возводить на том же месте, и поэтому не потребуется начинать все с нуля. Есть дорога к площадке, кабельная линия. Новым проектом предусмотрено улучшение инфраструктуры. В соседней с Курилами Японии термальная энергия используется более успешно [23].

Предложения предпринимателя (*Цумамист*) из Японии. Источник: Геоэнергетика.



Геотермальные станции в Японии, Источник: jogmec.go.jp

Предприниматель пишет: «... из-за технических неполадок Океанская ГеоЭС на острове Итуруп и Менделеевская ГеоЭС на острове Кунашир не работают. В настоящий момент японское и российское правительства намерены обсудить вопросы по совместной экономической деятельности на южных Курильских островах. В этой связи хочу предложить ... Первая фаза. Ремонт зданий Океанской ГеоЭС и Менделеевской ГеоЭС, демонтаж оборудования на Океанской ГеоЭС и ремонт скважин на Менделеевской ГеоЭС необходимо провести **вместе с японскими предприятиями**, поскольку компании, которые способны это сделать и выполнить сейчас, находятся на восточном Хоккайдо. Благодаря близости возможно легко и быстро мобилизовать буровое оборудование на остров Кунашир. Цель первой фазы – быстрое восстановление первоначальной мощности Океанской ГеоЭС (2,5 МВт) и Менделеевской ГеоЭС (3.6 МВт) которые важны для местных жителей.

Вторая фаза. Для благоприятного развития экономических отношений между Россией и Японией на южных Курильских островах необходимы бесперебойные поставки электроэнергии. Для развития рыбопромышленности, строительства курортных санаториев и новых жилых районов, той мощности электроэнергии, что есть сейчас, не будет достаточно. Поэтому

необходимо строить новую ГеоЭС (мощность - около 30МВт) за короткий срок. Мне кажется, её лучше построить рядом с Океанской ГеоЭС или Менделеевской ГеоЭС, чтобы сократить расходы на геологоразведку. Я думаю, японская сторона будет согласна поддержать этот пункт в рамках развития совместной экономической деятельности между Россией и Японией. На этом этапе мы можем говорить о доходности новой ГеоЭС (мощность - около 30 МВт) как совместного предприятия обеих стран.

Третья фаза. Далее возможно строительство более мощных ГеоЭС (мощностью 80 МВт? 200 МВт?) не только на южных Курильских островах, но и на северных Курилах и на Камчатке. Необходимо использовать новый тип ГеоЭС «Flash steam power stations», большей мощности. Таким образом, появится возможность провести кабели, которые соединят между собой Камчатский полуостров, северные и южные Курильские острова, города Нэмуро и Кущиро (на Хоккайдо). Это не только обеспечит энергией острова, но и создаст благоприятную возможность для продажи энергии Японии. Думаю, можно назвать этот проект «Второй Энергетический Мост».

При выполнении проекта не должны забывать и об охране окружающей среды. У японских компаний есть богатый опыт в решении проблем выброса тяжелых металлов во время бурения скважин. Хочу заметить, что такие компании как Mitsubishi Heavy Industries, Toshiba и Fuji Electric занимают 60% мирового рынка в поставках турбин. Надеюсь, что этот проект будет способствовать развитию совместной экономической деятельности России и Японии на южных Курильских островах» [23,24]. Широкое сотрудничество России и Японии в области геотермальной энергетики могло бы помочь эффективному освоению этого вида энергии в районе Курил и Камчатки.

Планы NASA. Весьма рискованные и грандиозные проекты освоения энергии вулканических очагов магмы начаты в Австралии и Исландии. Агентство NASA в США предлагает начать освоение энергетических возможностей крупнейших «спящих» вулканов мира с целью продления их «сна» и добычи электричества.

К настоящему моменту в мире насчитывается 20 супервулканов, и извержение хотя бы одного из них может угрожать человечеству куда серьезнее, чем астероид, считают в агентстве NASA. Особое внимание специалисты NASA уделяют Йеллоустонскому вулкану, расположенному в штате Вайоминг. Размеры кратера вулкана составляют 55 км на 72 км. Его извержение может привести к «вулканической зиме» на Земном шаре. Предлагается «охлаждать вулкан», закачивая воду через скважины в очаги образования гейзеров для усиления их деятельности. Впоследствии с помощью образовавшегося пара планируется добывать электричество.

