

На правах рукописи



ПАВЛОВ Кирилл Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОРОДАХ АВАЧИНСКОЙ
ПЛОЩАДИ В ЕСТЕСТВЕННОМ СОСТОЯНИИ И ПРИ ПЕРСПЕКТИВНОМ
ПОЛУЧЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ**

*Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных
пород, рудничная аэрогазодина-
мика и горная теплофизика*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Петропавловск-Камчатский – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук Пашкевич Роман Игнатьевич

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 17 октября 2017 г. в 10⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.101.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела 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: 8(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000 г. Хабаровск, ул. Тургенева д. 51 и на сайте института www.igd.khv.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Корнеева Светлана Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные темпы развития промышленности крупных стран в условия глобального истощения традиционных видов топлива требуют поиска и повышения степени использования возобновляемых источников энергии. Немалую долю в топливно-энергетическом балансе нашей страны может составить геотермальная энергетика, что особенно перспективно для Камчатки. Уже в настоящее время до 30% энергопотребления центрального энергоузла Камчатского края обеспечивается за счет геотермальных источников. Однако, согласно ежегодного доклада Геотермальной Энергетической Ассоциации (США), среди стран мира, использующих геотермальную энергию, Россия занимает только 14 место с показателем установленной мощности ГеоЭС в 97 МВт, при этом большая ее часть приходится на Камчатку. Более того, потенциальные запасы геотермальной энергии в регионе превышают 2 ГВт.

В настоящее время, на эксплуатируемых месторождениях Камчатки, в качестве энергоресурса используется однофазный теплоноситель (пар или вода), либо пароводяная смесь. Эффективность преобразования тепловой энергии данного теплоносителя в электрическую незначительна, вследствие его невысокого эксергетического потенциала. С учетом мирового уровня развития технологий бурения и обустройства скважин в высокотемпературных зонах, последние годы привлекает внимание, прежде всего с экономической точки зрения, разработка областей близповерхностных магматических очагов. В недрах таких систем существуют Р-Т условия для формирования надкритических областей флюида. Добычные скважины, пробуренные в такие области, будут иметь более высокую энтальпию добываемого флюида и более высокую продуктивность, чем скважины на месторождениях парогидротерм. Глубокие скважины, пробуренные на месторождениях Geysers и Salton Sea (США), Kakkonda (Япония), Larderello (Италия), Krafla (Исландия) и Los Humeros (Мексика), вскрыли на забое области с температурой, превышающей критическую точку воды – 374°C. На Камчатке наличие близповерхностных магматических очагов подтверждено геофизическими исследованиями на Ключевской и Авачинско-Корякской группе вулканов.

Лабораторное исследование процессов теплопереноса, протекающих в таких системах при высоких термодинамических параметрах, требует наличия дорогостоящего оборудования и значительного времени исследования. В связи с чем, в последнее время, в мире получило развитие численное моделирование гидрогеотермальных и магматогенно-геотермальных процессов в геотермальных системах. В качестве инструментов используются различные программные комплексы (ПК), в том числе свободно распространяемый ПК HYDROTHERM. Используемые в численных экспериментах математические модели основываются на фундаментальных законах сохранения массы и энергии, чем обеспечивается достоверность получаемых результатов, при условии адекватной калибровки численных моделей по всей совокупности доступных фактических данных.

В последнее время Авачинская геотермальная площадь вновь стала привлекать внимание как перспективный источник энергоснабжения для г. Петропавловска-Камчатского. В 2015 г. НИГТЦ ДВО РАН в рамках контракта с КГБУ «Региональный центр развития энергетики и энергосбережения» выполнил работы по исследованию геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов. С 2016 г. начаты работы по оценке теплоэнергетического потенциала Авачинской геотермальной площади, проводимые АО «Росгеология» при участии НИГТЦ ДВО РАН. В связи с этим, исследование

теплопереноса в горных породах Авачинской геотермальной площади весьма актуально и необходимо как часть комплекса исследований системы.

Работы по моделированию процессов теплопереноса с целью оценки тепловых ресурсов Авачинской площади выполнялись ак. Федотовым С.А., Сугробовым В.М., Уткиным И.С., Уткиной Л.И., Поляком Б.Г., Кирюхиным А.В., Пашкевичем Р.И. Однако, в большинстве случаев, в моделях этих авторов не учитывался фактический рельеф дневной поверхности и исследование теплопереноса в моделях выполнено только для случая кондуктивной теплопроводности в горных породах, без учета конвективной составляющей и возможного формирования областей с надкритическими термодинамическими условиями.

Технология геотермальных циркуляционных систем в докритических термодинамических условиях геотермального коллектора была разработана в трудах Аладьева И.Т., Ароновой Н.Н., Артемьевой В.Л., Богуславского Э.И., Вознюка Л.Ф., Гендлера С.Г., Дядькина Ю.Д., Егорова А.Г., Забарного Г.Н., Кононенко Г.Н., Кремнева О.А., Мерзлякова Э.И., Морозова Ю.П., Павлова И.А., Парийского Ю.М., Пашкевича Р.И., Пискачевой Т.Ю., Пудовкина А.М., Романова В.А., Рыженко И.А., Саламатина А.Н., Смирновой Н.Н., Трусова В.Н., Цырульников А.С., Шурчкова А.В. Работы при надкритических начальных условиях немногочисленны и выполнены лишь в трудах Пашкевича Р.И. и Таскина В.В. для системы скважин типа «триплет» (две добычных и одна нагнетательная). В работах Шулюпина А.Н. разработаны модели течения пароводяной смеси в системах добычи и транспортировки геотермального теплоносителя, а также методы измерения расходных параметров пароводяных скважин.

Цель диссертационной работы состоит в установлении рациональных схем извлечения теплового потенциала Авачинской геотермальной площади на основе исследования теплофизических процессов в массиве горных пород методом численного моделирования.

Идея диссертационной работы заключается в использовании выявленных закономерностей теплопереноса в горных породах методом численного моделирования, для установления зон пород с надкритическим флюидом, а также для обоснования рациональных схем циркуляционных скважинных систем при получении геотермальной энергии.

Задачи исследования:

- разработка концептуальной модели Авачинской геотермальной площади;
- разработка трехмерной численной термогидродинамической модели Авачинской геотермальной площади;
- установление на базе численных экспериментов распределения температуры и фазового состояния флюида в горных породах системы в принятом и обоснованном диапазоне параметров;
- выполнение численных экспериментов по исследованию теплофизических и гидродинамических параметров надкритического теплового коллектора при его разработке по циркуляционной скважинной технологии типа «дублет» (одна нагнетательная и одна добычная скважины);
- установление рациональных технологических параметров циркуляционной системы типа «дублет» с целью освоения тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади.

Методы исследований

Принята комплексная методика исследования, включающая: обобщение и анализ натуральных наблюдений за тепловым режимом Авачинской геотермальной площади, анализ мирового опыта использования технологии геотермальных циркуляционных систем для выработки тепловой и электрической энергии, компьютерное моделирование процессов теплопереноса в породах Авачинской геотермальной площади и в надкритическом геотермальном коллекторе.

Научная новизна работы:

- разработана трехмерная термогидродинамическая модель Авачинской геотермальной площади, учитывающая: фазовые переходы теплоносителя в полном диапазоне возможных состояний (надкритический флюид, перегретый пар, сухой насыщенный и влажный пар, жидкость), теплофизические свойства горных пород и теплоносителя в диапазоне температур и давлений 1200°C и 1 ГПа, наличие зон повышенной проницаемости горных пород, а также фактический рельеф поверхности геотермальной системы;

- на базе разработанной модели установлены закономерности распределения температуры и фазового состояния флюида в массиве горных пород геотермальной системы;

- получены закономерности распределения температуры, давления, водонасыщенности и фазового состояния флюида в продуктивном коллекторе перспективной циркуляционной системы при условиях, соответствующих начальным термодинамическим надкритическим условиям Авачинской геотермальной площади;

- оценены технико-экономические показатели перспективного проекта разработки тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади по циркуляционной технологии типа «дублет».

