на правах рукописи

ВЕРЕИНА Ольга Борисовна

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КАМЧАТКА) ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 25.00.07 - Гидрогеология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в лаборатории тепломассопереноса Геологического института Российской Академии наук

Научный руководитель:

## доктор геолого-минералогических наук, профессор Алексей Владимирович Кирюхин

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук Валерий Аркадьевич Грабовников

доктор геолого-минералогических наук Сергей Витальевич Остапенко

Ведущая организация:
----------------------

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва

Защита диссертации состоится 18 марта 2010 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДМ 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: 117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ.

Отзывы на реферат просим направлять по адресу: 117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.121.01.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» февраля 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

О.Е. Вязкова

Внутреннее тепло Земли, так ярко проявляющееся в вулканической и гидротермальной деятельности, является не только движущей силой геологических процессов, но и неисчерпаемым источником экологически чистой энергии, которая находит разнообразное практическое применение. Одно из важнейших направлений освоения глубинного тепла – его использование для создания геотермальных электростанций (ГеоЭС), что особенно актуально в областях современного вулканизма. Для строительства ГеоЭС необходимо всестороннее углубленное изучение гидрогеотермальных резервуаров и создание их корректных математических моделей, которые позволяют оптимально организовать бурение для добычи природного теплоносителя и распределение нагрузки эксплуатационных скважин. Это предопределило *актуальность исследований*, составивших предмет данной диссертации и крайне важных для Курило-Камчатского региона России, обладающего значительными геотермальными ресурсами и в то же время находящегося в зависимости от импорта энергоносителей.

**Цель работы** – исследование высокотемпературной гидрогеотермальной системы (ГТС) как области циркуляции глубинного теплоносителя и источника энергии для многоцелевого практического использования, оценка источников и условий теплового и водного питания системы для оптимизации ее эксплуатации (на примере Мутновского месторождения).

## Основные задачи исследования:

- 1. Исследование структуры теплового питания высокотемпературных гидротермальных систем.
- 2. Сравнительный анализ концептуальных гидрогеологических моделей Мутновского геотермального месторождения.
- Изучение условий формирования и оценка гидрогеологических характеристик Мутновского геотермального месторождения на численной термогидродинамической модели (включающей Дачный, Верхне-Мутновский и Вулканный участки).
- Анализ условий эксплуатации Дачного участка Мутновского геотермального месторождения на детализированной численной термогидродинамической модели, включающей продуктивную зону и массив вмещающих горных пород.

*Методы исследований* – численное моделирование геотермального резервуара осуществлялось с помощью программы TOUGH2 (National Lawrence Berkeley Laboratory, США) и препроцессора PetraSim, разработанных для моделирования тепломассопереноса в высокотемпературных гидротермальных резервуарах и прогноза их эксплуатации.

Фактическая основа исследований – в основу моделирования положены материалы предварительной разведки на участке Дачный Мутновского месторождения парогидротерм для обоснования проекта строительства первой очереди ГеоЭС, а также опубликованные данные по эксплуатации Мутновского геотермального месторождения в период 1999-2005 гг. и результаты личных наблюдений автора во время полевых работ на Мутновском месторождении в 2004 г.

## Научная новизна

1. Впервые рассмотрено не только геотермальное месторождение, но и прилегающая область (Мутновский геотермальный район) в рамках единой численной модели. Построена трехмерная численная термогидродинамическая модель Мутновского геотермального района, включающая участки Дачный, Верхне-Мутновский и Вулканный. На модели обосновано положение зон восходящих потоков глубинного теплоносителя, выполнены оценки их расходов и теплосодержания в южной части месторождения.

2. Детализирована численная термогидродинамическая модель гидротермального резервуара участка Дачный Мутновского геотермального месторождения. Модель учитывает тепломассобмен между продуктивной зоной и вмещающим массивом горных пород.

3. Выполнено прогнозное численное моделирование эксплуатации продуктивной зоны «Основная» на участке Дачный для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт эл. в течение 15 лет, с оценкой различных схем реинжекции и анализом условий формирования эксплуатационных запасов.

## Защищаемые положения:

1. Численное моделирование естественного состояния высокотемпературных гидротермальных резервуаров позволяет оценить параметры их теплового и водного питания — энтальпию и расход восходящего потока глубинного теплоносителя. В связи с решением этой задачи нет необходимости в выяснении геометрии и состояния питающих магматических систем.

2. Обоснована региональная численная термогидродинамическая модель Мутновского геотермального района. С помощью TOUGH2моделирования уточнено пространственное положение и параметры зон притока глубинного теплоносителя в южной части субмеридиональной Северо-Мутновской вулканотектонической зоны.

3. Обоснована численная термогидродинамическая модель высокотемпературного гидротермального резервуара Дачный Мутновского месторождения, учитывающая теплообмен продуктивной зоны с вмещающим массивом горных пород. С помощью TOUGH2-моделирования установлен существенный приток инфильтрационных вод (60 кг/с) в резервуар в процессе его эксплуатации; обоснован возможный режим подключения дополнительных скважин для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт в течение 15-летней эксплуатации. Определено влияние реинжекции на параметры добычных скважин.

### Практическая ценность работы

Результаты прогнозного численного моделирования показывают возможность обеспечения в течение 15-ти лет Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт теплоносителем с центрального блока участка Дачный путем бурения дополнительных эксплуатационных скважин в юго-восточном секторе зоны «Основная» и повышения эффективности эксплуатации при различных схемах реинжекции и условии ликвидации притоков инфильтрационных вод.

### Реализация и внедрение результатов работы

Тестирование численной термогидродинамической TOUGH2-модели участка Дачный Мутновского геотермального месторождения, включающей продуктивную зону «Основная» и массив вмещающих горных пород, осуществлялось в связи с реализацией хоз. договора ИВиС ДВО РАН с ОАО «Геотерм» №30.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на Международном геотермальном семинаре «Тепло и свет из недр Земли», (г. Петропавловск-Камчатский, 9-15 августа 2004 г.); VII международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, апрель 2005 г.); Международном Геотермическом Конгрессе WGC-2005 (г. Анталия, Турция, 24-29 апреля 2005 г.); 30-м и 32-м Международных геотермальных семинарах (г. Стэнфорд, США, 2005, 2007).

*Публикации* – по теме диссертации автор имеет 9 публикаций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 14 таблиц и 49 рисунков. Работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, включающего 99 наименований.

**Благодарности.** Автор очень обязан В.И.Кононову и М.Д. Хуторскому за поддержку этого исследования и ценные советы и своему научному руководителю А.В. Кирюхину (ИВиС ДВО РАН) за постоянную помощь и консультации при его выполнении. Автор глубоко благодарен АО «Геотерм» и АО «Наука» за предоставление необходимых материалов. Он очень признателен Г. Бьорнссону и А. Хьартарсону (UNU GTP, Исландия) за ценные рекомендации в процессе исследования, а также В.М. Сугробову (ИВиС ДВО РАН) за конструктивную критику рукописи.

