На правах рукописи

Мамаев Дмитрий Викторович

ТЕПЛОПЕРЕНОС В ПОРОДАХ КОШЕЛЕВСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В ЕСТЕСТВЕННОМ СОСТОЯНИИ И ПРИ ПЕРСПЕКТИВНОМ ПОЛУЧЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Петропавловск-Камчатский

2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-исследовательском геотехнологическом центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН)

Научный руководитель:	Пашкевич Роман Игнатьевич, доктор технических наук, доцент.
Официальные оппоненты:	Попов Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, Сколковский институт науки и технологий, профессор центра добычи углеводородов.
	Попов Владимир Иванович, кандидат технических наук, ФГБУН Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории горной теплофизики.
Ведущая организация:	ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 12 октября 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 999.101.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfrc.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук Корнеева Светлана Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время суммарная прогнозная мощность геотермальных систем на территории полуострова Камчатка составляет 4 – 5 ГВт. Установленная мощность всех типов электростанций Камчатского края по данным на 2017 год составила 648,8 МВт. Доля геотермальных электростанций в структуре установленной мощности – 11,4%. Одной из основных проблем топливно-энергетического комплекса Камчатского края является зависимость от привозного углеводородного топлива. Это в свою очередь определяет формирование высоких тарифов на электрическую и тепловую энергию. Повышение степени использования возобновляемых источников энергии способно стимулировать развитие Дальнего Востока России, в первую очередь Камчатского края и Курильских островов, и создать предпосылки перевода их энергетики на безтопливный вариант.

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. №1715р «Об энергетической Стратегией России на период до 2030 года» для достижения стратегической цели развития страны необходимо решить задачу максимального использования возможностей геотермальной энергетики для обеспечения тепло- и электроснабжения изолированных регионов, богатых геотермальными ресурсами (полуостров Камчатка, остров Сахалин, Курильские острова).

Приоритетной задачей согласно «Схеме и программе развития энергетики Камчатского края на 2018 – 2022 годы» является поэтапное увеличение использования местных возобновляемых энергетических ресурсов: на основе гидро- и геотермальных ресурсов.

В южной части Камчатского края действует Озерновский энергоузел. Максимальная мощность потребления составляет 7 МВт по данным на 2017 год. Основным производителем электрической энергии является Паужетская ГеоЭС установленной мощностью 12 МВт. Однако ее фактическая мощность ограничена на уровне 5,9 МВт из-за снижения потенциала Паужетского месторождения парогидротерм. В настоящее время дефицит электроэнергии восполняется дизельными электростанциями. На расстоянии около 18 км от Паужетского месторождения находится Кошелевская геотермальная система – крупное месторождение парогидротерм. При освоении его тепловых ресурсов возможно не только восполнение дефицита электроэнергии для существующих потребителей, но и реализация перспективного проекта по опыту Исландии: геотермального энерготехнологического комплекса промышленного получения водорода.

С 2008 года обсуждается проект, предложенный ООО «Клерос» и корпорацией «Нордурал», по строительству алюминиевого комбината мощностью до 833 тыс. т/год и морского порта в районе п. Озерновский, на расстоянии около 15 км от Кошелевской геотермальной системы. Предлагается использовать геотермальные ресурсы Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района для генерации электроэнергии (минимальный объем 300 МВт, целевой – 1000 МВт). Корпорация «Нордурал» владеет алюминиевым комбинатом производительностью 260 тыс. т/год, расположенным в Грундартанги, Исландия. Это единственный в мире алюминиевый комбинат, использующий геотермальную энергию в качестве основы своей деятельности (на 70%).

Ресурсы пара Кошелевского месторождения парогидротерм подсчитаны по категории C_2 в количестве 161 МВт. Прогнозная тепловая мощность Кошелевской геотермальной системы в целом оценивается до 943 МВт. Оценки прогнозной электрической мощности Кошелевской геотермальной системы существенно различаются: от 87 до 279 МВт по данным разных

источников. Следует отметить, что расчеты, основанные на тепловой энергии резервуара, являются приблизительными, т.к. характеристики самого резервуара и природного теплоносителя на больших глубинах являются предположительными. Например, Сугробовым В.М. была принята унифицированная вертикальная геометрия резервуара для ряда геотермальных месторождений Камчатки, в том числе и для Кошелевского: кровля на глубине 0,5 км, мощность – 2,5 км. Объем резервуара определялся по площади термопроявлений, которая в свою очередь выражается неоднозначными оценками с погрешностью не менее 30%.

Достоверных сведений об источнике теплового питания Кошелевской геотермальной системы также нет. Большинство исследователей на основании геологического строения и тектоники района в целом и вулканического массива в частности сходятся во мнении, что источником тепловой энергии является магматический очаг (или несколько), залегающий на относительно небольшой глубине. Конфигурация концентрических кольцевых разломных зон в районе вулканического массива дает основание полагать, что источниками тепла для современных тепловых аномалий могут быть несколько залегающих на разной глубине магматических очагов. Рассматривая совместное залегание основных и кислых магм, Вакин Е.А., Декусар З.Б., Сережников А.И., Спиченкова М.В. из-за недостатка данных не берутся судить, имеют ли эти магмы разобщенные источники или являются результатом дифференциации в одном очаге. Поздеев А.И., Нажалова И.Н. полагают, что поступление базальтовых магм к поверхности прерывалось более длительными периодами проникновения из мантии лишь газового флюида, который может проплавлять земную кору с образованием магматических камер.

Кирюхин А.В. выполнил термогидродинамическое моделирование Кошелевской геотермальной системы, в результате которого была показана способность неглубоко залегающего (на глубине 4 км) остывающего очага обеспечивать ее питание на протяжении 35 – 65 тыс. лет. Модель являлась гомогенной с константным коэффициентом проницаемости горных пород. Следует отметить, что целью моделирования было исследование на достоверность процесса остывания тела с аномально высокой температурой в недрах системы для проверки предположения о способности неглубоко залегающего очага обеспечивать наблюдаемый естественный вынос тепла в масштабе Кошелевского месторождения в целом. Не ставилась задача объяснить существование и локализацию конкретных термальных полей месторождения. Модель объясняла существование прогрева в западной части, но в ней отсутствовал подъем геоизотерм, соответствующих Нижне-Кошелевским термопроявлениям. Также она не объясняла возникновение Верхне-Кошелевских паровых струй.

В условиях возрастающего интереса к возобновляемым экологически чистым источникам энергии, в частности к геотермальным ресурсам, освоение Кошелевской геотермальной системы может способствовать решению одной из проблем совершенствования топливно-энергетического баланса Камчатского края. Однако по настоящее время не было исследовано пространственное распределение и изменение во времени термогидродинамических параметров теплоносителя при потенциальном освоении тепловых ресурсов по технологии геотермальной циркуляционной системы для получения электроэнергии.

Цель диссертационной работы – обоснование целесообразности освоения тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы на основе данных, полученных в результате исследования термогидродинамических процессов в породах системы методом численного моделирования.

Идея диссертационной работы состоит в использовании комплекса имеющихся данных о геологическом строении Кошелевской геотермальной системы для построения ее численной трехмерной термогидродинамической модели. Калибровкой разработанной термогидродинамической модели, выполненной по данным поискового бурения, обеспечить количественное соответствие между моделью и объектом исследования. Использовать разработанную модель для получения расчетного распределения термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя в горных породах геотермальной системы в естественном состоянии и в ходе освоения тепловых ресурсов.