Основные защищаемые положения

1. Исследование процессов теплопереноса Авачинской геотермальной площади возможно на базе разработанной трехмерной термогидродинамической модели, включающей массив горных пород, вмещающих конвектирующий близповерхностный магматический очаг с постоянной температурой стенки.

2. При установленных размерах и глубине залегания очага область горных пород с температурой 200–400°C, достаточной для получения высокопотенциального теплоносителя, может находиться на удалении до 3-х км от стенки очага и на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности. Тепловое поле очага влияет на распределение температуры в породах системы на удалении до 6 км.

3. Эксплуатация перспективной циркуляционной системы типа «дублет», на базе тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади, возможна в течение 40 лет с дебитом скважин 20 кг/с, при этом, забой нагнетательной скважины в зоне естественной или искусственно созданной проницаемости следует располагать на расстоянии 800 м выше забоя добычной скважины с целью повышения эффективности работы системы и снижения капитальных затрат на бурение.

Практическая значимость работы

- результаты численного моделирования могут быть использованы при дальнейших исследованиях и освоении геотермальных ресурсов Авачинской площади;

- прогнозные параметры Авачинской геотермальной площади позволяют оценить энергетический потенциал объекта при его освоении в перспективе;

- установленные технологические параметры геотермальной циркуляционной системы типа «дублет» могут быть рекомендованы для проектирования опытной геотермальной циркуляционной системы при освоении ресурсов объекта;

- результаты диссертационной работы предложены в 2015 г. КГБУ «Региональный центр развития энергетики и энергосбережения» для внедрения, в ходе выполнения НИГТЦ ДВО РАН научно-исследовательской работы «Исследование геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов».

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается:

- использованием в численных экспериментах теплофизических свойств пород, полученных по результатам лабораторных исследований образцов горных пород Авачинской площади;

- комплексом накопленной геолого-геофизической информации об объекте исследования;

- значительным количеством выполненных вариантов численных экспериментов в широком диапазоне исходных параметров;

- использованием фундаментальных законов сохранения массы и энергии в основе численной модели теплопереноса.

Личный вклад автора заключается:

- в постановке цели, формулировке задач и разработке методики исследований, систематизации и обработке геофизических, геологических, гидрогеологических данных, а также данных по геотермическому режиму Авачинской геотермальной площади, разработке модели, выполнении численных экспериментов и интерпретации полученных результатов, а также обработке их на ЭВМ, разработке практических рекомендаций;

- в участии в проведении комплекса натурных исследований, включающих: режимные измерения геотемпературного поля, отбор проб воды и интерпретацию данных результатов химического анализа, отбор проб горных пород для определения теплофизических свойств, площадное магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) и глубинное магнитотеллурическое зондирование (ГМТЗ).

Апробация диссертации

Содержание и основные положения диссертационной работы были доложены на: Ученых советах НИГТЦ ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский в 2012-2017 гг. и Института горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск в 2017 г.; 5-ой Международной молодежной научной конференции «Будущее науки – 2017», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, 2017 г.; Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2017», Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, 2017 г.; 2-ом Международном научно-практическом форуме «Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона», г. Хабаровск, 2017 г.

Публикации: Основное содержание диссертации изложено в 11 опубликованных работах, в том числе 9 в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ.

Благодарности

Автор благодарит Пашкевича Р.И. за научное руководство, постановку задач исследования, плодотворную критику, действенную поддержку и помощь на всех этапах работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ результатов ранее выполненных натуральных исследований теплового режима Авачинской геотермальной площади, выявлены основные характеристики системы как объекта освоения с целью использования ее тепловых ресурсов, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе по комплексу накопленной геолого-геофизической информации построена концептуальная модель Авачинской геотермальной площади, оценены параметры магматического очага и вмещающих его горных пород.

В период с 1960–2014 гг. на Авачинском вулкане выполнен комплекс геолого-геофизических исследований, по результатам которых, под вулканом зафиксирована аномальная зона, отождествляемая с магматическим очагом. Различные методы исследований и авторы интерпретации результатов дают разные оценки параметров очага. Обобщив данные, значение радиуса очага оценивается в 2,5–5 км, глубина залегания – от 0 до 6 км ниже уровня моря.

На основе данных геологического разреза по Апрелькову С.Е. и сейсмического разреза вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), по данным Мороза Ю.Ф. и Гонтовой Л.И., автором совместно с Пашкевичем Р.И. разработана концептуальная модель Авачинской геотермальной площади, рисунок 1. В соответствии со скоростными границами продольных волн и зонами сейсмических аномалий, в модели выделены 8 слоев горных пород (доменов). Также, в пределах постройки выделена флюидопроводящая зона, связывающая магматический очаг с дневной поверхностью (домен 9), образованная системой контракционных трещин.

Геологические характеристики горных пород, слагающих домены модели, определены по данным геологического разреза по Апрелькову С.Е. Значения теплофизических свойств горных пород приняты по результатам измерений на образцах, отобранных в пределах Авачинской площади. Измерения свойств проводились в Сколковском институте науки и технологий и в Технологической компании Шлюмберже. Также использовались данные прошлых лет, в том числе гидрогеологические, полученные по образцам керна скважины, пробуренной на границе моделируемой области. Гидрогеологические и теплофизические свойства горных пород, слагающих домены модели, сведены в таблице 1.

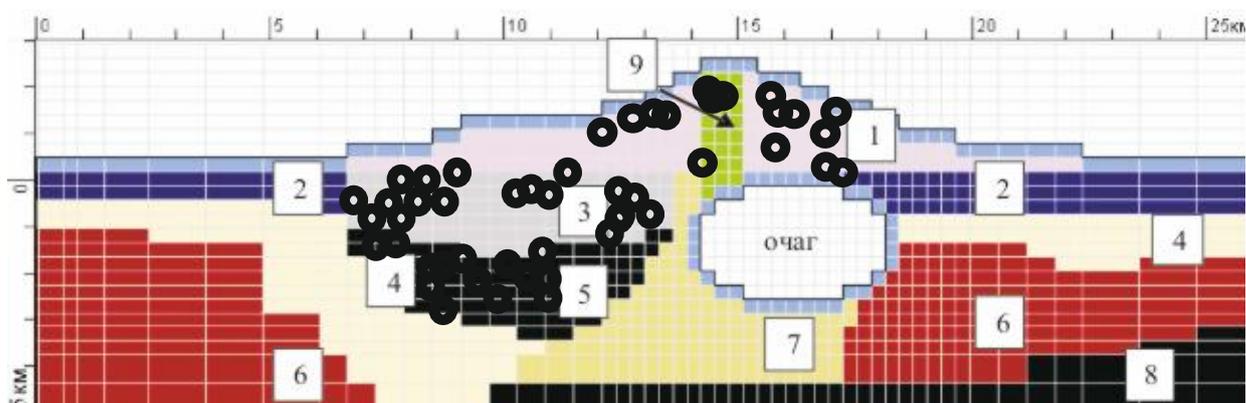


Рисунок 1 – Разрез концептуальной модели с изображениями доменов и магматическим очагом. Кругами показаны эпицентры землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г. по данным сейсмического разреза Мороза Ю.Ф. и Гонтовой Л.И.

Таблица 1

Гидрогеологические и теплофизические характеристики доменов модели Авачинской геотермальной площади

№ домена модели	Геологические характеристики			Пористость	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/мК	Теплоемкость, кДж/кгК
	Система	Название отдела, серия	Породы				
1	Четвертичная	Современный средний и верхний	Андезиты, базальты и их туфы	0,07	2600	1,6	1
2	Палеогеновая и неогеновая	Верхний миоцен-плиоцен. Алнейская серия	Андезиты, базальты их туфы и туффиты	0,01	2500	2,7	1
3*	Палеогеновая и неогеновая	Верхний миоцен-плиоцен Алнейская серия	Андезиты, базальты их туфы и туффиты	0,05	2600	2,0	0,9
	Меловая	Ирунейская свита	Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты				
4	Меловая	Ирунейская свита	Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты	0,01	2650	2,7	0,9
		Хозгонская свита	Рассланцованные песчаники, филлиты				
5**	-«-	-«-	-«-	0,07	2650	2,7	0,9
6	Меловая	Хозгонская свита	Рассланцованные песчаники, филлиты	0,01	2700	2,7	0,9
7	-«-	-«-	-«-	0,07	2700	2,7	0,9
8	-«-	-«-	-«-	0,01	2700	2,7	0,9
9	Четвертичная	Современный средний и верхний	Андезиты, базальты и их туфы	0,05	2600	2,0	0,9

* - зона с эпицентрами землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г.