### Глава 1.

## ТЕПЛОВОЕ ПИТАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОБЛАСТЯХ СОВРЕМЕННОГО ВУЛКАНИЗМА

Внутреннее тепло Земли, аккумулированное в горных породах и циркулирующих в них подземных флюидах, не только движущая сила глубинных геологических процессов, но и источник энергии, которая сегодня находит разнообразное практическое применение. Материалы последнего Международного геотермического конгресса (Турция, 2005) показали, что суммарная установленная мощность ГеоЭС мира достигла 8900 МВтэ. В 1999-2002 гг. введены в эксплуатацию две ГеоЭС на Мутновском геотермальном месторождении на Камчатке, с установленной мощностью 62 МВтэ. Прямое использование глубинного тепла для теплофикации жилых и промышленных зданий, в индустриальных процессах, сельском хозяйстве и пр. осуществляется в 71 стране.

Строго говоря, гидротермальными системами (ГТС) являются все циркуляционные системы подземных вод, т.е. гидрогеологические бассейны и водонапорные системы любого масштаба, теплового режима и типа циркуляции вод, нагретых глубинным теплом до температур, превышающих климатическую среднегодовую для данной местности. Но в данной работе этот термин рассматривается в более узком смысле: под ГТС, вслед за В.В. Аверьевым, понимаются специфические гидродинамические системы, которые возникают в земной коре областей современного вулканизма при внедрении глубинного теплоносителя. По мнению В.В. Аверьева, такие системы на глубине объединяются единым фронтом теплового питания, образуя в вулканических областях «геотермальные районы», а участки систем, удобные для извлечения и эксплуатации глубинного тепла, представляют собой «геотермальные месторождения».

Источниками тепла в гидротермальных системах могут быть:

1) региональный (фоновый) кондуктивный тепловой поток,

2) локальные источники тепла, возникающие при внедрении магматического расплава в верхнюю часть земной коры.

Доля указанных выше источников в тепловом питании конкретной гидротермальной системы определяется соотношением плотности *q* фонового кондуктивного теплопотока на площади *S* ее водного питания и общего конвективного выноса тепла Q в очагах ее естественной разгрузки.

Анализ гидрогеологических условий и теплового баланса высокотемпературных ГТС областей современного вулканизма показывает, что в их пределах Q намного превышает  $q \times S$ , т.е. их прогрев не может быть обеспечен только кондуктивным фоновым тепловым потоком. Следовательно, для обеспечения тепловой мощности этих систем, которые, по геологическим данным, существуют десятки и сотни тысяч лет, нужны дополнительные (магматогенные) источники тепла.

Высокотемпературные гидротермальные системы формируются преимущественно в областях современного вулканизма. Такие системы отмечают участки локальных термоаномалий, где вынос тепла через поверхность Земли и его приток из недр осуществляется, в основном, посредством конвективного тепломассопереноса. Процесс формирования высокотемпературных гидротермальных систем, по современным представлениям, описывается следующим образом. Холодная метеорная вода из областей питания опускается по субвертикальным проницаемым зонам и в пределах магматогенных термоаномалий преобразуется в высокотемпературный «геотермальный флюид», который нагревается за счёт теплообмена с магматическими газами и вмещающими породами. Затем потоки теплоносителя поднимаются по проницаемым зонам, образуя высокотемпературные гидротермальные резервуары и достигая земной поверхности в виде горячих источников и фумарол. Циркуляция флюида в резервуаре определяется перепадом давления между областями его водного питания и разгрузки, вариациями плотности флюида (т.е., вынужденной и свободной конвекцией) и проницаемостью вмещающих пород.

Концептуальные модели ГТС качественно описывают гидротермальную систему, характеризуя размеры и форму резервуара, источники его теплового питания, зоны питания, транзита и разгрузки флюида и его фазовое состояние. При этом отдельные геотермальные месторождения отвечают разным зонам апвеллинга (восходящих потоков) в пределах конвективной системы. Концептуальная модель гидротермальной системы создается на основе всей совокупной информации, известной на данный момент. Поэтому она может эволюционировать с течением времени. Наиболее эффективным инструментом, с помощью которого можно проверить концептуальные представления о гидротермальной системе, является численное термогидродинамическое моделирование.

### Глава 2.

## МУТНОВСКОЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ МЕСТРОЖДЕНИЕ (ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ)

На Камчатке, находящейся в активной зоне перехода от континента к океану, выявлено около 150 групп термальных источников и 11 высокотемпературных ГТС. Последние приурочены к вулканогенным бассейнам с трещинно-порово-пластовым и трещинно-жильным характером циркуляции термальных флюидов. Ресурсы этих ГТС могут обеспечить выработку 1130 МВт<sub>э</sub> и потребление 1345 МВт<sub>т</sub> в течение не менее 100 лет [Sugrobov, 1995; Сугробов и др., 2004, 2005]. В настоящее время для получения геоэлектрической энергии используются ресурсы двух ГТС – Паужетской, где с 1966 г. работает ГеоЭС (установленная мощность 11 МВт<sub>э</sub>), и Мутновской в 75 км южнее г. Петропавловска, где разведочное бурение началось в 1979 г., а в настоящее время установленная мощность двух ГеоЭС составляет 62 МВт<sub>э</sub>.

#### 2.1. Общая характеристика месторождения

Мутновское геотермальное месторождение входит в состав Мутновского геотермального района (Мутновской ГТС) площадью около 750 км<sup>2</sup>, маркирующего «крупный долгоживущий магматический центр, возникший на пересечении региональных глубинных разломов камчатского (субмеридионального) и трансформного (широтного) простирания и мощных зон разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простираний» [Вакин и др., 1986]. Вулканическая и гидротермальная активность в пределах Мутновского геотермального района продолжается с конца олигоцена до настоящего времени. Геологический разрез сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными неоген-четвертичными образованиями – лавами, туфами, конгломератами, песчаниками, алевролитами суммарной мощностью более 2 км.

Формирование геотермального резервуара связано с Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоной (ВТЗ), шириной в 3-10 км и длиной около 20 км, фиксирующейся грабенообразной депрессией, осевая часть которой проходит через кратеры Мутновского вулкана и далее на север. Согласно [Вакин и др., 1979, 1986], эта зона – самая молодая в районе система тектонических нарушений, входящая в структуру регионального глубинного разлома. Сопки Двугорбая и Скалистая трассируют западную границу ВТЗ, а на востоке и северо-востоке ее границы выражены сбросами, секущими нижнеплейстоценовую постройку Жировского вулканического массива. К Северо-Мутновской ВТЗ приурочены самые молодые кислые магматические очаги, являющиеся наиболее вероятным источником теплового питания гидротерм.