Задачи исследования:

- разработка численной трехмерной термогидродинамической модели Кошелевской геотермальной системы на основе комплекса геолого-геофизических данных;
- калибровка термогидродинамической модели по данным поискового бурения для достижения соответствия между моделью и объектом исследования;
- получение с помощью вычислительных экспериментов распределения термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя в горных породах геотермальной системы в естественном состоянии и при освоении тепловых ресурсов;
- установление технологических параметров геотермальной циркуляционной системы для освоения тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы.

Методы исследований. Использована комплексная методика исследования, включающая анализ и обобщение натурных наблюдений за тепловым режимом Кошелевской геотермальной системы, анализ данных о ее геологическом строении, анализ мирового опыта использования технологии геотермальных циркуляционных систем для выработки электрической энергии, компьютерное моделирование процессов теплопереноса в породах Кошелевской геотермальной системы по технологии вычислительного эксперимента.

Научная новизна работы:

- разработана трехмерная термогидродинамическая модель Кошелевской геотермальной системы, учитывающая фазовые переходы геотермального теплоносителя в полном диапазоне возможных состояний (включая надкритическое), теплофизические свойства горных пород и теплоносителя в диапазоне температур и давлений до 1200°С и 1 ГПа соответственно, сложное геологическое строение, фактический рельеф дневной поверхности, калиброванная по данным термометрии;
- на основе вычислительных экспериментов на разработанной модели получено распределение термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя в горных породах Кошелевской геотермальной системы в естественном состоянии и при освоении тепловых ресурсов на Нижне-Кошелевском участке месторождения по технологии геотермальных циркуляционных систем;
- установлены технологические параметры геотермальной циркуляционной системы для перспективного освоения тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

1. Разработанная трехмерная численная термогидродинамическая модель Кошелевской геотермальной системы по результатам калибровочных экспериментов количественно описывает распределение параметров геотермального теплоносителя в проницаемых горных породах.

2. Исследование процессов теплопереноса в горных породах Кошелевской геотермальной системы возможно на основе разработанной трехмерной численной термогидродинамической модели, учитывающей надкритическое состояние геотермального теплоносителя в окрестности магматического очага.

3. На основе тепловых ресурсов Нижне-Кошелевского участка месторождения возможна эксплуатация пилотной ГеоЭС мощностью 6 МВт в течение 30 лет при разработке по технологии геотермальных циркуляционных систем с расходом теплоносителя 70 кг/с.

Практическая значимость работы:

- разработанная термогидродинамическая модель может быть использована при дальнейшем исследовании Кошелевской геотермальной системы;
- полученные данные о распределении термогидродинамических параметров в породах системы могут быть использованы при уточнении прогнозных геотермальных ресурсов;
- результаты термогидродинамического моделирования могут быть использованы для прогноза параметров геотермального теплоносителя при разработке ресурсов объекта;
- установленные технологические параметры геотермальной циркуляционной системы могут быть рекомендованы для проектирования пилотной системы освоения геотермальных ресурсов Кошелевской геотермальной системы.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечена:

- подробным анализом значительного объема предшествующих работ, содержащих данные об объекте исследования;
- использованием фундаментальных физических законов сохранения массы и энергии в основе численной модели теплопереноса;
- большим количеством (97) выполненных вариантов вычислительных экспериментов в широком диапазоне входных параметров;
- количественным соответствием полученных в работе результатов с натурными данными при среднем отклонении температур в скважинах 15,9%.

Личный вклад автора заключается в постановке цели, формулировке задач и разработке методики исследований, систематизации и обработке геологических, гидрогеологических, геотермических и вулканологических данных, модификации программного обеспечения для термогидродинамического моделирования, разработке вспомогательного программного обеспечения для обработки результатов, разработке численной термогидродинамической модели, выполнении вычислительных экспериментов и интерпретации полученных результатов.

Апробация диссертации

Содержание и основные положения диссертационной работы доложены: на заседаниях научно-исследовательского отдела НИГТЦ ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский в 2015-2018 годах; на VII Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов», Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, 2018 г.; на II Международной геотермальной конференции «GEOHEAT 2018», г. Петропавловск-Камчатский, 2018 г.; на III Международной геотермальной конференции «GEOHEAT 2019», г. Петропавловск-Камчатский, 2019 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 7 в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ, и 2 работы в научных изданиях, индексируемых в базе Scopus.

Благодарности. Автор благодарит Пашкевича Р.И. за научное руководство, постановку задач исследования и плодотворную критику.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен анализ предшествующих исследований Кошелевской геотермальной системы. Собран и проанализирован комплекс имеющихся данных о ее геологическом строении, стратиграфии, тектонических нарушениях, гидрологической и гидрогеологической обстановке, структуре геотермальных проявлений. Рассмотрены существующие в настоящее время концепции теплового питания и прогнозные оценки геотермальных ресурсов. Сформулированы цель и задачи исследований.

В главе 2 описана используемая технология вычислительного эксперимента, основная идея которого заключается в том, что эксперимент проводится не над реальным объектом (явлением или процессом), а на его абстрактной математической модели с помощью математических методов, применение которых характерно для теоретического уровня познания.

Математическая модель представляет собой систему уравнений, которая формируется на основе законов сохранения массы и энергии. Уравнения сохранения массы и энергии выражаются через величины первичных переменных: энтальпии и давления. Уравнение массопереноса основано на сохранении массы и законе Дарси для многофазной фильтрации в пористой среде:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\varphi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \frac{\mathbf{k} k_{rw} \rho_w}{\mu_w}(\nabla p + \rho_w \mathbf{g}) - \nabla \cdot \frac{\mathbf{k} k_{rs} \rho_s}{\mu_s}(\nabla p + \rho_s \mathbf{g}) - q_{sf} = 0$$

Уравнение теплопереноса основано на сохранении энтальпии всех фаз теплоносителя и породы:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\varphi(\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1-\varphi)\rho_r h_r] - \nabla \cdot K_a \mathbf{I} \nabla T + \nabla \cdot \varphi(S_w \rho_w h_w \mathbf{v}_w + S_s \rho_s h_s \mathbf{v}_s) - q_{sh} = 0$$

где p – давление теплоносителя; h – удельная энтальпия; T – температура; φ – пористость; ρ – плотность; S – насыщенность; $\mathbf{k}$ – тензор проницаемости среды; k_r – относительная фазовая проницаемость среды; μ – динамическая вязкость; K_a – эффективная теплопроводность насыщенной водой и паром породы; $\mathbf{v}$ – вектор скорости теплоносителя; $\mathbf{g}$ – вектор ускорения свободного падения; $\mathbf{I}$ – единичный тензор; q_{sf} – поток массы теплоносителя (положительный внутрь области); q_{sh} – поток энтальпии (положительный внутрь области); t – время; ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона; нижние индексы: w, s, r – для воды, пара и пород соответственно.

На основе имеющихся данных о геологическом строении Кошелевской геотермальной системы разработана трехмерная термогидродинамическая модель, которая включает массив горных пород, магматический очаг и тектонические нарушения. Массив горных пород состоит из девяти доменов, которые представляют в модели вулканические постройки, стратификационные единицы фундамента, субвулканические интрузивные тела, тектонические нарушения и термовыводящие каналы. В модели Кошелевской геотермальной системы представлены следующие тектонические нарушения: зона повышенной трещиноватости субширотного простирания; разлом северо-восточного простирания вдоль прогиба мелового фундамента; локальная тектоническая зона растяжения на Нижне-Кошелевском участке.