** - зона сейсмических аномалий скорости и поглощения

Гидрогеологические параметры Авачинской геотермальной площади известны только для небольшого участка, находящегося на границе моделируемой области – по данным скважины ГК-2а, ликвидированной в настоящее время. Теплоперенос в горных породах Авачинской площади может происходить как конвекцией, так и теплопроводностью (кондукцией). Кондуктивный тип преобладает при проницаемости горных пород менее 10^{-3} мД. На основе анализа данных сейсмического разреза вдоль профиля ГСЗ, по данным Мороза Ю.Ф. и Гонтовой Л.И. 2003 г., области горных пород с наибольшей плотностью эпицентров землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г. автором совместно с Пашкевичем Р.И. были интерпретированы как области повышенной проницаемости, в которых происходит конвективный теплоперенос (домены 3 и 5, рисунок 1). Доминирующий кондуктивный тип теплопереноса реализовывался заданием проницаемости горных пород равной 10^{-3} мД. В случае доминирующего конвективного теплопереноса, проницаемость горных пород постройки увеличивалась до 1 мД, а области повышенной проницаемости – до 5 мД. Последнее значение принято по данным скважины ГК-2а.

В третьей главе на основе принятой концептуальной модели автором совместно с Пашкевичем Р.И. разработана трехмерная численная термогидродинамическая модель Авачинской геотермальной площади.

Математическая модель теплопереноса в породах системы основывается на системе уравнений сохранения массы и энергии, выраженных через величины давления и энтальпии:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{k}k_{rw}\rho_w}{\mu_w} (\nabla p - \rho_w \mathbf{g}) - \frac{\mathbf{k}k_{rs}\rho_s}{\mu_s} (\nabla p + \rho_s \mathbf{g}) \right] - q_{sf} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-\phi)\rho_r h_r + \phi(s_w \rho_w h_w + s_s \rho_s h_s)] - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{k}k_{rw}\rho_w h_w}{\mu_w} (\nabla p + \rho_w \mathbf{g}) - \frac{\mathbf{k}k_{rs}\rho_s h_s}{\mu_s} (\nabla p - \rho_s \mathbf{g}) \right] - \nabla \cdot \mathbf{K}_a \mathbf{I} \nabla T - q_{sh} = 0 \quad (2)$$

где ϕ – пористость; ρ_w, ρ_s, ρ_r – плотность жидкости, пара и пород; k_{rw}, k_{rs} – соответственно относительные фазовые проницаемости; μ_w, μ_s – динамические вязкости жидкости и пара; \mathbf{K}_a – эффективная теплопроводность насыщенной жидкостью и паром среды; h_w, h_s, h_r – энтальпии жидкости, пара и пород; \mathbf{I} – единичный тензор, q_{sf} и q_{sh} – расходы массы и тепла источников и стоков.

Численная реализация осуществляется конечно-разностными методами на базе программного комплекса HYDROTHERM, предназначенного для трехмерного моделирования многофазного потока воды и тепла в диапазоне температуры и давления до 1200°C и 1 ГПа.

Модель Авачинской геотермальной площади можно представить как массив горных пород, вмещающих магматический очаг. Область моделирования вытянута в плане в северо-восточном направлении и симметрична относительно осевой линии очага, находящегося под конусом Авачинского вулкана, рисунок 2. Размер области моделирования в плане составляет 9×26 км. Боковые и нижняя границы модели приняты плоскими, глубина модели ниже уровня моря – 5 км, с учетом постройки вулкана – 8 км. Верхняя граница задавалась с учетом фактического рельефа дневной поверхности. Магматический очаг принят по комплексу геолого-геофизических данных в виде эллипсоида вертикального вращения с размером большой полуоси 2,25 км, малой – 1,5 км и глубиной центра – 1,5 км ниже уровня моря. Расчеты производились для трех вариантов температуры стенки очага: $700, 900$ и 1000°C .

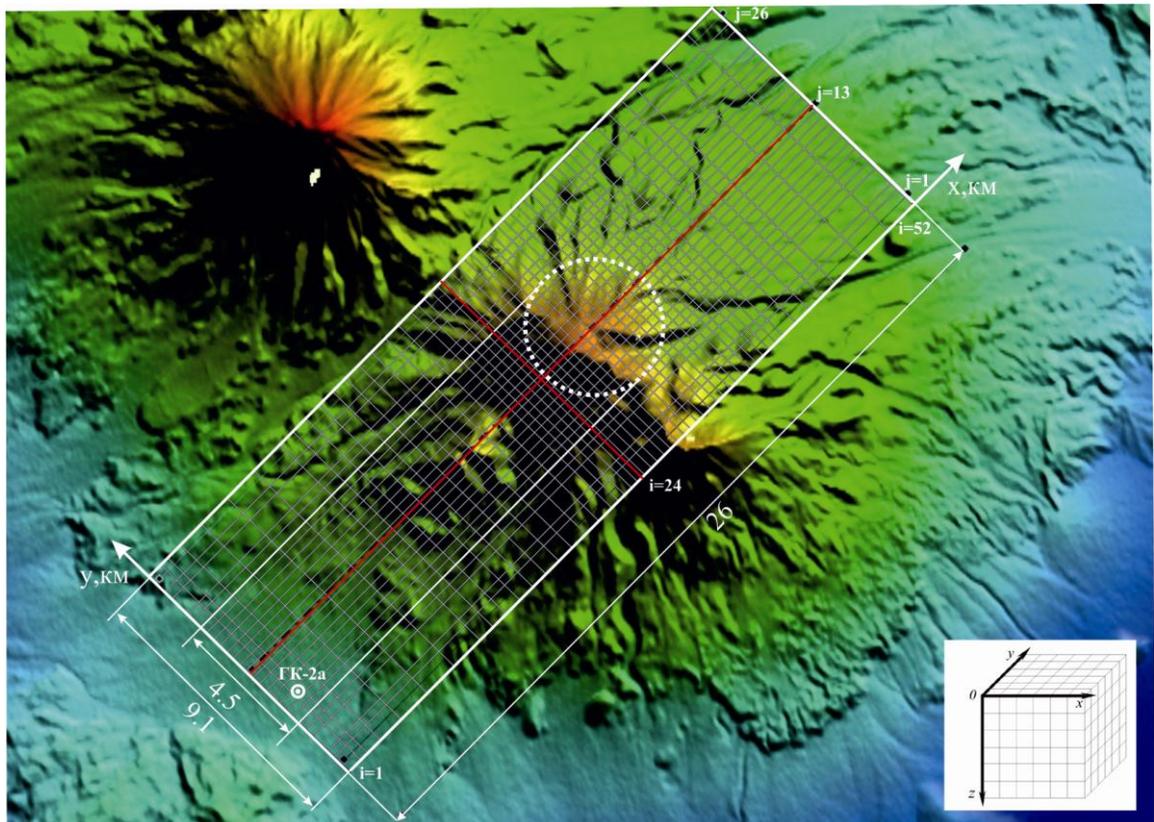


Рисунок 2 – Область моделирования с координатной сеткой (вид сверху) и проекцией магматического очага (окружность). $j=13$, $i=24$ – вертикальные разрезы модели; ГК-2а – скважина

В постройке вулкана задана флюидопроводящая зона размером 900×900 м в горизонтальном сечении, гидравлически связывающая дневную поверхность и магматический очаг. Зона образована системой contractionных трещин, возникших в результате остывания жерла.