Мутновское геотермальное месторождение приурочено к пересечению Северо-Мутновской ВТЗ с другим крупным тектоническим швом северо-восточного простирания (Мутновской зоной) – более древней системой нарушений, активизированной в новейшее время. На пересечении этих зон находятся Дачные термопроявления, открытые в 1960 г. И.Т. и Т.П. Кирсановыми, а затем исследованные Е.А. Вакиным, Г.Ф. Пилипенко и др. В 80-е годы и позднее этот участок был наиболее детально изучен комплексными исследованиями, включавшими маршрутное геокартирование с описанием обнажений, буровые работы, термометрию и другие методы. С 1979 г. на месторождении было пройдено 82 скважины глубиной от 255 до 2266 м.

Мутновский геотермальный район изобилует проявлениями гидротермальной активности, куда входят фумарольные поля в кратерах вулканов Мутновского и Горелого, термальные площадки и выходы пара за их пределами и горячие восходящие источники в глубоких эрозионных врезах (тектонических долинах). В этих проявлениях происходит конвективный вынос глубинного тепла, дополняющий фоновые региональные кондуктивные теплопотери. В сумме тепловая мощность естественной разгрузки гидротерм Северо-Мутновской системы составляет 164 МВт<sub>т</sub> ([Вакин и др., 1986], табл. 1). Такой вынос тепла гидротермами более, чем в четыре раза превышает фоновые кондуктивные теплопотери на всей площади Мутновского геотермального района, при их средней плотности 54 мВт/м<sup>2</sup>, типичной для Восточной вулканической зоны Камчатки [Смирнов и др., 1974]. При этом, в тепловой мощности разгрузки отражается далеко не весь избыточный тепловой потенциал района, в котором действуют вулканы Горелый и Мутновский. Энергетический эффект активности Мутновского вулкана был неоднократно оценен специальными исследованиями [Поляк, 1965; Муравьев и др., 1983]. Оценка суммарного выноса тепла через Активную воронку и северо-восточный кратер Мутновского вулкана составила ~ 1100 МВт [Поляк и др., 1985].

NºNº	Термопроявления		Вынос тепла, МВтт
1	Лачные	98	73
2	Перевальные (Верхне-Мутновские)	96	9
3a	Северо-Мутновские, восточная группа	98	19
3б	Северо-Мутновские, западная группа	110	9
4	Верхнежировские	96	18
5	Нижнежировские	100	16
6	Воиновские	93	8
7	Вилючинские	90	12
	164		

#### Таблица 1. Характеристики естественной разгрузки Северо-Мутновской гидротермальной системы (по [Вакин и др., 1986])

Гидрогеологическими особенностями Мутновского геотермального района являются [Вакин и др., 1986]: 1) обилие атмосферных осадков (свыше 3000 мм), 2) высокая степень неоднородности проницаемости в плане и в разрезе, наличие «двойной пористости», связанной с генетическими условиями образования вулканогенных горных пород, 3) сильная расчлененность рельефа, 4) развитая сеть тектонических нарушений. Опытные выпуски теплоносителя [Асаулов Г.М. и др., 1987] и газогидрохимическое опробование разведочно-эксплуатационных скважин [Таран и др., 1986] показывают наличие в резервуаре двух зон с различным фазовым состоянием теплоносителя. В нижней зоне гидротермы находятся преимущественно в жидком состоянии (с температурой флюида более 240-250°С), поэтому месторождение относится к «вододоминирующим». В верхней зоне, в результате снижения давления в зонах повышенной проницаемости, теплоноситель вскипает, образуя пароводяную смесь с температурой около 240°С. Эта «паровая шапка», или верхняя пароконденсатная зона месторождения, маркирует основной очаг его естественной разгрузки (Дачные источники) и протягивается на 1,5-2,0 км в меридиональном направлении [Вакин и др., 1976].

Характер циркуляции парогидротерм – трещинно-жильный на всю исследованную глубину месторождения [Вакин, Сугробов, 1986]. Высокая температура увеличивает скорость фильтрации за счет понижения вязкости, вследствие чего слабопроницаемые породы для термальных вод оказываются коллекторами, а для холодных – относительными водоупорами [Белоусов, Сугробов, 1976]. В очагах разгрузки породы подвергаются гидротермальным изменениям, отчего у поверхности образуются водоупорные глинистые покрышки.

## 2.2. Концептуальная модель Мутновского геотермального резервуара

Концептуальная гидрогеологическая модель качественно представляет картину циркуляции флюида в резервуаре и характеризует: зоны водного питания и разгрузки, водопроводящие зоны и гидравлических барьеры, источники теплового питания, размеры и форму резервуара, фазовое состояние флюида. Концептуальные гидрогеологические модели Мутновского месторождения предлагались: Е.А. Вакиным и др. (1976); А.В. Кирюхиным и В.М. Сугробовым (1987); А.В. Кирюхиным (1991, 1993, 2005); С.Г. Асауловым (1994); С.А. Федотовым и др. (2001).

<u>Модель Е.А. Вакина и др (1976)</u>. Согласно этой модели, воды месторождения нагреваются не Мутновским вулканом; область их теплового питания лежит в пределах Северо-Мутновской зоны (СМЗ), а источником тепла является неглубокий магматический очаг. Холодные инфильтрационные воды, проникая из области питания (кальдера в. Горелого) к базису разгрузки (океан), смешиваются внутри зоны с восходящими потоками «глубинного теплоносителя», нагреваются и частично разгружаются в виде паровых струй на Северо-Мутновских и Дачных источниках. Расположенное восточнее структурное поднятие отчасти препятствует стоку вод, но поперечные разломы служат каналами для дальнейшего движения термальных вод на восток. Геометрия резервуара, фазовое состояние флюида и характер его циркуляции не обсуждались.

<u>Модель А.В. Кирюхина–В.М. Сугробова (1987)</u>. В отличие от предыдущей, в данной модели предполагается, что водное питание месторождения происходит не только в кальдере в. Горелого, но и на возвышенных участках Северо-Мутновской зоны. Источником теплового питания, как и ранее, предполагаются магматические тела в пределах СМЗ. На основании термометрии скважин и расположения термопроявлений предполагается, что гидротермальный резервуар в плане имеет форму эллипса, вытянутого в северо-восточном направлении.

<u>Модель А.В. Кирюхина и др. (1991, 1993)</u>. В этой модели детализируются гидрогеологические условия в пределах участка Дачный: по распределениям температур идентифицированы восходящие («Основной» и «Восточный») и нисходящие («Конденсатный» и «Метеорный») флюидные потоки.



Рис. 1. Распределение температуры (°С) в Мутновском резервуаре [Vereina, 2003, 2004, 2005, 2007]: а) на абс. отм. –250 м; б) вдоль разломной зоны СВ простирания.

11



Рис. 2. Распределение давления (бар) в Мутновском резервуаре [Vereina, 2003, 2004, 2005, 2007]: а) на абс. отм. -250 м; б) вдоль разломной зоны СВ простирания.