Действительная форма и размеры магматического очага неизвестны. Выполнены собственные оценки для последующего использования в качестве начального приближения при термогидродинамическом моделировании системы. Принят магматический очаг эллипсоидальной формы с длинами горизонтальных полуосей 5 и 1 км по гравиметрическим данным о заполнении магматическим материалом субширотной зоны повышенной проницаемости соответствующих размеров (Вакин Е.А. и др., 1976). Длина вертикальной полуоси 4,4 км и температура поверхности магматического очага 900°С приняты по собственной оценке методом ак. С.А. Федотова с помощью термодинамической модели проточного магматического очага (Fedotov S.A., 2000). Кошелевская геотермальная система приурочена к пересечению тектонического разлома северо-восточного простирания на границе прогиба мелового фундамента с более молодой субширотной зоной тектонической раздробленности (Леонов В.Л., 2001). Поэтому глубина залегания апикальной части магматического очага принята равной глубине залегания кровли мелового фундамента, оцененной в 3 км ниже уровня моря по комплексной интерпретации сейсмогравиметрических данных (Зубин М.И., 1980). Это значение близко к значению глубины залегания кровли (4 – 5 км) неглубокозалегающих магматических очагов в пределах Паужетской депрессии (Леонов В.Л., 1989), в которой находится Паужетско-Камбально-Кошелевская геотермальная провинция. Размеры и температура поверхности магматического очага варьируются при проведении численных экспериментов, поскольку являются оценочными параметрами.

Область моделирования представляет собой прямоугольный параллелепипед размером 17 км в широтном направлении, 6,8 км – в меридиональном и 9,3 км – в вертикальном. Границы области моделирования приводятся на рисунке 1. В качестве модельной системы координат используется трехмерная декартова система координат. Начало координат в модели соответствует самой западной южной точке области моделирования, находящейся на уровне моря. Ось x направлена горизонтально в широтном направлении с запада на восток; ось y – горизонтально в меридиональном с юга на север; ось z – вертикально снизу вверх.

Задание пространственных границ области моделирования Кошелевской геотермальной системы в плане производилось таким образом, чтобы в нее входили все главные элементы: основные интенсивные термопроявления (Верхне-Кошелевское и Нижне-Кошелевское термальные поля), магматический очаг и постройки всех вулканов массива. Нижняя граница области моделирования – это горизонтальная плоскость на глубине -7400 м ниже уровня моря, проходящая через центр эллипсоидального очага и рассекающая его на две равные части. Таким образом, магматический очаг представлен в модели в форме верхнего полуэллипсоида. Верхняя граница модели задана на отметке 1864 м над уровнем моря.

В главе 3 по результатам предварительного моделирования достигнуто качественное соответствие расчетных термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя с имеющимися натурными данными как на Нижне-Кошелевском участке, так и на Верхне-Кошелевском. Области перегретого пара и пароводяной смеси в этих моделях простираются вплоть до дневной поверхности на тех же участках, где в действительности происходит разгрузка Кошелевских парогидротерм. Размеры, форма и локализация апикальной части пароводяной зоны на Нижне-Кошелевском участке близки к верхней границе паровой зоны, оконтуренной по результатам буровых работ. В целом результаты вычислительного эксперимента демонстрируют качественное соответствие имеющимся данным о естественной разгрузке и результатах бурения. Это позволяет считать, что данная модель количественно

описывает Кошелевскую геотермальную систему, а заданные значения входных параметров близки реальным.

При выполнении работы выполнены численные эксперименты на 97 моделях, в которых варьировались различные параметры (таблица 1).

Таблица 1

Варьируемые параметры моделей в вычислительных экспериментах

Температура поверхности очага, °С	700; 900; 1000
Объем очага, км^3	39; 92
Коэффициент теплопроводности пород, Вт/м·К	1,53…2,73
Удельная теплоемкость пород, Дж/кг·К	832…1106
Пористость пород, %	2,55…10,00
Плотность пород, кг/м^3	2540…2900
Абсолютная проницаемость пород, м^2	$1\cdot10^{-16}$…$1\cdot10^{-14}$

Оценено влияние размера и температуры поверхности магматического очага на процессы теплопереноса в геотермальной системе. По результатам вычислительных экспериментов установлено, что модели с меньшим размером магматического очага демонстрируют меньшие температуры геотермального теплоносителя в системе. При увеличении температуры поверхности магматического очага в прилегающих областях горных пород увеличивается температура, и уменьшаются числа Нуссельта.

Методом численного эксперимента оценено влияние физических свойств горных пород (теплопроводности, теплоемкости, плотности, пористости и проницаемости) на процессы теплопереноса в геотермальной системе. Сравниваются числа Нуссельта в Кошелевской геотермальной системе при разных значениях физических свойств горных пород, чтобы оценить степень влияния отдельных свойств на теплоперенос в системе. В каждой модели значение одного из физических свойств пород (теплопроводность, теплоемкость, плотность, пористость, проницаемость) увеличено или уменьшено на 25% по сравнению с базовым значением. Установлено, что проницаемость горных пород оказывает наибольшее влияние на процесс конвекции и распределение температуры и фазового состояния теплоносителя в системе. Существование термоаномалий обеспечивается в случае преобладания конвективного теплопереноса над кондуктивным. Поэтому оценка влияния свойств пород на числа Нуссельта представляет больший интерес, чем влияние на термогидродинамические параметры теплоносителя (на его температуру, давление или фазовое состояние).

Необходимо отметить, что диапазон значений проницаемости горных пород, в котором осуществлено варьирование, является очень узким по сравнению с диапазоном, который возможен в реальных геологических условиях в недрах геотермальной системы. В действительности проницаемость пород может быть в гораздо более широком интервале значений 10^{-19} – 10^{-13} м^2. Напротив, диапазоны варьирования остальных физических свойств пород в моделях близки к диапазонам возможных в действительности значений.

Варьирование проницаемости приводит к более значительным изменениям термогидродинамического режима, чем варьирование других физических свойств горных пород. Проницаемость является предпочтительным параметром в качестве варьируемого для достижения соответствия между натурными и расчетными термогидродинамическими параметрами в силу следующих причин. Во-первых, непосредственно потому, что изменения проницаемости вызывают наибольший отклик системы. Во-вторых, потому, что значения

проницаемости являются наименее определенными в геологической среде по сравнению с другими физическими свойствами горных пород, которые с высокой степенью достоверности находятся в относительно узком интервале значений.

Для калибровки термогидродинамических моделей используются данные о температуре в продуктивных скважинах, которые были получены в результате бурения и опробования на Нижне-Кошелевском участке. В настоящее время отсутствуют натурные данные о термогидродинамических параметрах геотермального теплоносителя на глубине для других областей Кошелевской геотермальной системы. Поэтому калибровка выполняется только по Нижне-Кошелевскому участку.

На рисунке 1 изображена область моделирования и расположение скважин, температуры в которых использованы для калибровки. Строение моделей в разрезе и положение скважин изображено на рисунках 2 – 4. Физические свойства горных пород, слагающих Кошелевский вулканический массив и его фундамент в настоящее время не известны. Поэтому принимаются средние значения свойств горных пород в различных областях мира по справочным данным (Берч Ф., 1949; Корбанова В.Н., 1962; Кларк С.П. и др., 1969; Мельников Н.В. и др., 1975; Дортман Н.Б. и др., 1976; Шанина В.В. и др., 2013, 2015; Яновский Ф.А., 1989). Приоритет отдается свойствам горных пород, залегающих в геохронологических и стратиграфических условиях близких к имеющим место в Кошелевской геотермальной системе. Физические свойства доменов горных пород представлены в таблице 2. Проницаемость доменов является варьируемым параметром. В таблице 2 для справки приведен состав соответствующих отложений по результату анализа имеющихся геологических данных (Блукке П.П. и др., 1989; Вакин Е.А. и др., 1976; Леонов В.Л., 2001; Писарева М.В. и др., 1987; Апрелков С.Е. и др. 2001).