На рисунке 3 изображен центральный разрез численной модели с изображением доменов, а также начальных и граничных условий. В модели принято начальное распределение температуры, соответствующее среднему геотермическому градиенту в

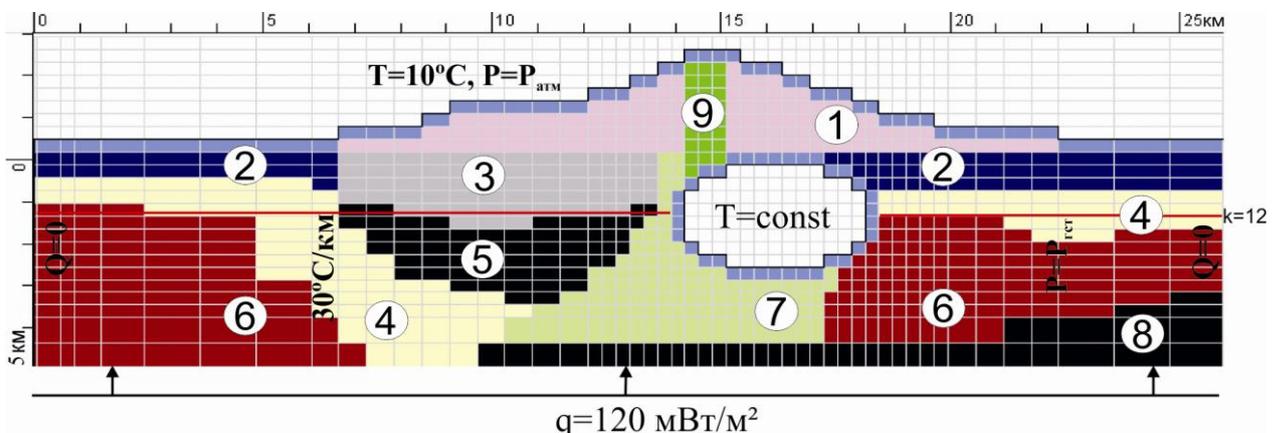


Рисунок 3 – Центральный разрез численной модели с изображением доменов, начальных и граничных условий. Эллипс – магматический очаг; цифры в кружках – номера доменов; q – региональный тепловой поток; Q – массовый расход на границах модели; T , P – температура и давление; $P_{атм}$, $P_{гст}$ – атмосферное и гидростатическое давление; $k=12$ – горизонтальный разрез по оси z

30°C/км, и давление равное гидростатическому. На верхней границе модели приняты постоянная температура – 10°C и атмосферное давление – 0,1МПа, на нижней границе – постоянный тепловой поток равный 120 мВт/м². На боковых границах области моделирования задавалось отсутствие потока флюидов.

Плотность, теплоемкость, теплопроводность и пористость пород приняты различными для каждого слоя, таблица 1.

По результатам численных экспериментов получено распределение температуры и фазового состояния флюида по кондуктивному и конвективному типу модели на момент времени 60 тыс. лет. Результаты расчетов при двух доминирующих случаях теплопереноса и температуре стенки очага равной 1000°C представлены на рисунках 4 и 5.

В случае доминирующего *кондуктивного* теплопереноса установлено, что вокруг очага, за исключением верхней его части, развивается зона конвекции надкритического флюида. Вблизи поверхности очага образуется область перегретого пара шириной около 1 км. В результате высокого гидрогазодинамического сопротивления пород постройки периферийная область влажного пара отсутствует.

С ростом принимаемой в расчетах температуры стенки очага происходит расширение областей конвекции надкритического флюида и перегретого пара. Наблюдается более интенсивный прогрев окружающих очаг пород, возрастает геотермический градиент в породах постройки. Также установлено, что значительное влияние на температуру окружающих пород, магматический очаг оказывает на расстоянии 6 км от своей оси, а на удалении более 12-14 км не воздействует на геотемпературный фон, что согласуется с результатами замеров температур в скважине ГК-2а.

В случае доминирующего *конвективного* теплопереноса установлено, что аналогично кондуктивному, вблизи поверхности очага формируется зона перегретого пара. За счет более высокой проницаемости пород постройки перегретый пар на верхней границе частично конденсируется, формируя двухфазную область. Вследствие конвекции, происходит интенсивный прогрев пород в проницаемой области. Повышенная проницаемость пород постройки вулкана оказывает охлаждающий эффект, что обуславливает «придавливание» изотерм над очагом. По результатам численных экспериментов область горных пород с температурой 200-400°C может располагаться на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности и на удалении до 3-х км от стенки очага.

Влияние изменения температуры стенки очага на процесс теплопереноса в породах аналогично случаю доминирующего кондуктивного теплопереноса. С увеличением температуры стенки очага расширяется зона конвекции надкритического флюида вблизи стенок очага. На верхней границе распространяется двухфазная область. В проницаемой области растет объем пород с температурой 200-400°C. Геотермический градиент в породах постройки и на удалении более 12 км от очага остается равным среднему региональному.

Освоение ресурсов высокотемпературной зоны горных пород предлагается по технологии циркуляционной системы типа «дублет». Технология предполагает повышение проницаемости пород имеющегося подземного коллектора или его создание с помощью гидро- или терморазрыва, а также дальнейшее устройство циркуляции жидкости посредством системы нагнетательной и добычной скважин.