<u>Модель С.Г. Асаулова (1994)</u>. В рассматриваемой модели резервуар предполагается вытянутым вдоль основной разломной зоны; восходящий поток предполагается к югу от резервуара (под Мутновским вулканом) и направление течения флюида – с юга; указывается на существование двухфазной зоны, но условия теплового питания (источники тепла и их позиции) – не уточняются.

<u>Модель С.А.</u> Федотова и др. (2001) конкретизирует положение источников дополнительного тепла, считая таковыми питающий канал вулкана, магматической очаг под его северным подножьем и неглубокие миоцен-плиоценовые экструзивные тела. На модели показано установленное и предполагаемое положение геоизотерм по имеющимся данным, а также кровля зоны надкритического флюида.

В данной диссертации предложена концептуальная модель, основанная на совместном учете фактических значений температуры и давления в геотермальном резервуаре. Используя имевшиеся оценки [Кирюхин и др., 1991, Kiryukhin, 1993, Assaulov, 1994] и данные скважинных измерений [Мальцева и др., 2002], нами были построены карты распределения Т и Р в Мутновском резервуаре на уровне -250 м и в разрезе [Vereina, 2003, 2004, 2005, 2007]. Качественный анализ указанных выше данных показывает следующее (рис. 1, 2):

• Основной приток глубинного теплоносителя в гидротермальный резервуар осуществляется с юга, вдоль субмеридиональной разломной зоны, а сток – вдоль зоны СВ простирания. Проявлены три зоны восходящего потока флюида с температурой > 300°С: на участках Дачный (Д), Верхне-Мутновский (ВМ) и на участке Северо-Мутновских горячих источников (Вулканный участок). Это позволяет предполагать на указанных участках наличие дополнительных источников тепла.

• Контуры гидротермального резервуара ограничивает изотерма 240°С. Следовательно, южная граница резервуара проходит вблизи скважин 19, 20 и 45, а северо-восточная - вблизи скважины 30; северная граница совпадает с разломом Широтный. Совместный анализ начального распределения температуры и давления показывает, что флюид в резервуаре почти всюду находится в жидком состоянии (давление выше давления насыщения при измеренной температуре), за исключением паровой зоны в центральной части участка Дачный.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МУТНОВСКОМ ГЕОТЕРМАЛЬНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Проверка реалистичности концептуальной гидрогеологической модели и оценка параметров источников теплового питания осуществляются с помощью численного термогидродинамического моделирования. Основным критерием адекватности модели является сходимость между модельными и фактическими параметрами по температуре, давлению и паронасыщенности, которая достигается за счет подбора параметров тепловых и массовых источников, граничных условий и проницаемости.

## 3.1. Численное моделирование тепломассопереноса с помощью программы TOUGH2

Для моделирования тепломассопереноса в высокотемпературных гидротермальных резервуарах (ВГР) и прогноза их эксплуатации применяются программные пакеты, разработанные в Лаборатории Беркли, США (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL), которые основаны на программе TOUGH2. Проверка программы осуществлена на многочисленных примерах и опытных данных, полученных при эксплуатации геотермальных месторождений, а также на объектах захоронения промышленных и ядерных отходов.

Управляющие уравнения TOUGH2 (уравнения двухкомпонентного многофазного тепломассопереноса в интегральной форме) для элемента *V* с границей *Г* записываются в следующем виде [Pruess et al., 1999]:

$$\frac{d}{dt} \bigoplus_{V} M^{(k)} dV = \bigoplus_{\Gamma} F^{(k)} \cdot \stackrel{\mathsf{o}}{h} d\Gamma + \bigoplus_{V} q^{(k)} dV$$

$$1) \qquad 2) \qquad 3) \qquad (1)$$

где 1) – содержание массы/энергии в элементе V, 2) – поток массы/энергии через границы элемента V, 3) – тепловые/массовые источники и стоки. Индекс k принимает значение 1 для уравнения сохранения 1-го компонента, 2 – для 2-го компонента, 3 – для энергии.

Переход к конечно-разностным уравнениям осуществляется на основе интегро-конечно-разностного метода (ИКРМ) – без преобразования интегральных законов сохранения массы и энергии в уравнения в частных производных. Это позволяет избежать привязки к глобальной системе координат и дает возможность как регулярной, так и нерегулярной дискретизации пространства.

Аккумулятивные члены массы и энергии в уравнениях (1) определяются следующим образом:

$$M^{(k)} = \phi \sum_{\beta = l,g} s_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{(k)}$$
<sup>(2)</sup>

$$M^{(3)} = (1 - \phi)\rho_R C_R T + \Phi \sum_{\beta = l,g} s_\beta \rho_\beta U_\beta^{(k)}$$
(3)



Рис. 3. Вычислительная сетка для моделирования естественного состояния: а) вычислительная сетка по отношению к географии исследуемой области; б) зонирование слоя В (абс. отм. -250 м) на домены с различной проницаемостью. Красным прямоугольником отмечены границы рис. 4, 5, 6.



Рис. 4. Результаты ТОUGH2-моделирования: оценка распределения температуры (°С) и давления (бар) в слое В (-250 м абс. отм.). Вариант V-1. Область, закрашенная голубым, соответствует двухфазной зоне.



Рис. 5. Результаты TOUGH2-моделирования: оценка распределения температуры (°С) и давления (бар) в слое В (-250 м абс. отм.). Вариант V-2.



Рис. 6. Результаты ТОUGH2-моделирования: оценка распределения температуры (°С) и давления (бар) в слое В (-250 м абс. отм.). Вариант V-3.

16

где  $\phi$  – пористость,  $S_{\beta}$  – насыщение фазы  $\beta$ ,  $\rho_{\beta}$  – плотность фазы  $\beta$ ,  $X^{(k)}_{\ \beta}$  – массовая доля компонента k в фазе  $\beta$ ,  $\rho_R$  – минеральная плотность горных пород,  $C_R$  – удельная теплоемкость скелета горных пород, T – температура,  $U_{\beta}$  – удельная внутренняя энергия фазы  $\beta$ . Массовый поток компонента k определяется как сумма массовых потоков этого компонента для каждой фазы:

$$F^{(k)} = \sum_{\beta = l,g} F_{\beta}^{(k)}$$

$$F_{\beta}^{(k)} = -k \frac{k_{r\beta}}{\rho_{\beta}} \rho_{\beta} X_{\beta}^{(k)} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g)$$

$$(4)$$

$$\Gamma_{\beta} = \kappa \mu_{\beta} \rho_{\beta} \Gamma_{\beta} (\Gamma_{\beta} - \rho_{\beta} g)$$
(5)

где k – абсолютная проницаемость,  $k_{r\beta}$  – относительная проницаемость фазы  $\beta$ ,  $\mu_{\beta}$  – вязкость фазы  $\beta$ ,  $P_{\beta}$  – давление в фазе  $\beta$ , g – ускорение свободного падения. Полный тепловой поток, содержащий кондуктивную и конвективную составляющие, определяется уравнением:

$$F^{(3)} = -\lambda \nabla T + \sum_{\substack{\beta = l, g \\ k = 1, 2}} h_{\beta}^{(k)} F_{\beta}^{(k)}$$
(6)

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности насыщенных пород,  $h^{(k)}_{\ \beta}$  – энтальпия компонента *k* в фазе  $\beta$ .