В качестве первого приближения калибровки использована модель, продемонстрировавшая качественное соответствие натурным данным. Время моделирования 40 тыс. лет.

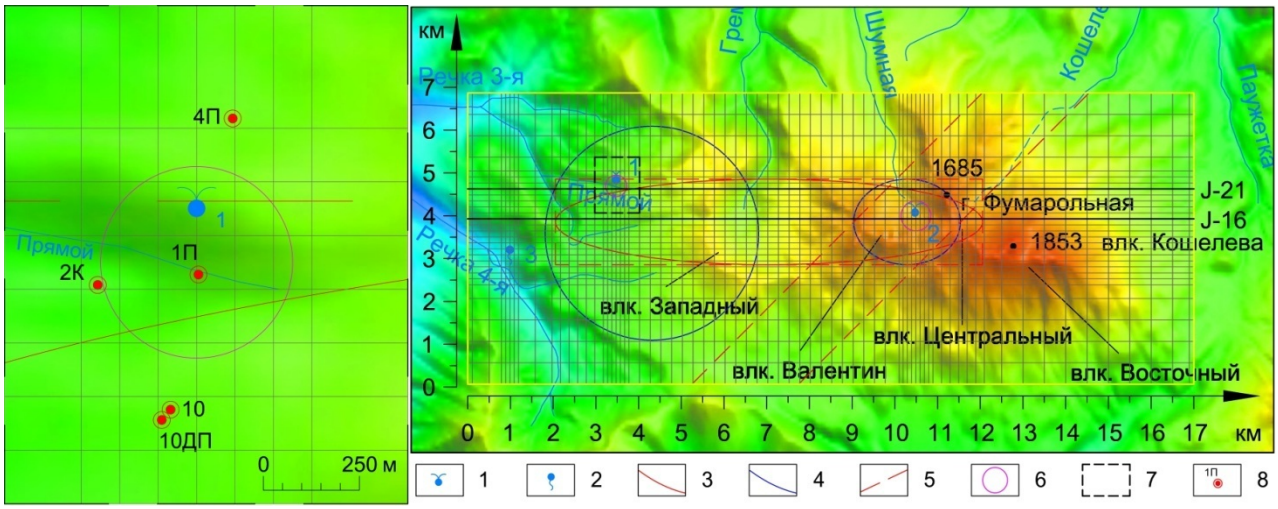

Рисунок 1. Область моделирования и схема расположения поисковых скважин 1975 – 1984 г.г. на вычислительной сетке. 1 – центральные выходы парогидротерм (1 – Нижне-Кошелевских; 2 – Верхне-Кошелевских); 2 – термальные источники (3 – Сивучинские); 3 – граница магматического очага; 4 – границы субвулканических интрузий; 5 – границы тектонически нарушенных зон; 6 – термовыводящие каналы; 7 – участок со скважинами в увеличенном масштабе слева; 8 – поисковые скважины, пробуренные в 1975 – 1984 г.г.; J-16, J-21 – номера разрезов.

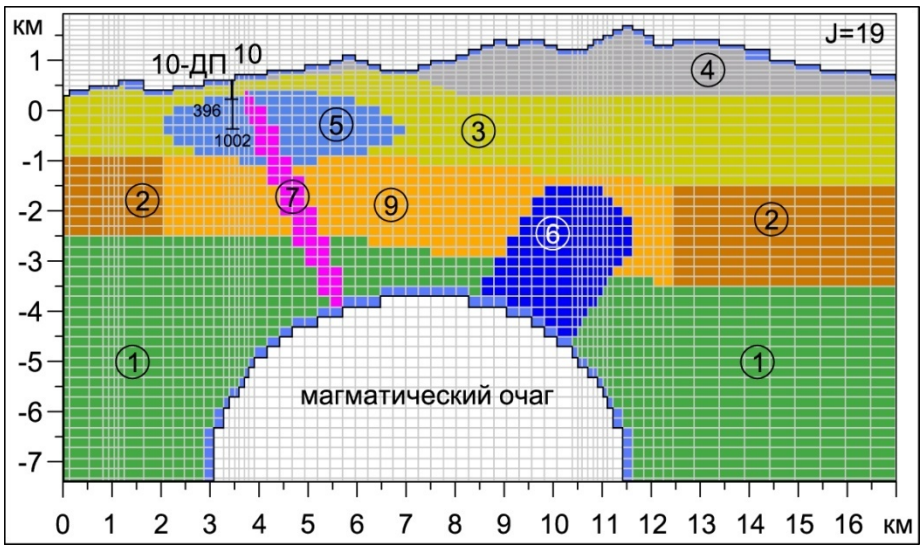

Рисунок 2. Строение модели на разрезе через скважины 10 и 10-ДП вдоль оси x.

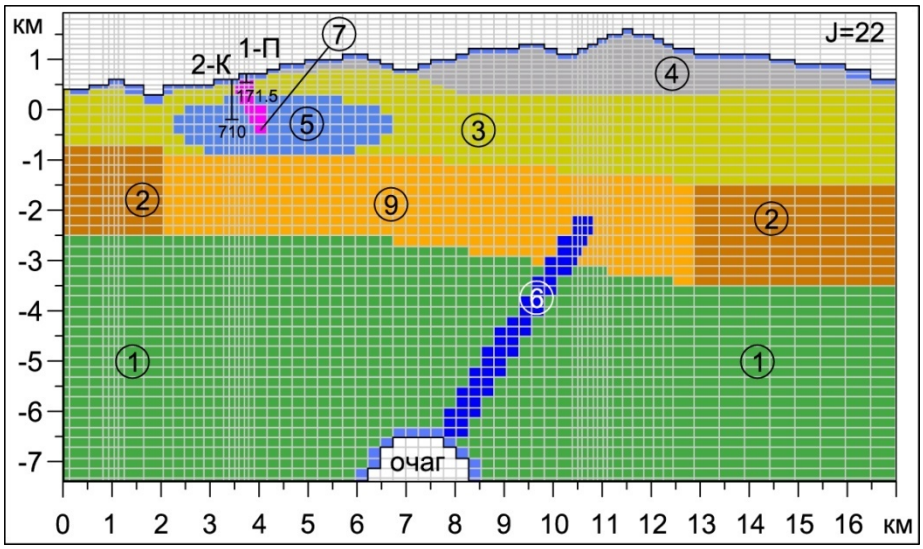

Рисунок 3. Строение модели на разрезе через скважины 1-П и 2-К вдоль оси x.