Модель А

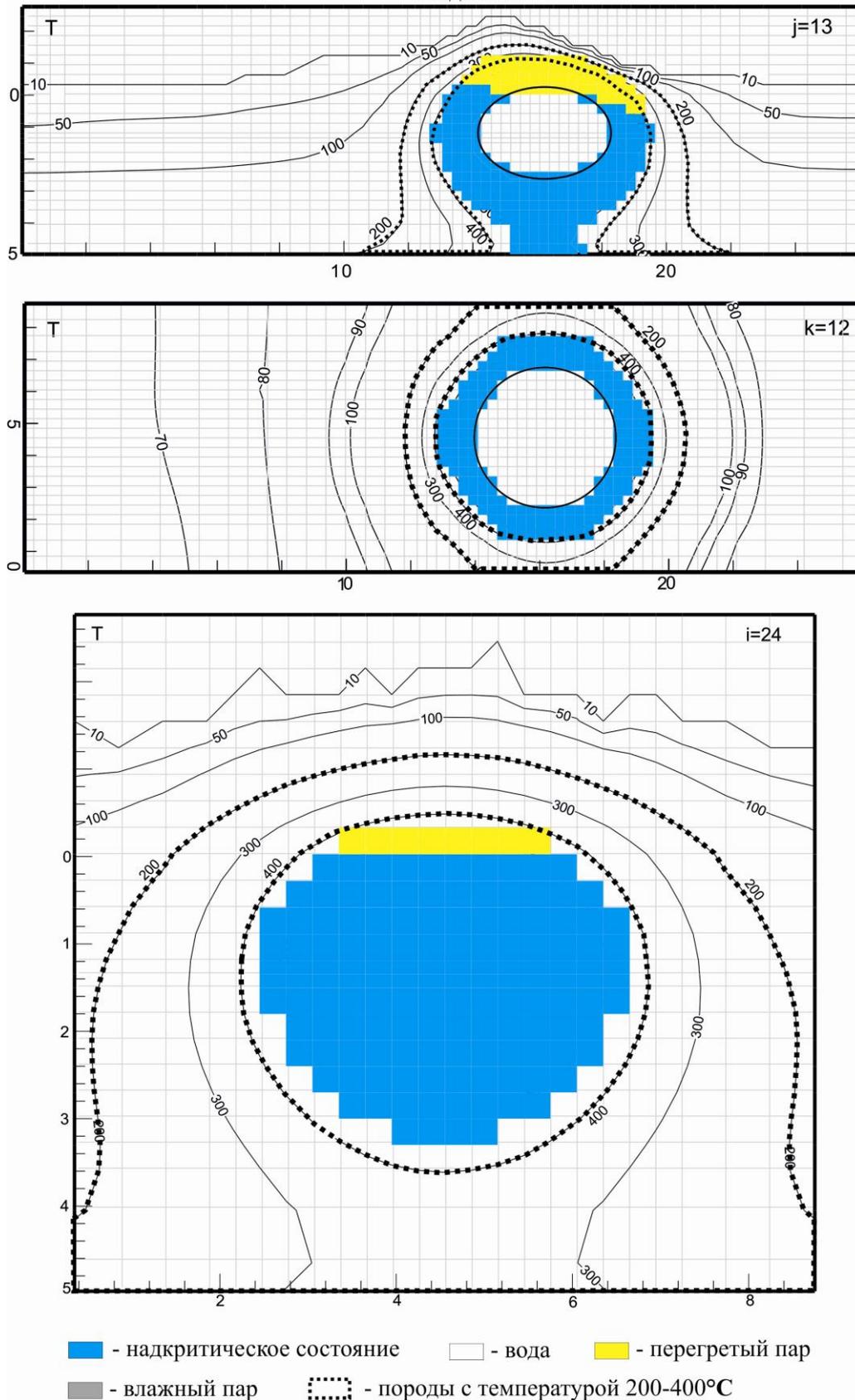


Рисунок 4 – Распределение температуры и фазового состояния в разрезах модели в случае доминирующего кондуктивного теплопереноса (модель А). Температура стенки очага – 1000°C. На вертикальных разрезах ($j=13$ и $i=24$) по вертикальной оси – глубина (км), по горизонтальной – ширина (км), на горизонтальном разрезе ($k=12$) по вертикальной оси – ширина (км), по горизонтальной – длина (км)

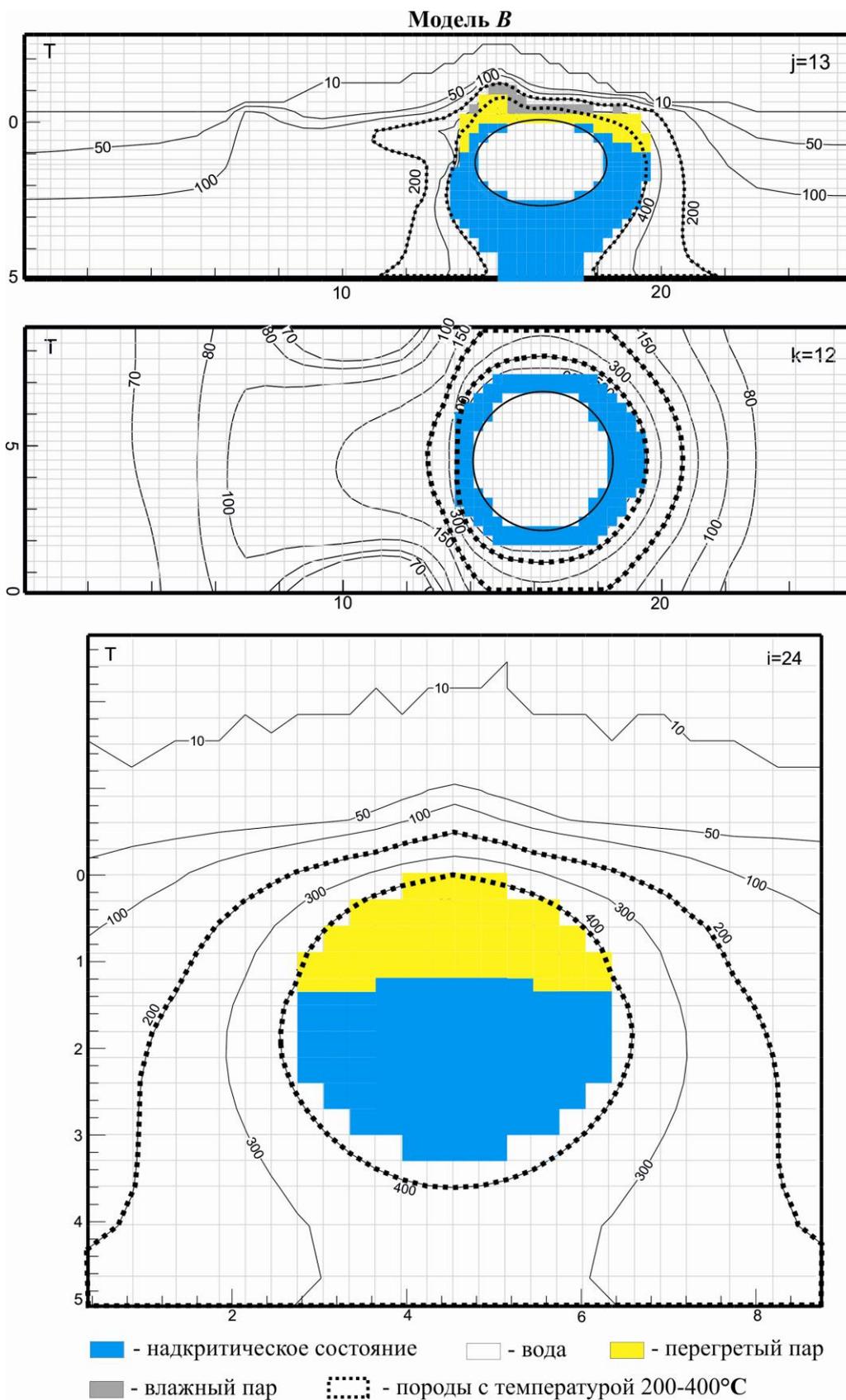


Рисунок 5 – Распределение температуры и фазового состояния в разрезах модели в случае доминирующего конвективного теплопереноса (модель В)

Четвертая глава посвящена установлению рациональных технологических параметров и технико-экономической оценке эксплуатации перспективной геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) при освоении тепловых ресурсов Авачинской площади.

На стадии разработки системы разработки геотермального коллектора важным условием, определяющим эффективность теплоотбора, является определение рациональных геометрических параметров системы, т.е. расстояния между забоями добычной и нагнетательной скважин, а также их взаимное расположение в продуктивной зоне геотермального коллектора.

Для установления рациональных технологических параметров циркуляционной системы, при разработке тепловых ресурсов Авачинской площади, в работе автором совместно с Пашкевичем Р.И. выполнены численные эксперименты, моделирующие эксплуатацию геотермального коллектора по циркуляционной технологии типа «дублет» (одна нагнетательная и одна добычная скважины). Разработана модель циркуляционной системы, включающая продуктивную зону (зону повышенной относительно окружающих пород проницаемости) и 2 скважины – нагнетательная и добычная, рисунок 6. Теплофизические и гидрогеологические характеристики пород коллектора соответствуют средним значениям, полученным по результатам измерений на образцах, отобранных в пределах Авачинской площади, и образцах керна скважины ГК-2а. Начальные условия в породах коллектора соответствуют надкритическим термодинамическим, полученным на разработанной численной модели Авачинской геотермальной площади.

Для изучения влияния эффективности теплоотбора от геометрических параметров, в численных экспериментах рассматривались три технологических схемы, рисунок 6: *H1* – расположение забоя добычной скважины над забоем нагнетательной, *H2* – забой добычной скважины под забоем нагнетательной и *L* – расположение забоев в ряд по-горизонтالي. Во всех схемах расстояние между забоями скважин варьировалось в пределах 300–800 м.

Область моделирования включает продуктивную проницаемую зону и малопроницаемые породы (10^{-3} мД). Начальное распределение давления – гидростатическое. На верхней границе модели задавались постоянные атмосферное давление 0,1 МПа и температура 10°C, на нижней – 420°C. Начальный геотермический градиент принят равным установленному по результатам численных экспериментов в горных породах Авачинской площади – 137°C/км. Тепловой поток на нижней границе равен 120 мВт/м². Границы модели заданы непроницаемыми, т.е. потери теплоносителя во время эксплуатации отсутствуют. Продуктивная зона считается изотропной с постоянной проницаемостью равной 5 и 10 мД, и 10%-ной пористостью. Значения 5 и 10 мД для проницаемости продуктивной зоны в разработанной модели, были приняты на основании того, что проницаемость пород, установленная по результатам пробных откачек в скважине ГК-2а, находящейся на границе моделируемой области, составила 6 мД. Значения исходных параметров, принятых при моделировании, сведены в таблице 2.