При однокомпонентном составе флюида (вода) имеем для каждого элемента два уравнения типа (1) для двух неизвестных (в однофазном состоянии – давление и температура, в двухфазном – давление и паронасыщенность). Система из N элементов описывается системой 2N уравнений для 2N неизвестных, которая решается методом итераций Ньютона-Рафсона [Pruess, 1999].

## 3.2. Мутновское геотермальное месторождение: моделирование естественного состояния

#### 3.2.1. Новая численная термогидродинамическая модель.

Модель естественного состояния Мутновского месторождения, предложенная в работах [Vereina, 2003, 2004, 2005, 2007], включала участ-ки Дачный, Верхне-Мутновский и Вулканный.

<u>Основные предположения</u>. В начальный момент времени рассматриваемая система (резервуар и близлежащая область) считается холодной. С какого-то момента начинается постоянный приток горячего флюида, и система начинает нагреваться. Поскольку естественное состояние системы предполагается стационарным, то «время прогрева системы» принимается достаточно большим, в данном случае ~1 млн. лет (предполагается, что за это время в системе установится стационарное распределение термогидродинамических параметров). <u>Генерация вычислительной сетки.</u> Для создания модели были использованы вычислительный код TOUGH2 и 5-слойная вычислительная сетка (слои A, B, C, D, E, мощность каждого слоя 500 м, абс. отметка первого слоя +250 м), построенная с помощью генератора вычислительных сеток A-Mesh (рис.3). Распределение элементов сетки следует из геометрии исследуемой области, которая определяется наличием фактически пробуренных скважин и основными разломными зонами меридионального и северо-восточного простирания (рис.3а). При генерации сетки осуществлялось сгущение элементов вдоль проницаемых зон разломов (рис.3б).



Рис. 7. Схема размещения дополнительных эксплуатационных скважин (010-F16, 010-F17, 010-F29, 013-F18, 013-F19, 013-F20, 013-F30) для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт с центрального блока участка Дачный [Kiryukhin, Asaulova, Polyakov, Vereina, in press].

В фоне показаны элементы топографии и распределение температуры на абс. отм. -250 м. Границы карты соответствуют границам численной модели [Kiryukhin, 1996]; внутренняя сетка соответствует детальной модели продуктивной зоны "Основная" [Кирюхин и др., 2005, Kiryukhin, Vereina, 2005].

<u>Граничные условия.</u> В элементах верхнего слоя заданы постоянные давление и температура, что обеспечивает граничные условия разгрузки. В элементах нижнего активного слоя «D» (абс. отм. -1250 м) заданы массовые и тепловые источники, что обеспечивает условия теплового и водного питания гидротермального резервуара.

<u>Начальные условия.</u> Начальная температура задавалась постоянной внутри каждого слоя и линейно возрастающей с глубиной (за исключением последнего слоя, где задана температура 280 °C). Начальное распределение давления гидростатическое (рассчитано с помощью программы PREDYP, [Arason et al., 2003]).

Зонирование модели по проницаемости и петрофизическим свойствам. Распределение проницаемости ( $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ ) является оцениваемым модельным параметром, остальные свойства горных пород считаются известными и задаются в соответствии с табл. 2. В каждом слое вычислительной модельной сетки, за исключением слоя Е, выделены три домена – области с различной проницаемостью: «проницаемый» (разломная зона), «низкопроницаемый» (близлежащая область) и «непроницаемый» (рис.3б).

<u>Моделирование естественного состояния</u>. При моделировании естественного состояния тепловые и массовые источники и стоки размещались в соответствии с различными концептуальными моделями теплового питания резервуара. В рассматриваемой задаче все источники и стоки располагались в самом глубоком «активном» слое D (-1250 м абс. отм.).

Таблица 2.

		Напалг	Началь-		Свойс	тва горні	ых пород
Слой	Абс. от- метка , м	ная тем- перату- ра, ° С	ное давле- ние, бар	Литология	плот- ность, (кг/м <sup>3</sup> )	порис тость	теплопро- водность, (Вт/м*К)
A*	250	30	1,04	Q игнимбриты, плиоценовые ла- вы, риолитовые туфы	2100	0,2	2,05
В	-250	80	49,45	N <sub>2</sub> песчаники	2300		2,1
C	-750	130	96,46	Интрузивная контактовая зона	2400	0,03	2,1
D	-1250	180	141,53	Диориты	2700	0,02	2,1
E*	-1750	280	166,00	Диориты	2700	0,02	2,1

Параметры Мутновского геотермального резервуара заданные при моделировании [Kiryukhin, 1996, 2002; Vereina, 2003, 2007]

Рассмотрено три варианта моделирования. В первом варианте (V-1) предполагалось наличие одного источника теплового и массового питания (SOU1) в области Северо-Мутновских термопроявлений (Вулканный участок) и одного стока (SIN1), моделирующего разгрузку флюида, в элементе на северо-восточной границе месторождения. В двух других случаях пред-

полагалось существование дополнительных тепловых и массовых источников. В случае V-2 это второй дополнительный источник (SOU2) под участком Дачных термопроявлений, а в случае V-3 – два дополнительных источника (SOU2 и SOU3), под участками Дачный и Верхне-Мутновский.

Слой	Домен	Проницаемость (Д)		
		$k_x$	$k_{v}$	$k_z$
$A^*$	RCK1P	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-4</sup>
	RCK1I	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-4</sup>
В	RCK2P	0,29*10 <sup>-1</sup>	0,29*10 <sup>-1</sup>	$0,29*10^{-2}$
	RCK2I	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>
С	RCK3P	0,45*10 <sup>-1</sup>	0,45*10 <sup>-1</sup>	0,45*10 <sup>-2</sup>
	RCK3I	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>
D	RCK4P	0,38*10 <sup>-1</sup>	0,38*10 <sup>-1</sup>	$0,38*10^{-2}$
	RCK4I	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>	0,1*10 <sup>-3</sup>
$E^*$	RCK5P	0,1*10 <sup>-19</sup>	0,1*10 <sup>-19</sup>	0,1*10 <sup>-19</sup>
	RCK5I	0,1*10 <sup>-19</sup>	0,1*10 <sup>-19</sup>	0,1*10 <sup>-19</sup>
Окружающая область		0,1*10-4	0,1*10 <sup>-4</sup>	0,1*10 <sup>-6</sup>
	(RCK6I)			

Результаты моделирования: оценка проницаемости.

#### Таблица 4. Источники и стоки в модели.

Таблина 3.