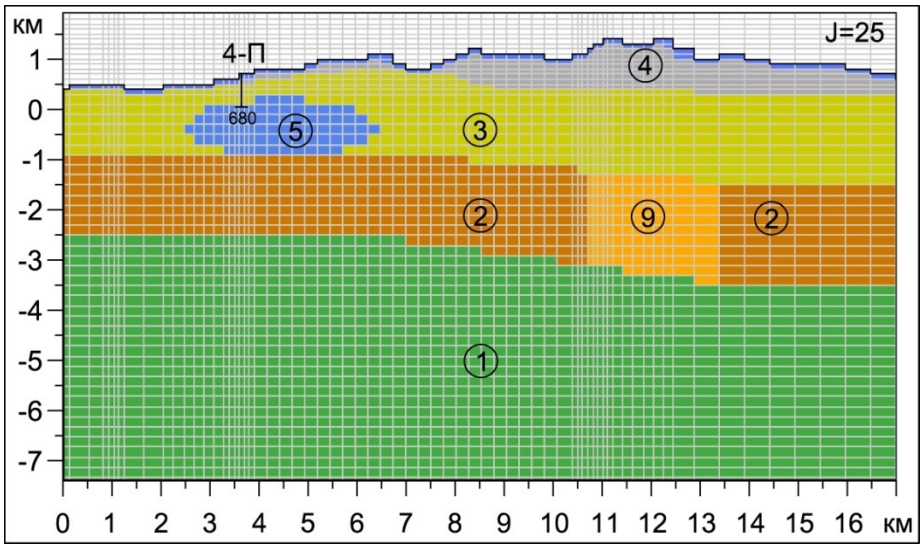

Рисунок 4. Строение модели на разрезе через скважину 4-П вдоль оси x.

Таблица 2

Физические свойства доменов горных пород

Номер домена	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м^3	Пористость, %	Сжимаемость, 10^{-5} МПа$^{-1}$	Проницаемость, м^2*	Состав
1	2,73	832	2540	10,00	3,50	$1{\cdot}10^{-16}$	вулканогенно-кремнистые сланцы, песчаники, алевролиты
2	2,38	832	2540	10,00	3,50	$1{\cdot}10^{-16}$	вулкано-терригенные песчаники, конгломераты и гравелиты
3	1,53	1089	2620	2,58	2,25	$1{\cdot}10^{-16}$	андезибазальтовые, андезитовые и базальтовые и туфы, туфоконгламераты, туфопесчаники, туфоалевролиты, туфы смешанного состава
4	1,55	1106	2630	2,55	2,28	$1{\cdot}10^{-16}$	базальтовые и андезитовые лавы и лавобрекчии, андезибазальтовые и долеритобазальтовые лавы, андезитодациты, дациандезиты, дациты, базальты, андезибазальтовые лавы и туфобрекчии
5	2,15	867	2900	8,70	1,55	$1{\cdot}10^{-16}$	с увеличением глубины: от роговообманковых дацитов и андезитодацитов до полнокристаллических диоритов
6	2,15	867	2900	8,70	1,55	$1{\cdot}10^{-15}$	долериты
7	1,55	1106	2630	2,55	2,28	$1{\cdot}10^{-15}$	*см. для домена 4*
8	1,55	1106	2630	2,55	2,28	$1{\cdot}10^{-15}$	*см. для домена 4*
9	2,38	832	2540	10,00	3,50	$1{\cdot}10^{-16}$	*см. для домена 2*

* – Начальная проницаемость. Этот параметр является варьируемым в моделях.

Калибровка термогидродинамической модели заключается в поиске таких значений входных параметров, при которых минимизируется отклонение расчетных значений от натурных данных. Как было установлено, проницаемость является предпочтительным параметром в качестве варьируемого для достижения соответствия между измеренными и расчетными термогидродинамическими параметрами в силу следующих причин. Во-первых, непосредственно потому, что изменения проницаемости вызывают наибольший отклик системы. Во-вторых, потому, что значения проницаемости являются наименее определенными в геологической среде по сравнению с другими физическими свойствами горных пород, которые более достоверно находятся в относительно узком интервале значений. Параметрами оптимизации являются проницаемости доменов 3, 5, 7 и 9 (рисунки 2 – 4).

Целевая функция представляет собой среднее линейное отклонение между температурой на забое скважины по данным термокаротажа и температурой блока пород, соответствующего положению забоя скважины в модели:

$$f(k_3, k_5, k_7, k_9) = \sum_{i=1}^{5} |T_i - T_{0i}| \Big/ 5 \ ,$$

где T_i – вычисленная температура на забое скважины i; T_{0i} – измеренная температура на забое скважины i; k_3, k_5, k_7, k_9 – проницаемости доменов 3, 5, 7 и 9 соответственно.

Для оптимизации использован метод деформируемого симплекса (метод Нелдера-Мида), который сохраняет сходимость на овражных функциях. Последнее важно потому, что отклик

системы на изменение параметра k_7 может отличаться на порядки от откликов на изменение параметров k_3, k_5 и k_9, как показали результаты предварительного моделирования.

В каждой скважине температура на забое является максимальной по имеющимся данным. Выполнено 25 численных экспериментов на термогидродинамических моделях с различными значениями проницаемости. На рисунке 5 представлено распределение температуры и фазового состояния теплоносителя в модели, показавшей значения температур наиболее близкие к натурными данными при параметрах: k_3 = 1,22·10^{-16} м^2; k_5 = 6,46·10^{-17} м^2; k_7 = 2,31·10^{-15} м^2; k_9 = 4,92·10^{-17} м^2. В таблице 3 представлен результат численного эксперимента на этой термогидродинамической модели.