По результатам численных экспериментов получено распределение температуры, давления и водонасыщенности в продуктивной зоне коллектора (рисунок 7), а также динамика данных параметров на забое добычной скважины, по которой проводилась оценка эффективности схем.

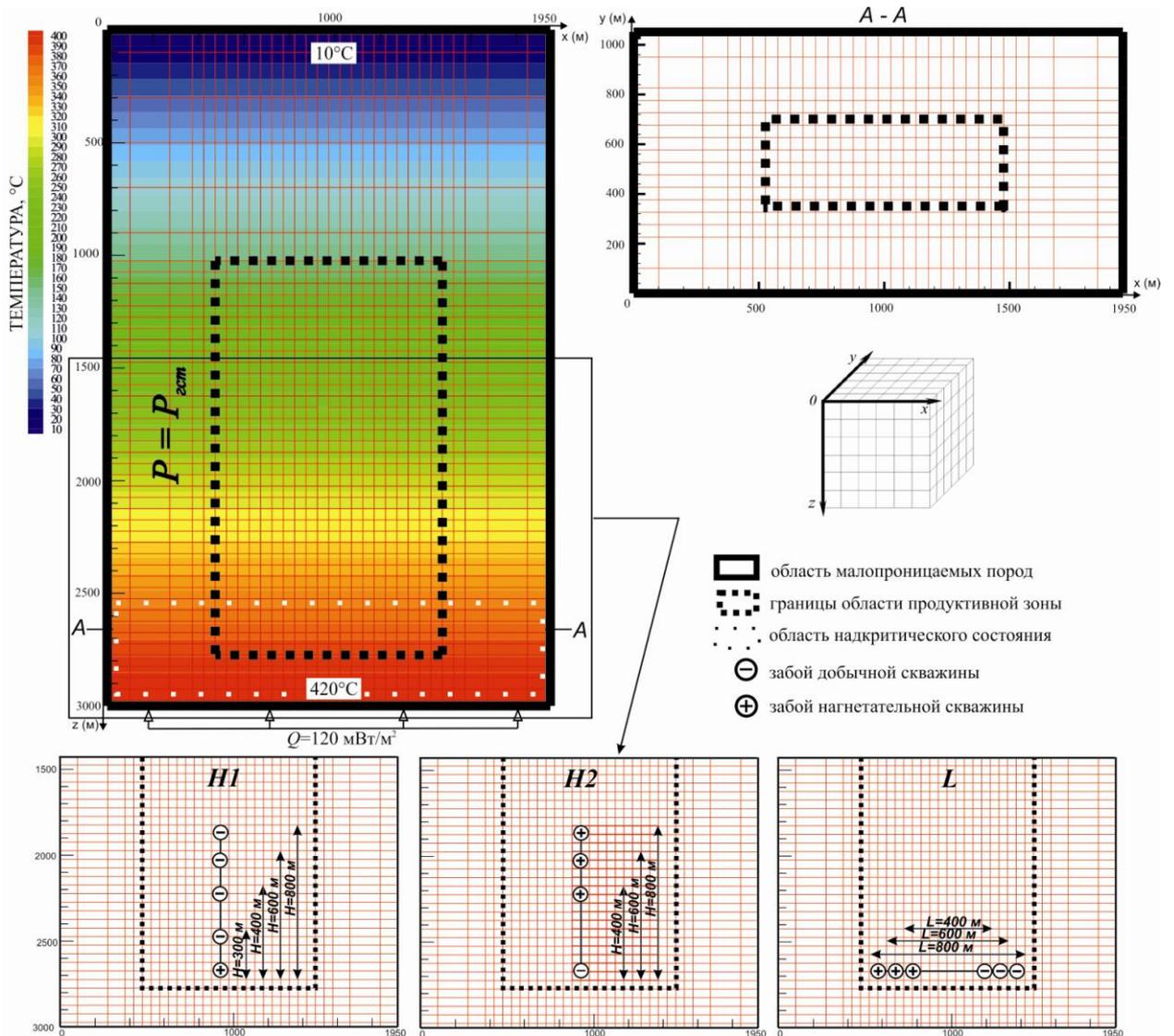


Рисунок 6 – Численная модель геотермального коллектора и схемы расположения забоев скважин. $P_{гст}$ – начальное гидростатическое давление; Q – тепловой поток на нижней границе модели; $A-A$ – горизонтальное сечение модели

Таблица 2

Значения исходных параметров модели ГЦС

Параметр	Значение
Размер области моделирования (Д×Ш×В), м	1950×1005×3000
Размер продуктивной зоны (Д×Ш×В), м	950×350×1800
Теплопроводность пород, Вт/м·К	2
Теплоемкость пород, кДж/кг	1
Плотность пород, кг/м ³	2500
Пористость вмещающих пород, %	1
Пористость продуктивной зоны, %	10
Проницаемость вмещающих пород, мД	10 ⁻³
Проницаемость продуктивной зоны, мД	5; 10
Дебит скважин, кг/с	10–20
Температура нагнетаемого теплоносителя, °С	80
Диапазон глубин скважин, м	1876–2676
Период эксплуатации ГЦС, лет	40