Если уровень давления достигнет критической точки, то значит, что извержение вулкана неизбежно. В NASA пришли к выводу о том, что извержение вулкана приведет к настоящей

ядерной зиме на Земле, разрушив большинство источников питания. Именно поэтому ученые NASA выдвинули рискованный проект, который поможет избежать извержения. Более интенсивный отбор тепла может отсрочить этот момент.

Полагают, что если извлечь достаточное количество тепла, то температура в зоне вулкана снизится, и вероятность его извержения станет меньше. Автор проекта считает, что необходимо снизить температуру, и один из возможных вариантов - увеличение объема воды в зоне вулкана. По мере того как она будет превращаться в пар, вода с паром будет уносить тепло в атмосферу. Экологи бьют тревогу, они против проекта в связи с глобальным потеплением. Общественность будет выступать против этого плана, и без того ощущается нехватка пресной воды.

В NASA выдвинули еще один план. Полагают, что возможно пробурить скважину глубиной 10 км внутрь вулкана и закачивать туда воду под давлением. Циркулирующая вода с паром будет выходить при температуре около 350°C, и, таким образом, день за днем выводить тепло из вулкана. Стоимость такого проекта составит около $3,46 млрд. Если пробурить такую скважину, то можно построить геотермальную электростанцию, которая будет генерировать электроэнергию стоимостью около $0,10 за кВт·час, то есть 6 рублей за кВт·час. Сейчас в Дагестане установленная плата 2 рубля за кВт·час. Он также считает, что необходимо стимулировать компании, чтобы те кампании использовали горячую воду, более чем обычно. Это позволит вернуть первоначальные вложения и генерировать дешёвое электричество в течение достаточно длительного времени – десятков тысяч лет. Помимо получения прибыли, это также поможет избежать извержения вулкана. Несомненно, бурение вглубь вулкана связано с множеством рисков. В частности, выражают опасения, не подтолкнет ли это к извержению самого вулкана, которого так опасаются в США. Вынашиваются планы для всех 20 крупных вулканов в мире. Они напоминают, что Йеллоустонский вулкан извергается каждые 600 тыс. лет и с момента последнего извержения прошло около 600 тыс. лет, поэтому нельзя сидеть, сложа руки [25]. Несомненно, бурение вглубь вулкана связано с множеством рисков. В частности, выражают опасения, не подтолкнет ли это к извержению самого вулкана, которого так опасаются в США.

Планы эти, на первый взгляд, кажутся фантастическими. Но эта та сказка, которая со временем, с развитием высокотемпературных технологий, обязана превратиться в быль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Сформулирована математическая модель небуссинесковской фильтрационной естественной конвекции бинарной смеси сжимаемых газов. На примере смеси двух совершенных

газов, исследовано влияние сильной сжимаемости и эффекта адиабатического охлаждения на критерий возникновения фильтрационной конвекции в бинарной смеси. Исследованы закономерности влияния небуссинесковских эффектов на нелинейную фильтрационную конвекцию в бинарной смеси газов.

- Исследовано влияние модуляции градиента температуры на формирующиеся конвективные движения бинарной смеси в пористой среде. Рассмотрено влияние параметров равновесной адсорбции и кинетических коэффициентов неравновесной адсорбции на критерий возникновения конвекции. Показано, что в общем случае критерий устойчивости в области колебательных возмущений зависит от величин кинетических коэффициентов неравновесной адсорбции.

- Рассмотрены экологические риски для окружающей среды от теплового загрязнения деятельного слоя почвы и поверхностных вод как последствия эксплуатации геотермальных скважин.

Произведена оценка возрастающего воздействия глубинных тепловых потоков на естественное температурное поле приповерхностной зоны и прослежена динамика формирования локальной температурной аномалии, приводящей к пагубному изменению среды обитания живых организмов.