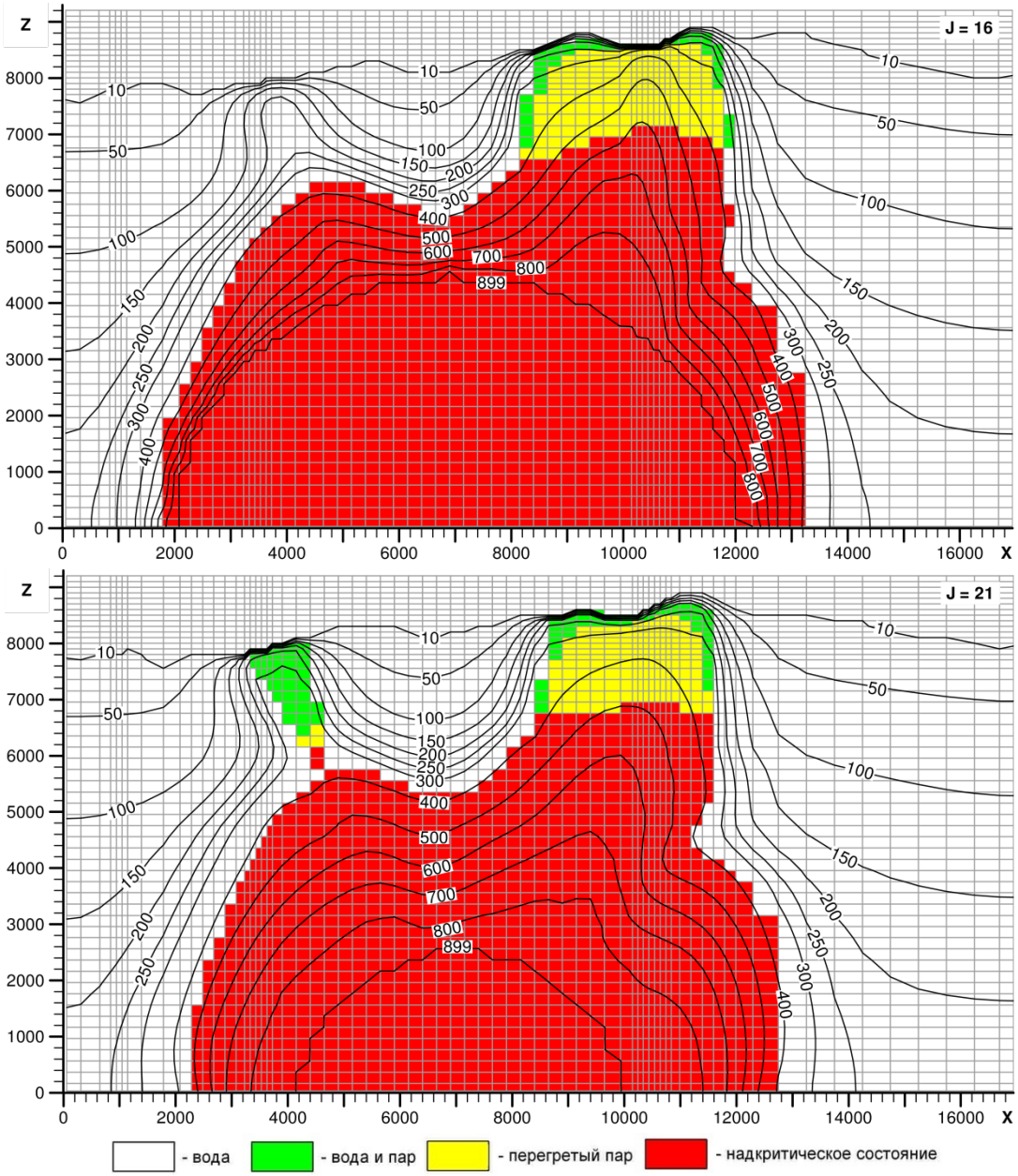

Рисунок 5. Распределение температуры (°C) и фазового состояния теплоносителя, полученные в численном эксперименте на модели, откалиброванной по результатам измерения температуры на забое скважин. В правом верхнем углу – номер разреза (положение разрезов – на рисунке 1).

Таблица 3

Температуры на забоях скважин, полученные в численном эксперименте на модели, откалиброванной по результатам измерений.

	Температура на забое скважин, °С					**Среднее отклонение**
	1-П	**2-К**	**4-П**	**10**	**10-ДП**	
Численный эксперимент	226,6	232,3	168,5	218,5	262,4	–
Измерения	192,0	232,0	205,0	226,2	187,7	–
Отклонение, °С	34,6	0,3	-36,5	-7,5	75,4	**30,9**
Отклонение, %	18,0	0,1	-17,8	-3,3	40,3	**15,9**

Среднее отклонение температур на забое скважин составило 30,9 °С, или 15,9%. Наибольшее отклонение по модулю 40,3% по скважине 10-ДП. Откалиброванная модель может быть использована для дальнейшего исследования пространственного распределения термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя и их изменений в ходе разработки геотермального коллектора Кошелевской системы с помощью численных экспериментов.

В главе 4 на основе разработанной и откалиброванной по фактическим данным численной термогидродинамической модели Кошелевской геотермальной системы производится оценка технологических параметров геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) на Нижне-Кошелевском участке месторождения. Результаты численного эксперимента на откалиброванной термогидродинамической модели на конечный момент времени моделирования представляют распределение термогидродинамических параметров в системе в естественном состоянии и использованы в качестве начальных условий для определения термогидродинамических параметров теплоносителя при эксплуатации ГЦС. На рисунке 6 показаны распределение температуры на глубине 2000 м и предполагаемая схема заложения скважин.

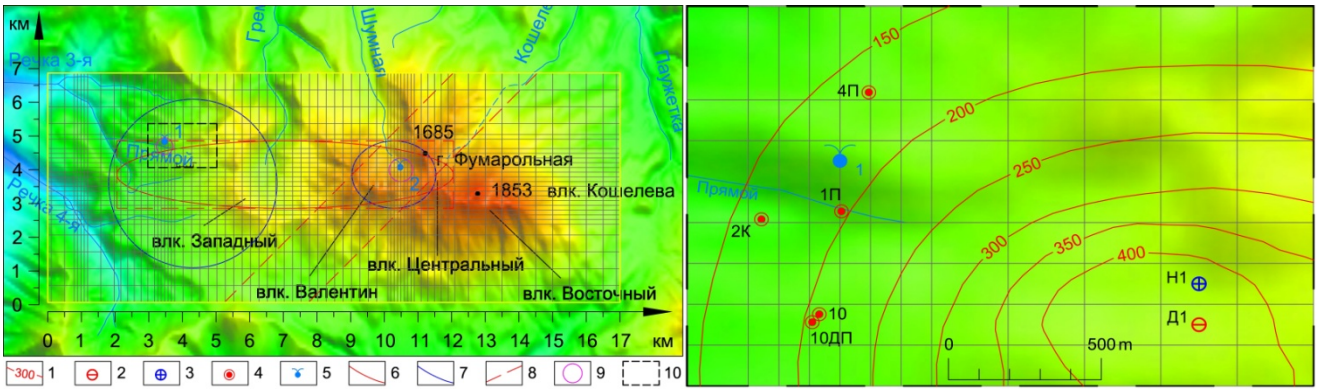

Рисунок 6. Распределение температуры (°С) на глубине 2000 м в горных породах Нижне-Кошелевского участка и предполагаемая схема заложения скважин ГЦС. 1 – Изотермы (°С) по результатам численного эксперимента на откалиброванной модели; 2 – добычная скважина Д1; 3 – нагнетательная скважина Н1; 4 – существующие поисковые скважины; 5 – центральные выходы парогидротерм (1 – Нижне-Кошелевских; 2 – Верхне-Кошелевских); 6 – граница магматического очага; 7 – границы субвулканических интрузий; 8 – границы тектонически нарушенных зон; 9 – термовыводящие каналы, представленные в модели; 10 – участок со скважинами в увеличенном масштабе справа.

Схема разработки геотермальной циркуляционной системы предполагает бурение нагнетательной и добычной скважин глубиной 2000 м. Места их заложения и глубина забоя заданы на основе анализа пространственного распределения термогидродинамических параметров геотермальной системы в естественном состоянии и положением области горных пород с высокой проницаемостью. Схема предполагает реинжекцию отработанного теплоносителя в систему через нагнетательную скважину. В расчетах принимается температура нагнетаемого теплоносителя равная 80°С. Удельная энтальпия нагнетаемого теплоносителя 342 кДж/кг соответствует этой температуре при давлении 8,3 МПа на устье нагнетательной скважины.

Проведено термогидродинамическое моделирование эксплуатации системы при расходе теплоносителя 70 кг/с. На рисунках 7 и 8 представлены изменения термогидродинамических параметров теплоносителя на забое скважин при эксплуатации в течение 30 лет.

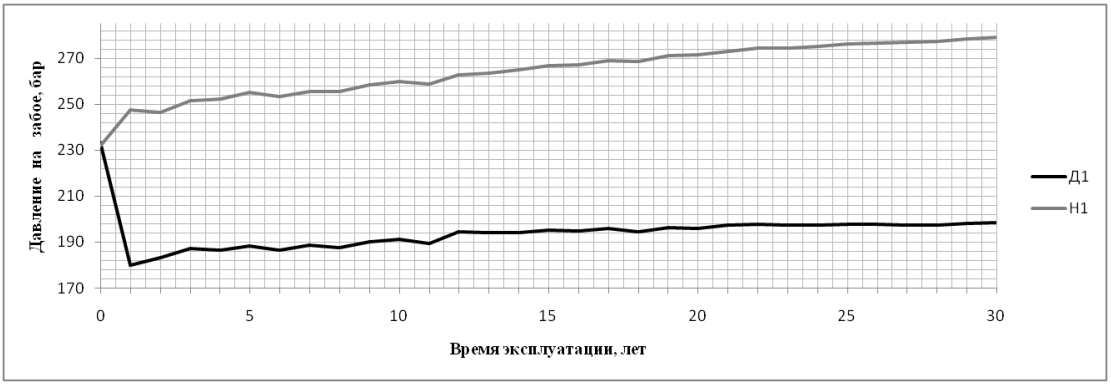

Рисунок 7. Изменение давления на забое скважин при эксплуатации.