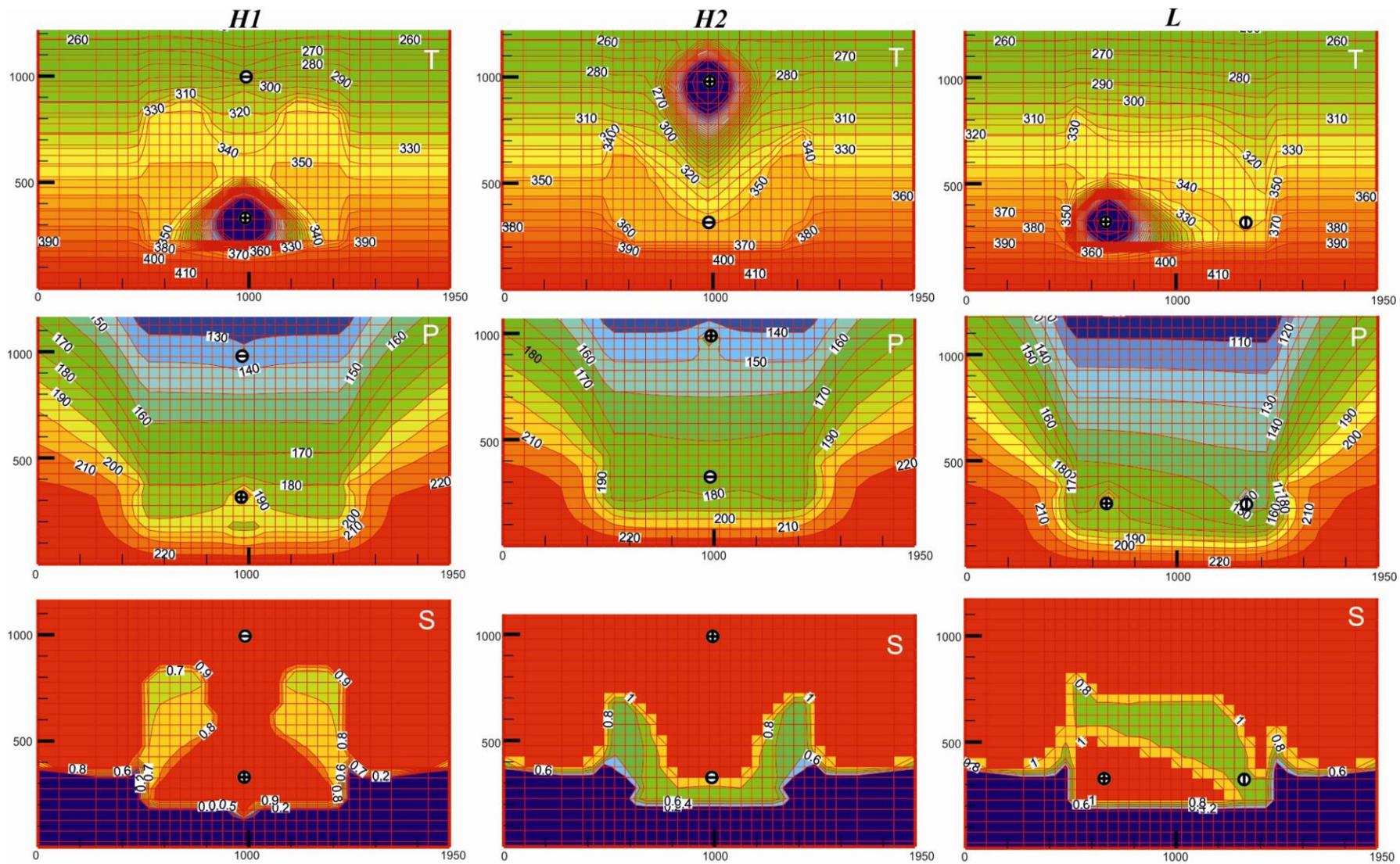


Рисунок 7 – Распределение температуры (T , °C), давления (P , бар) и водонасыщенности (S) в продуктивной зоне коллектора ГЦС через 20 лет после начала эксплуатации. Расстояние между забоями скважин – 600 м, дебит скважин – 20 кг/с, проницаемость продуктивной зоны – 10 мД. По вертикальной оси – высота (м) от нижнего основания модели ($H = 3$ км), по горизонтальной – значения x (м)

Установлено, что при всех схемах наблюдается общее падение давления в продуктивной зоне коллектора, вследствие чего происходит смена фазового состояния теплоносителя, на боковых границах формируются области влажного пара с постепенным поднятием. В окрестности нагнетательной скважины формируется фронт охлажденных пород. Направление движение данного фронта ориентировано к забою добычной скважины, скорость его продвижения для каждой схемы различна. При схеме *H1* скорость продвижения холодного фронта минимальна, при всех расстояниях между забоями скважин происходит незначительный рост температуры извлекаемого теплоносителя в течение срока эксплуатации, рисунок 8. Расстановка забоев скважин в 300 м, при данной схеме, наиболее рациональна т.к. система имеет высокие начальные значения температуры, вследствие большей глубины забоя добычной скважины и наибольшей близости к высокотемпературной зоне.

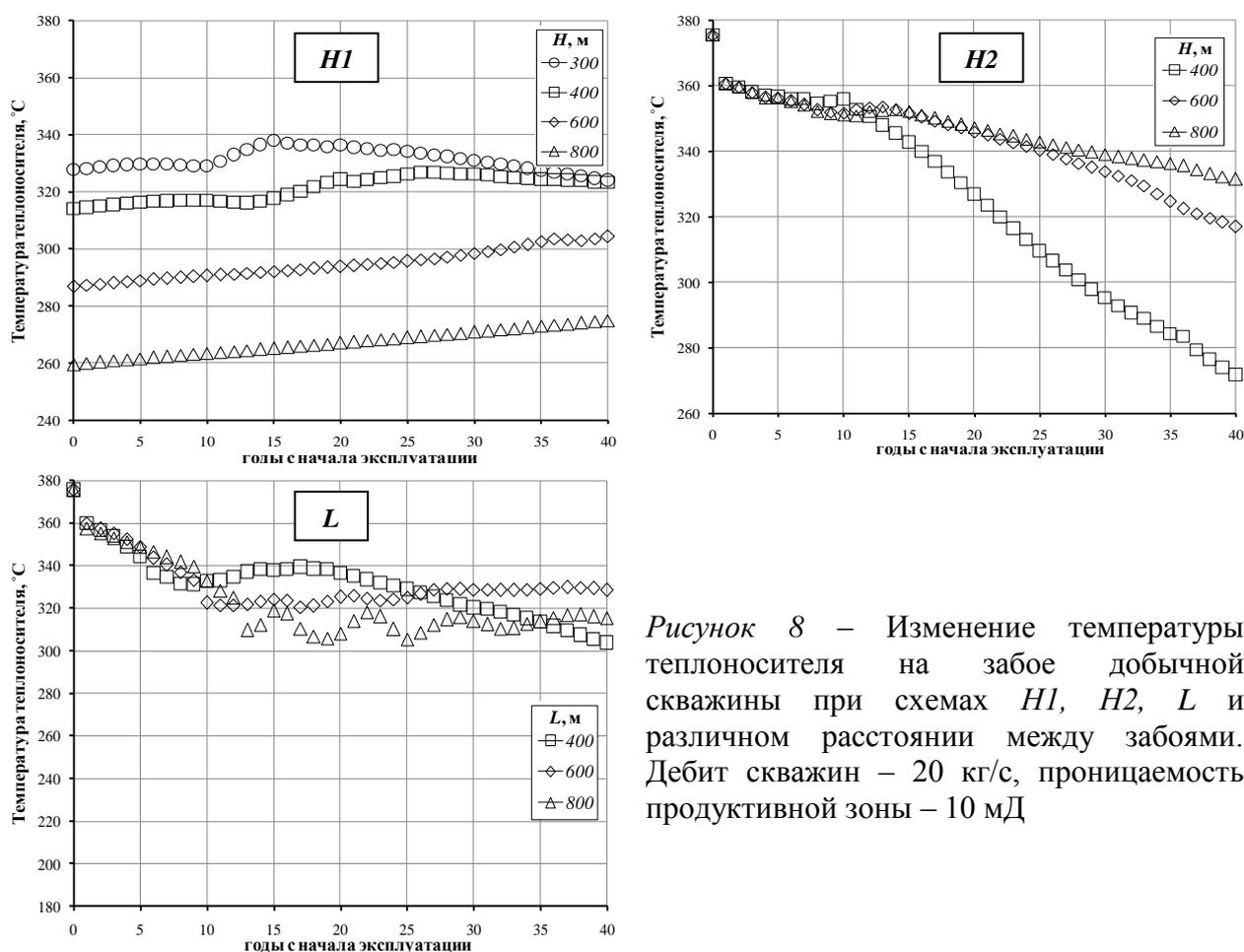


Рисунок 8 – Изменение температуры теплоносителя на забое добычной скважины при схемах *H1*, *H2*, *L* и различном расстоянии между забоями. Дебит скважин – 20 кг/с, проницаемость продуктивной зоны – 10 мД

При обратном расположении забоев (схема *H2*) наиболее рациональна расстановка забоев на расстоянии 800 м. Температура извлекаемого теплоносителя имеет максимальные начальные значения и снижение на конец срока эксплуатации в пределах 10% (рисунок 8), что является установленным, в общемировой практике, пределом для циркуляционных систем.

Наименее рационально расположение забоев добычной и нагнетательной скважин на одной линии (схема *L*). Температура извлекаемого теплоносителя падает более чем на 10% в течение срока эксплуатации, рисунок 8.

Другим важным параметром циркуляционных систем при эксплуатации является давление на забоях добычной и нагнетательной скважин, что определяет затраты энергии на циркуляцию жидкости в системе. Необходимы более высокие значения на забое добычной скважины при наименьших значениях на забое нагнетательной.

Из сравнения значений давления на забоях скважин при 3-х схемах (рисунок 9) видно, что наиболее эффективным является расположение забоя нагнетательной скважины над забоем добычной (схема $H2$), при котором давление на забое добычной скважины максимально, а на забое нагнетательной скважины минимально на протяжении всего срока эксплуатации.

Значения давлений на забоях скважин определяют такой важный параметр как импеданс (I_k), т.е. сопротивление коллектора потоку жидкости:

$$I_k = (P_{наг} - P_{доб}) / q \quad (3)$$

где $P_{наг}$, $P_{доб}$ – давления нагнетания и добычи, соответственно; q – расход нагнетания.