Вариант	Источ-	Расход (кг/с)	Энтальпия
моделирования	ник/Сток		(кДж/кг)
V 1	SOU 1	50	1650
v - 1	SIN 1	21	728
	SOU 1	30	1650
V-2	SOU 2	20	1650
	SIN 1	22	959
	SOU 1	20	1650
V 2	SOU 2	20	1650
V-3	SOU 3	15	1650
	SIN 1	45	1152

Расчетное распределение температуры и давления и расположение двухфазной зоны в слое В (абс. отм. -250 м) показано на рис. 4, 5 и 6, соответствующие оценки расхода и энтальпии для источников и стоков приведены в табл. 4. В третьем варианте моделирования (V-3) получена наилучшая сходимость расчетного распределения давления в резервуаре и данных измерений в скважинах. Температура на модели во всех трех случаях занижена по сравнению с наблюдаемыми значениями. Возможно, это объясняется тем, что рассматриваемая область месторождения намного больше области, разбуренной скважинами, и необходимо учесть другие вероятные источники тепла вне разбуренной области месторождения.

Таким образом, наилучшую сходимость результатов моделирования с фактическими данными дает вариант V-3. Поэтому соответствующая этому варианту концептуальная модель теплового и массового питания представляется наиболее достоверной.



Рис. 8. Геометрия 3-D численной модели продуктивной зоны «Основная» участка Дачный Мутновского геотермального месторождения. Цвет соответствует доменам с различной проницаемостью (см. рис. 10 б). [Kiryukhin, Vereina, 2005].



Рис. 9. Прогнозное моделирование суммарной и индивидуальной паропроизводительности скважин (существующих 016, 26, E4, 029W, E5 и дополнительных F-скважин) на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения при эксплуатации в режиме полного обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт (вариант EX3A).



Рис. 10. Вычислительная сетка в плане (а) и расчетное распределение проницаемости (б) для продуктивной зоны «Основная» участка Дачный Мутновского месторождения [Кирюхин и др., 2005; Kiryukhin, Vereina, 2005].



Рис. 11. Прогнозное моделирование суммарной и индивидуальной паропроизводительности скважин (группы существующих 016, 26, E4, 029W, E5 и дополнительных F-скважин) на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения (вариант EX3F).

22

# 3.2.2. Численная термогидродинамическая модель (Кирюхин – Вереина, 2005 - 2009).

После бурения дополнительных скважин на Мутновском месторождении в 2002-2003 гг. была уточнена геометрия продуктивной зоны «Основная» на участке Дачный и разработана более детальная модель резервуара [Кирюхин и др., 2005], которая в явном виде описывает вскрытую скважинами продуктивную зону. Продуктивная зона «Основная», вскрытая скважинами 045, 01, 014, 016, 1, 029W, 26, 24, 4Е приурочена к разломной зоне ССВ простирания, падением 60<sup>0</sup> на восток-юго-восток и средней вертикальной мощностью около 240 м (истинная мощность 120 м). Плоскость разломной зоны пересекает активное жерло Мутновского вулкана на абсолютных отметках +250 - +1250 м на расстоянии 8 км от участка эксплуатации. Здесь (по данным гидроизотопных исследований) также находится область водного питания месторождения за счет инфильтрации вод метеорного происхождения и тающего в кратере Мутновского вулкана ледника под действием повышенного теплового потока [Кирюхин и др., 2005]. В этой детальной модели продуктивная зона рассматривалась изолированной от массива вмещающих горных пород, т.е. не учитывался тепломассобмен между продуктивной зоной и вмещающим ее массивом. Для усовершенствования представления гидротермального резервуара на численной модели в 2004 г. при участии автора диссертации начались работы по модификации вычислительной сетки (включению в нее элементов, представляющих массив вмещающих пород, определение связей между элементами продуктивной зоны и элементами массива, тестированием модифицированной вычислительной сетки) [Kiryukhin, Vereina, 2005].

<u>Вычислительная сетка.</u> При генерации вычислительной сетки с использованием генератора сеток Amesh максимально учтена геометрия моделируемого объекта. Гидротермальный резервуара был представлен как объединение резервуара продуктивной зоны «Основная» и резервуара вмещающих горных пород (рис. 8). Оба резервуара совпадают в плане с основной сеткой, привязанной к существующим скважинам (рис. 7, 10).

<u>«Источники».</u> В соответствии с представлениями концептуальной модели это элементы O45, F27, F28, F14, F15, F29; в них задавался расход, величина которого определилась в результате моделирования естественно-го состояния (9 кг/с). Заданная в «источниках» энтальпия 1390 кДж/кг соответствует температуре воды 307 °C, находящейся в геотермальном резервуаре в жидком состоянии.

<u>Граничные условия.</u> В элементах модели В 9, В 16, В 14, В 10, В 1, В 8, В 13, В 33, В 32, В 31, В 30 и В 11 задавались постоянное давление и температура (P=const, T=const), или постоянное давление и паронасыщение (P=const, S=const). В остальных В-элементах были заданы непроницаемые границы (рис. 10а). Теплообмен между продуктивной зоной и вмещающими горными породами был задан с помощью коэффициента теплообмена 0,0042 Вт/м<sup>2</sup> °С с инактивным элементом С2 1 с базовой температурой 90°С.

<u>Моделирование естественного состояния.</u> Моделирование естественного состояния заключалось в ре-калибровке модели [Кирюхин и др., 2005] с учетом расширения вычислительной сетки и включения в нее массива вмещающих горных пород, что и показано в работе [Kiryukhin, Vereina, 2005]. Для моделирования естественного распределения температур, давлений и фазового состояния в резервуаре на модели были подобраны источники, стоки и распределение проницаемости таким образом, чтобы обеспечить наилучшую сходимость фактических данных и модельных результатов. Для ре-калибровки модели использовались данные по давлению, температуре и фазовому состоянию в ключевых элементах [Кирюхин и др., 2005]. В целом получена удовлетворительная сходимость между модельными и фактическими данными по температуре (среднее отклонение 3°C) и фазовому состоянию, являющимися наиболее достоверными измеряемыми характеристиками гидротермального резервуара.

Оценки параметров модели естественного состояния (по сравнению с оценками в работе [Кирюхин и др., 2005]) существенно не изменились: общий расход восходящего потока теплоносителя, полученный на модели, оказался равным 54 кг/с, соответствующее распределение проницаемости показано на рис. 10б, оценки проницаемости в доменах (областях) STEAM, ROCK1, ROCK2 и ROCK3 на модели – 100 мД, 100 мД, 1 мД и 0,01 мД, соответственно. Проницаемость массива вмещающих горных пород оценивается равной 0,1 мД, при более высоких значениях сходимость модели с фактическими данными ухудшается.