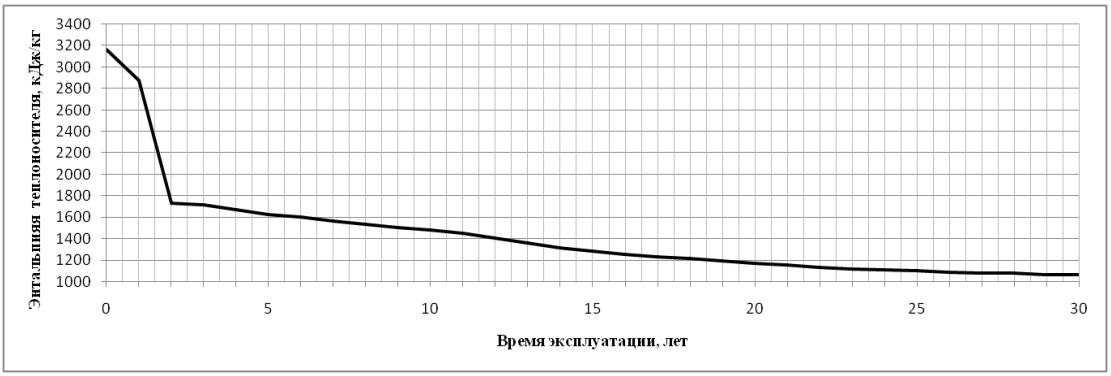

Рисунок 8. Изменение удельной энтальпии добываемого теплоносителя при эксплуатации.

Через 2 года после начала эксплуатации в скважинах наблюдается стабилизация давления и энтальпии. Отмечается медленное уменьшение энтальпии добываемого теплоносителя в добычной скважине Д1 и небольшой рост давления на забое нагнетательной скважины Н1 в течение всего периода разработки. Динамика общей тепловой мощности геотермальной циркуляционной системы и ее импеданса представлены на рисунках 9 и 10 соответственно при различных значениях общего расхода теплоносителя: при 30, 50 и 70 кг/с.

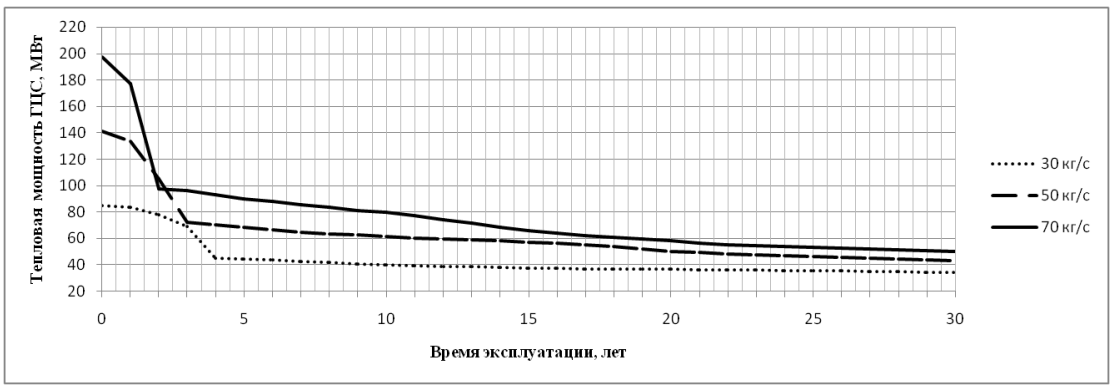

Рисунок 9. Изменение тепловой мощности геотермальной циркуляционной системы в течение времени эксплуатации при разных значениях суммарного расхода теплоносителя.

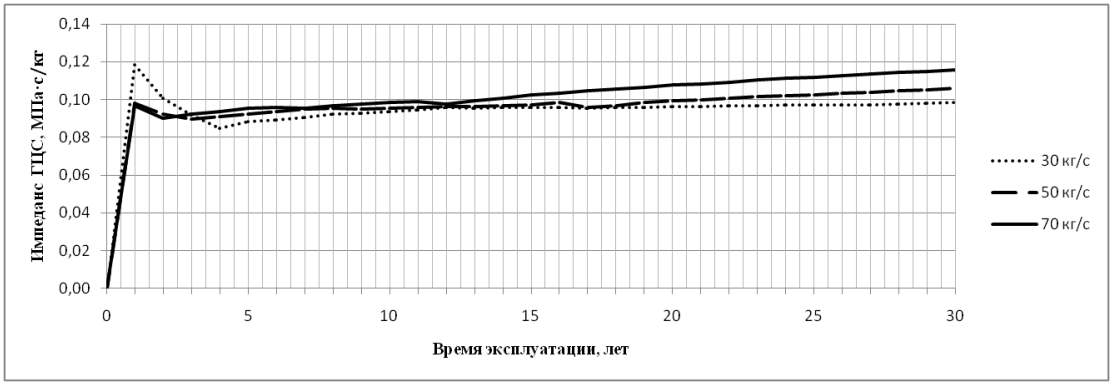

Рисунок 10. Изменение импеданса геотермальной циркуляционной системы в течение времени эксплуатации при различных значениях суммарного расхода теплоносителя.

В течение первых двух лет геотермальная циркуляционная система входит в стабильный режим работы с последующим медленным падением тепловой мощности до 50,3 МВт к концу срока эксплуатации при общем расходе теплоносителя 70 кг/с. При изменении расхода происходит соответствующее небольшое изменение значений тепловой мощности и импеданса, что свидетельствует об устойчивости геотермальной циркуляционной системы при небольших изменениях режима извлечения и реинжекции теплоносителя. Циркуляционная система при расходе теплоносителя 70 кг/с может обеспечить работу ГеоЭС электрической мощностью 6 МВт к концу периода эксплуатации (рисунок 11).

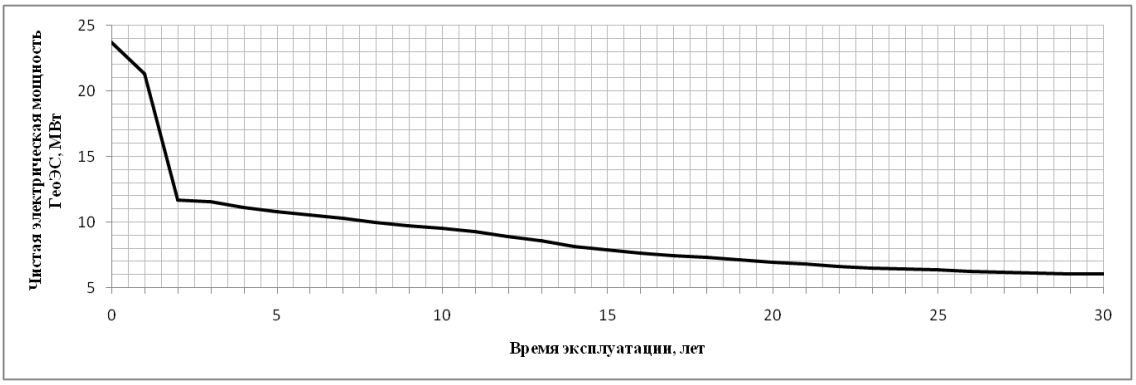

Рисунок 11. Чистая электрическая мощность ГеоЭС при расходе теплоносителя 70 кг/с.