- Успешность или неудача в эксплуатации ГеоЭС зависит, в первую очередь, от геологических факторов, и их изученности. Успешно работают ГеоЭС там, где есть сухой пар (долина гейзеров в США), или паро-термальные высокотемпературные залежи (Исландия, Филиппины, Индонезия). Для работы ГеоЭС на термальной воде пластовые температуры должны быть порядка выше 200°С. Горячие горные породы вблизи магматических очагов вулканов ещё не освоены, но они на повестке дня. Экономически пока ГеоЭС имеют перспективу лишь в тех отдельных регионах, где нет возможности доставки топлива и нет возможности строить гидростанции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Полежаев В.И. Методы моделирования конвективных, волновых процессов и теплообмена в околокритических средах (Обзор)// Изв. РАН. МЖГ. 2011. №1. С. 3-20.

2. Полежаев В.И. Моделирование конвективных, волновых процессов и теплообмена в около-сверхкритических средах (Обзор)// Изв. РАН. МЖГ. 2011. №2. С. 9-32.

3. Полежаев В.И., Соболева Е. Б.. Тепловая гравитационная конвекция околокритической жидкости в замкнутой области с боковым подогревом// Изв. РАН. МЖГ. 2001. №3. С 143-154

4. Jeffreys H. The stability of a compressible fluid heated from bellow// Proc. Cambr. Phil. Soc. 1930. V.26. №2. P. 170-172

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. 31-45.

6. Рамазанов М.М. // Конвекция совершенного газа в пористой среде между двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами большой длины. *Изв. РАН. МЖГ*. 2010. №2. С. 84-96.

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. 64-77.

8. Рамазанов М.М.// Исследование фильтрационной конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса при существенных перепадах температуры. *Изв. РАН. МЖГ.* 2013. № 4. С. 128-139.

9. Рамазанов М.М.// Условия отсутствия и возникновения фильтрационной конвекции в сжимаемом газе. ИФЖ. 2014. Т. 87. №3. С.524-530.

10. Бедриковецкий П.Г., Полонский Д.Г., Шапиро А.А. Анализ конвективной неустойчивости бинарной смеси в пористой среде// Изв. РАН. МЖГ. 1993. №1. С.110-119.

11. Поляк Б.Г. (1987) Различия вулканической активности в тектонически мобильных поясах. // «Соврем. тектон. активность Земли и сейсмичность», М.: Наука, 1987. С.206-217.

12. Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В. К оценке геоэнергетического эффекта новейшего вулканизма островных дуг // Геотектоника, 1979, № 1. С.36-47.

13. *Магомедов К.М.* Теоретические основы геотермии. М.: Наука, 2001. 277 с.

14. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.

15. Геотермальная энергия (ресурсы, использование, разработка). М.: Мир, 1975. 354 с.

16. *Дегтярев Кирилл.* Тепло Земли. Наука и жизнь, №9, с. 27-31. 2013 г.

17. Grindley G.W. The geology, structure and exploitation of the Wairakei Geothermal Field, Taupo, New Zealand N.Z. Geological Survey Bulletin n.s.75 (1965)

18. Cathles L.M., Erendi A.H. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event? 1997. Economic Geology. 92. 766-771

19. Silberman, M.L., Moll, E.J., Chapman, R.M., Patton, W.W., Jr., and Connor, C.L., 1979, Potassium-argon age of granitic and volcanic rocks from the Ruby, Medfra, and surrounding quadrangles, west-central Alaska, in Johnson, K.M., and Williams, J.R., eds., The United States Geological Survey in Alaska: Accomplishments during 1978: U.S. Geological Survey Circular 804-B, p. B863-B866

20. Hochstein M.P. Crustal heat transfer in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand): comparison with other volcanic arcs and explanatory heat source models // J. Vol. Geoth. Res. 1995. 68(1-3). P.117-151.

21. Lawless, J.V., White, P.J., Bogie, I., and Andrews, M.J.: Tectonic features of Sumatra and New Zealand in relation to active and fossil hydrothermal systems: A comparison. Proceedings of the PACRIM

’95 Congress, Publication Series—Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 9/95, (1995), 311–316
22. Прощай, “Океанская”. Российская Газета (https://rg.ru/2016/02/25/reg-f...)
23. JOGMEC (http://www.jogmec.go.jp/geothe...)
24. JGA (Japan Geothermal Association) Homepage, (http://www.chinetsukyokai.com/...), (http://www.chinetsukyokai.com/...).
25. (http://www.vestifinance.ru/articles/89823?utm_source=finam).