## 3.3. Мутновское геотермальное месторождение: моделирование эксплуатации (Кирюхин – Вереина, 2009)

Калибровка модели эксплуатации основана на данных по начальным термогидродинамическим характеристикам эксплуатационных скважин 016, 26, 029W, 4E, A2 и 5E (табл. 5), данных по изменению суммарного расхода пара и сепарата (скв. 016, 26, 029W, 4E, 5E, A2, O37 и 24) на сепараторе ГеоЭС в процессе эксплуатации 2002-2004 гг.

### 3.3.1. Задание на модели динамики взаимодействия «резервуар – скважина»

Коэффициенты продуктивности PI существующих эксплуатационных скважин подбираются на модели из условия сходимости начальных расходов скважин (табл. 5). В развитие подхода, изложенного в статье А.В. Кирюхина и др. [2005], для описания динамики взаимодействия резервуарскважина вместо подпрограммы DEBIT используется внутренняя подпрограмма TOUGH2 V2.0. Это позволяет учесть зависимость коэффициентов продуктивности скважин от изменения фазового состояния и мобильностей фаз в гидротермальном резервуаре, что характерно для Мутновского месторождения. Таким образом, расходы эксплуатационных скважин определяются в результате численного решения уравнения взаимодействия «резервуар-скважина», реализованного в виде внутренней подпрограммы TOUGH2V2.0:

$$Q = PI \cdot \sum \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (P_r - P_b(Q, h))$$
(7)

где Q – расход скважины, кг/с, k – относительная проницаемость,  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>,  $\mu$  – вязкость теплоносителя, Па\*с,  $\beta$  – индекс соответствующей фазы,  $P_r$ -давление в гидротермальном резервуаре (элементе модели, включающем рассматриваемую скважину), Па,  $P_b$  – приведенное забойное давление в добычной скважине, Па.

Таблица 5

#### Принятые начальные характеристики эксплуатационных скважин (016, 26, 029W, 4E, и 5E) для расчетов их коэффициентов продуктивности PI

Скважина	Расход,	Устьевое	PI
	кг/с	давление,	
		бар	
O16	17	7.5	0,124e-10
26	18	7.5	0,197e-10
4E	26.7	9	0,137e-11
O29W	72.5	9	0,120e-10
5E	39	7	0,922e-11

3.3.2. Моделирование условий обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт.

В данной работе продолжен анализ возможных вариантов участка Дачный Мутновского геотермального эксплуатации месторождения. В качестве первого варианта моделирования (вариант EX3) рассмотрен вариант эксплуатации группы из пяти основных существующих продуктивных скважин (016, 26, E4, 029W, E5), аналогично варианту из статьи [Кирюхин и др., 2005], но уже с учетом тепломассообмена продуктивной зоны с вмещающими породами и с учетом зависимости коэффициентов продуктивности добычных скважин эксплуатации изменяющегося процессе паронасыщения OT В И мобильностей фаз (см. выше формулу (7)). Результаты моделирования паропроизводительность показывают, суммарная ЧТО группы рассматриваемых скважин за 10 лет эксплуатации снизится с 64,4 кг/с до 33 кг/с, за 15 лет – до 31 кг/с, давление в центральной наблюдательной скважине снизится за 10 лет с 44,7 бар до 33,2 бар, за 15 лет – до 32 бар. В целом эти результаты близки полученным в работе [Кирюхин и др., 2005].

Далее рассмотрены варианты с подключением на модели дополнительных F-скважин (рис. 7). Позиции этих скважин задавались так же, как и в работе [Кирюхин и др., 2005]. Коэффициенты продуктивности Fскважин заданы равными 3,0 10<sup>-12</sup> м<sup>3</sup>. В варианте моделирования EX3A рассмотрен следующий график подключения дополнительных эксплуатационных скважин: F19 и F20 – подключаются сразу, F18 – через 2 года, F30 – через 5 лет, F29 – через 9 лет, F17 – через 12 лет, F16 – через 14 лет после начала эксплуатации (рис. 9). Результаты моделирования показывают, что такой график подключения скважин может обеспечить среднюю паропроизводительность 105,4 кг/с в течение 15 лет эксплуатации, что соответствует 52,7 МВт электроэнергии (для получения 1 МВт электроэнергии достаточно 2 кг/с пара при давлении 7 бар абс). Таким образом, при учете тепломассообмена продуктивной зоны с вмещающими породами и более точном описании зависимостей коэффициентов продуктивностей добычных скважин от изменяющихся в процессе эксплуатации термогидродинамических параметров гидротермального резервуара модель дает более оптимистические прогнозные результаты по сравнению с результатами в работе [Кирюхин и др., 2005] (средняя паропроизводительность 97,8 кг/с в течение 10 лет эксплуатации).

<u>Моделирование с учетом реинжекции.</u> В варианте моделирования EX3B рассмотрены те же условия, что и в предыдущем варианте, и дополнительно задана реинжекция в скв. О27 на Северном полигоне (рис. 7). Расход реинжекции задан равным 150 кг/с, энтальпия 700 кДж/кг. Прогнозные результаты мало отличаются от предществующего варианта: средняя суммарная паропроизводительность составит 105,5 кг/с и средний суммарный расход пароводяной смеси – 273,0 кг/с. Это связано с тем, что модельная область реинжекции пространственно близка к заданным на модели инактивным граничным элементам (описывающим контур разгрузки в смежные гидрогеологические структуры – разгрузку в бассейн р. Жировой) (рис. 10а). Косвенно отсутствие значительного влияния реинжекции на добычные скважины Дачного участка доказывается отсутствием заметного повышения в них содержания хлор-иона [Кирюхин и др., 2006] в процессе эксплуатации.

Вариант моделирования EX3C рассматривает те же условия, что и вариант EX3A, но реинжекция задается на Южном полигоне в скв. O45 (рис. 7). Расход реинжекции задан 150 кг/с, энтальпия 700 кДж/кг. Результаты моделирования показывают, что суммарная средняя паропроизводительность повышается до 115,6 кг/с в течение 12,5 лет эксплуатации, что соответствует 57,8 МВт электроэнергии. Однако эффект реинжекции на Южном полигоне неоднозначен: с одной стороны, реинжекция в зону глубинного питания гидротермального резервуара способствует увеличению производительности глубоких скважин (F-скважины), с другой стороны, она приводит к снижению температуры (и давления) в приповерхностной пароконденсатной зоне и выводу из эксплуатации менее глубоких добычных скважин (26, E5).