На интервале времени эксплуатации 2 – 30 лет мощность медленно падает от 12 до 6 МВт. Отклонение профиля производительности не превышает 32% от средней величины на интервале.

Геотермальные ресурсы Нижне-Кошелевского участка месторождения предлагается разрабатывать для получения электроэнергии. Освоение участка может быть реализовано по технологии геотермальной циркуляционной системы. Возможно строительство ГеоЭС со следующими параметрами: чистая электрическая мощность – 6 МВт; система разработки – 1 добычная и 1 нагнетательная скважина; глубина скважин – 2000 м; общий расход теплоносителя – 70 кг/с; температура реинжекции – 80°С (энтальпия – 342 кДж/кг при давлении 8,3 МПа на устье нагнетательной скважины); период эксплуатации – 30 лет.

Капитальные затраты на реализацию проекта включают в себя расходы на разведочные работы, бурение и обустройство скважин, строительство системы транспорта теплоносителя, ГеоЭС, трансформаторной подстанции и линии электропередачи (таблица 4).

Таблица 4

Расчетные технико-экономические показатели проекта ГеоЭС мощностью 6 МВт

Капитальные затраты, млн. руб.	
Разведочные работы	30
Бурение и устьевая обвязка 6-ти скважин	423
Система транспорта теплоносителя	27
Оборудование ГеоЭС	250
Трансформаторная подстанция	36
Линия ВЛ 110 кВ	250
Здания и сооружения	250
Всего капитальных затрат	**1266**
Эксплуатационные затраты, млн. руб./год	
ГеоЭС, скважины, подстанция, ВЛ и др. (с учетом амортизации)	9
Годовой бюджет предприятия	9
Всего эксплуатационных затрат	**18**
Расчетная себестоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	**4,53**
Отпускной тариф ПАО «Камчатскэнерго» для потребителей Центрального энергоузла во 2-ом полугодии 2018 г., руб./кВт·ч	**5,11**

При строительстве ГеоЭС предполагается возведение следующих зданий и сооружений: главный корпус ГеоЭС, корпус сепараторной и насосной станции, вентиляторная градирня, склад ГСМ, жилой корпус.

Оценка финансово-экономической эффективности проекта ГеоЭС на Нижне-Кошелевском участке Кошелевского месторождения выполнена при нижеперечисленных исходных данных.

Общая продолжительность жизненного цикла проекта – 32 года. Продолжительность строительства ГеоЭС – 2 года. Продолжительность эксплуатации ГеоЭС – 30 лет. Полезный отпуск электрической энергии – 41,3 млн. кВт·ч/год при коэффициенте использования установленной мощности – 78,5%. Отпускной тариф на электроэнергию принят равным 5,11 руб./кВт·ч по аналогии с экономически обоснованным тарифом на электрическую энергию, поставляемую ПАО «Камчатскэнерго» потребителям во 2-ом полугодии 2018 года. Рост цен на

оптовом рынке электроэнергии принят равным 4,0% в соответствии с «Прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на 2018 год и на плановый период 2019 и 2020 годов» Министерства экономического развития РФ от сентября 2017 года. Ставка дисконтирования 11,12% годовых рассчитана на основании значения кривой бескупонной доходности государственных облигаций при сроке погашения 30 лет по данным ЦБ РФ на май 2018 года.

В таблице 5 приведены расчетные значения показателей финансово-экономической эффективности реализации проекта ГеоЭС мощностью 6 МВт на Нижне-Кошелевском участке месторождения.

Таблица 5

Финансово-экономические показатели проекта ГеоЭС

Показатель	**Значение**
Чистая приведенная стоимость (NPV)	1038 млн. руб.
Дисконтированный срок окупаемости (DPP)	12 лет
Простой срок окупаемости (PP)	8 лет
Внутренняя норма доходности (IRR)	18,4%

Результаты выполненной финансово-экономической оценки показывают, что проект может быть рентабельным и конкурентоспособным на рынке электроэнергии Камчатского края.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой содержится решение актуальной задачи количественной оценки термогидродинамических условий в породах Кошелевской геотермальной системы и установления технологических параметров разработки ее тепловых ресурсов по технологии геотермальной циркуляционной системы. Основные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. Разработана численная трехмерная термогидродинамическая модель Кошелевской геотермальной системы на основе имеющихся геолого-геофизических данных, которая учитывает сложное геологическое строение, фактический рельеф дневной поверхности и надкритическое состояние геотермального теплоносителя.

2. Обеспечено количественное соответствие между объектом исследования и разработанной численной термогидродинамической моделью посредством выполнения калибровки по имеющимся данным поискового бурения.

3. Установлены закономерности распределения термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя в горных породах Кошелевской геотермальной системы в естественном состоянии.

4. Исследовано изменение термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя в породах Кошелевской геотермальной системы в ходе освоения тепловых ресурсов на Нижне-Кошелевском участке месторождения посредством разработки по технологии геотермальной циркуляционной системы, состоящей из добычной и нагнетательной скважин глубиной 2000 м, при общем расходе теплоносителя 70 кг/с.

5. Установлены технологические параметры геотермальной циркуляционной системы освоения тепловых ресурсов Нижне-Кошелевского участка месторождения, при которых в течение 30 лет возможна экономически эффективная эксплуатация пилотной ГеоЭС мощностью 6 МВт.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией:

1. Мамаев, Д.В. Тепловые ресурсы Кошелевской магматогенной геотермальной системы / Д.В. Мамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – С. 214-222.

2. Пашкевич, Р.И. О расходе магмы Кошелевской геотермальной системы / Р.И. Пашкевич, Д.В. Мамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – С. 228-233.

3. Мамаев, Д.В. Термогидродинамическое моделирование Кошелевской геотермальной системы на Камчатке / Д.В. Мамаев, Р.И. Пашкевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12, Специальный выпуск № 40 «Камчатка-4». – С. 15-30.

4. Мамаев, Д.В. Оценка размеров магматического очага Кошелевской геотермальной системы / Д.В. Мамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 12, Специальный выпуск № 35 «Камчатка-6». – С. 33-49.

5. Мамаев, Д.В. Калибровка термогидродинамической модели Кошелевской геотермальной системы методом деформируемого симплекса / Д.В. Мамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12, Специальный выпуск № 59 «Камчатка-8». – С. 187-199.

6. Пашкевич, Р.И. Технико-экономическая оценка эффективности разработки тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы / Р.И. Пашкевич, Д.В. Мамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12, Специальный выпуск № 59 «Камчатка-8». – С. 259-267.

7. Пашкевич, Р.И. Численная термогидродинамическая модель эксплуатации Кошелевской геотермальной системы / Р.И. Пашкевич, Д.В. Мамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12, Специальный выпуск № 59 «Камчатка-8». – С. 268-278.

В научных изданиях, индексируемых в базе Scopus:

8. Mamaev, D. Estimation of the thermo-hydrodynamic parameters of the coolant in the Koshelev geothermal system / D. Mamaev // Proceedings of VII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», Khabarovsk. E3S Web of Conferences. – 2018. – № 56. – 6 p.

9. Pashkevich, R.I. Thermo-hydrodynamic model of the Koshelev geothermal system, Kamchatka, Russia / R.I. Pashkevich, D.V. Mamaev // Proceedings of 3rd International Geothermal Conference, GEOHEAT 2019. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – V. 367. – 2019.

Подписано в печать 31.05.2021 г.
Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 1. уч.-изд. л.1,0.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИП Романенко М.И.
683000, г. Петропавловск-Камчатский,
ул. Ленинская, 46. Тел. +7 (4152) 423-008