<u>Моделирование с учетом инфильтрации</u>. Вариант моделирования EX3F включает те же условия, что и базовый вариант EX3A, но при этом еще рассматривается возможность инфильтрации с суммарным расходом

60 кг/с и энтальпией 420 кДж/кг в центральной части участка Дачный (рис. 11). Вертикальная инфильтрация вод метеорного происхождения на участке Дачный может быть вызвана проникновением воды через затрубное пространство плохо зацементированных скважин (общее число скважин на участке Дачный – 64), чему может также способствовать аномально низкое положение уровня в гидротермальном резервуаре (500-600 м ниже поверхности земли). Результаты моделирования показывают, что суммарная средняя паропроизводительность составит 96,8 кг/с в течение 15 лет эксплуатации, что соответствует 48,4 МВт электроэнергии. Приток инфильтрационных вод сверху в гидротермальный резервуар косвенно подтверждается данными по газовому составу добычных скважин, в котором после начала эксплуатации возросла составляющая метеорных газов и отмечено разбавление по хлор-иону [Кирюхин, Москалев, Поляков, Чернев, 2006]. Среднее за 15 лет соотношение паровой и водной составляющих, полученных для варианта моделирования EX3F равно 96,8 : 211,8 (или 0,457). На 2-й год эксплуатации Мутновской ГеоЭС (2004 г.) соотношение пара и воды составляло 78 : 168 (или 0,464) с тенденцией уменьшения доли пара. Таким образом, сценарий притока инфильтрационных вод в гидротермальный резервуар наиболее вероятен.

Заметим, что значительный приток инфильтрационных вод в продуктивный резервуар через неиспользуемые геотермальные скважины отмечен на Паужетском геотермальном месторождении [Кирюхин, Сугробов, 1987; Kiryukhin et al, 2008].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предметом данного исследования являлось термогидродинамическое моделирование Мутновского месторождения. Ему предшествовала разработка концептуальной гидрогеологической модели месторождения – его качественное описание, которое характеризует морфологию резервуара, его тепловое питание, зоны питания, транзита и разгрузки флюида и его фазовое состояние. Предложенная концептуальная модель синтезирует результаты разносторонних геологических, геофизических, и гидрогеологических исследований, в которых участвовали Е.А. Вакин, Ю.А. Краевой, Г.Ф. Пилипенко, Г.М., Н.П. и С.Г. Асауловы, В.М. Сугробов, Ю.А. Таран, А.В. Кирюхин, С.В. Остапенко и др. Численное термогидродинамическое моделирование использовано в качестве критерия проверки правильности представлений о процессах, протекающих в гидротермальной системе.

Основные результаты, проведенного автором лично [Vereina, 2003; 2004, 2005, 2007] и в соавторстве [Kiryukhin, Vereina, 2005; Kiryukhin, Asaulova, Polyakov, Vereina (в печати)] термогидродинамического моделирования Мутновской высокотемпературной гидротермальной системы и ее эксплуатируемых участков заключаются в следующем:

1. Численное моделирование естественного состояния высокотемпературной гидротермальной системы позволило оценить параметры ее теплового и водного питания – расход восходящего потока глубинного теплоносителя и его энтальпию. При этом нет необходимости в детальном выяснении геометрии и состояния питающих магматических систем, что в большинстве случаев представляет собой неразрешимую задачу.

2. На участках Мутновского геотермального месторождения Дачный и Верхне-Мутновский выявлены зоны притока глубинного теплоносителя с температурой выше 300 °C. Согласно распределению температуры и давления в Мутновском резервуаре, основной приток флюида идет с юга вдоль субмеридиональной Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоны, а сток – вдоль зоны северо-восточного простирания.

3. Детализирована численная термогидродинамическая модель резервуара на участке Дачный. Модель описывает вскрытую скважинами продуктивную зону с учетом тепломассобмена между продуктивной зоной и вмещающим ее массивом. Результаты многовариантного моделирования эксплуатации позволяют уточнить условия ввода дополнительных скважин для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт эл. на участке Дачный в течение 15 лет эксплуатации. На модели показано:

- реинжекция на Северном полигоне (150 кг/с, 700 кДж/кг) не оказывает существенного влияния на характеристики добычных скважин;
- эффект реинжекции на Южном полигоне (150 кг/с, 700 кДж/кг) неоднозначен – глубокие скважины повышают производительность, неглубокие скважины пароконденсатной зоны выходят из эксплуатации;
- эксплуатация месторождения синхронизирована с притоком в гидротермальный резервуар сверху инфильтрационных вод метеорного происхождения с расходом около 60 кг/с.

В ходе дальнейших исследований предполагается выяснить, возможен ли рост мощности теплового питания месторождения при его эксплуатации, в частности, за счет энергетического потенциала Мутновского вулкана. Опыт термогидродинамического моделирования, суммированный в работе, можно применить к анализу материалов изучения, разведки и эксплуатации высокотемпературных Паужетской и Нижне-Кошелевской гидротермальных систем на Камчатке, что позволит оптимизировать их дальнейшее освоение.

## СПИСОК

### работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Vereina, O.B. (2003): Natural state modeling of the Mutnovsky geothermal field, Kamchatka, Russia. Report 21 // Geothermal training in Iceland 2003. UNU G.T.P., Iceland, Pp. 505-526.

2. Вереина О.Б. (2004): TOUGH2-моделирование естественного состояния Мутновского геотермального резервуара // Тр. Международного Геотермального Семинара 2004, Петропавловск-Камчатский, Россия, 9-15 августа 2004.

3. Сугробов В.М., Кононов В.И., Вереина О.Б. (2004): Перспективы использования геотермальных ресурсов Камчатки // Тр. Международного Геотермального Семинара 2004, Петропавловск-Камчатский, Россия, 9-15 августа 2004.

4. Сугробов В.М., Кононов В.И., Вереина О.Б. (2005): Перспективы использования геотермальных ресурсов Камчатки // Энергосбережение, 2005. № 2. С. 98-102. № 3. С. 76-78.

5. Kiryukhin, A.V., and Vereina, O.B. (2005): Modelling of the fault type geothermal reservoir (Dachny site, Mutnovsky geothermal field) // Proceed. 30<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, Cal., Jan. 31-Feb. 2, 2005. SGP-TR-176.

6. Vereina, O.B. (2005): Numerical modelling of the natural state of the Mutnovsky geothermal reservoir (Kamchatka, Russia) // Proceed. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

**7. Вереина О.Б., Кирюхин А.В., Кононов В.И. (2005)**: Тепловое питание Мутновской гидротермальной системы (Камчатка) // Избранные доклады VII междунар. Конф. «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, РГГРУ, апрель 2005 г). М.: ФГУП ГНЦ РФ – ВНИИгеосистем. С. 109-118.

8. Vereina, O.B. (2007): Output of thermal energy from Mutnovsky volcano (Kamchatka) and thermal feeding of Mutnovsky hydrothermal system // Proceed. 32<sup>nd</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, Cal., Jan. 22-24, 2007. SGP-TR-183.

**9. Вереина О.Б. (2007):** Термогидродинамическое моделирование естественного состояния Мутновского геотермального резервуара (Камчатка) // Литология и полезные ископаемые, 2007, №6. С. 583-593.

**10.Kiryukhin, A.V., Asaulova, N.P., Polyakov, A.Y., and Vereina, O.B.** (in press): Estimated effect of the exploitation induced infiltration in the Pauzhetsky and Mutnovsky geothermal fields, Kamchatka, Russia // Proceed. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April.