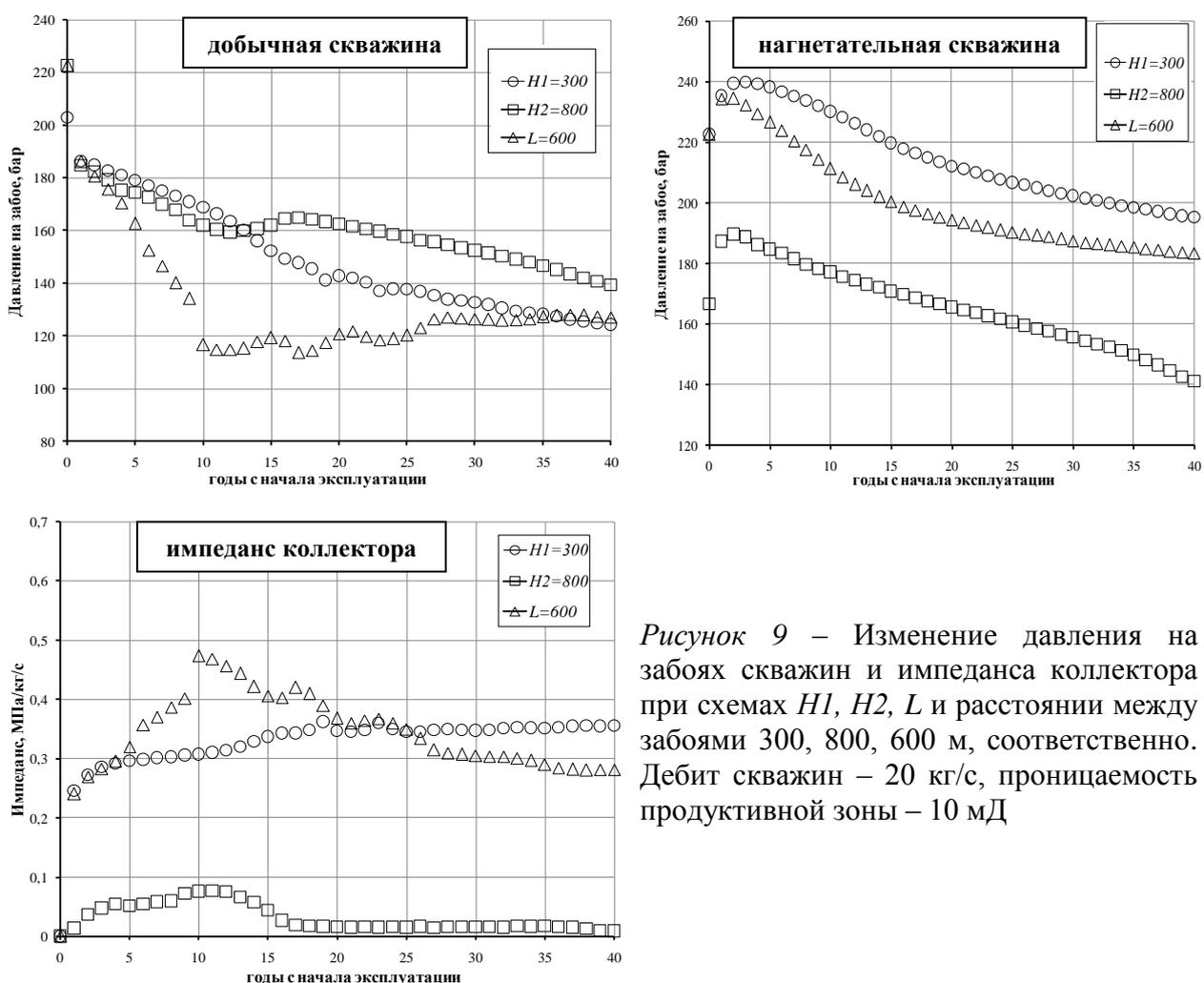


Рисунок 9 – Изменение давления на забоях скважин и импеданса коллектора при схемах $H1$, $H2$, L и расстоянии между забоями 300, 800, 600 м, соответственно. Дебит скважин – 20 кг/с, проницаемость продуктивной зоны – 10 мД

В общемировой практике, для коммерческих проектов ГЦС, величина импеданса установлена в пределах 0,1 МПа/кг/с. Таким образом, функционирование системы в пределах заданного значения возможно только при расположении забоя нагнетательной скважины над забоем добычной, т.е. при схеме $H2$ (рисунок 9).

Для оценки потенциала рассмотренной циркуляционной системы типа «дублет», как источника выработки электроэнергии, определена мощность системы (W_3) при двух наиболее рациональных схемах расположения забоев – $H1$ и $H2$:

$$W_3 = 0,45q(h_{доб} - h_{наг}) (1 - T_{окр}/T_{доб}) \quad (4)$$

где $h_{наг}$, $h_{доб}$ – удельная энтальпия теплоносителя нагнетательной и добычной скважин, соответственно; $T_{окр}$ – средняя температура окружающей среды; $T_{доб}$ – температура извлекаемого теплоносителя; 0,45 – коэффициент преобразования полезной работы в электрическую энергию.

Установлено, что расчетная мощность геотермальной электростанции (ГеоЭС), работающей по технологии циркуляционной систем типа «дублет», при заданных условиях, составляет 5,5–8 МВт в течение 40 лет эксплуатации, рисунок 10.

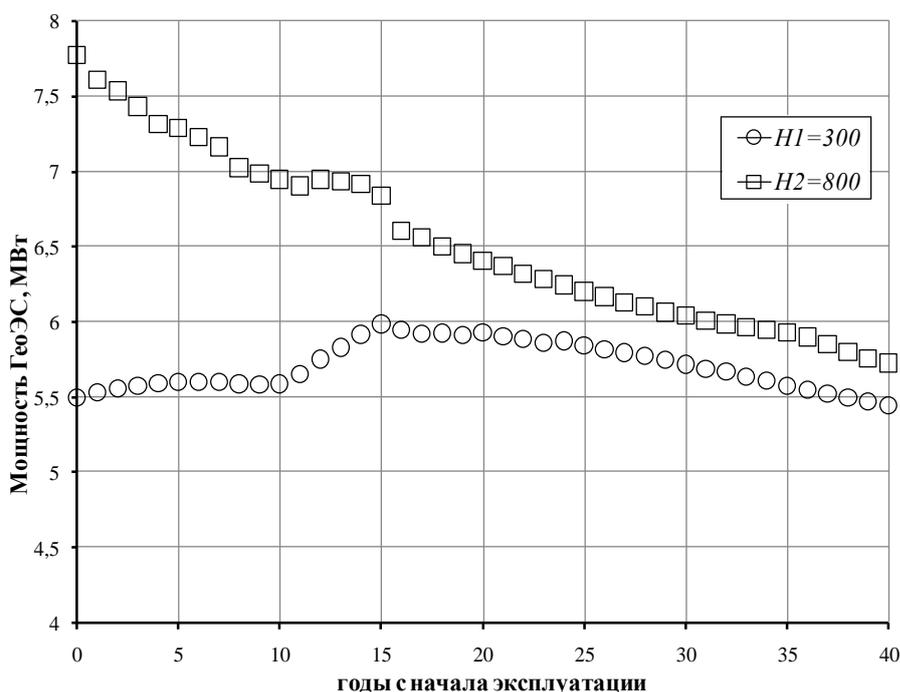


Рисунок 10 – Динамика вырабатываемой мощности ГеоЭС при схемах $H1$ и $H2$ с расстоянием между забоями 300 и 800 м, соответственно

Освоение тепловых ресурсов Авачинской площади предлагается по технологии ГЦС, состоящей из 4-х «дублетов» суммарной мощностью 25 МВт. Для расчета рентабельности проекта оценены капитальные затраты (таблица 3) в ценах 2016 г. при следующих исходных параметрах:

- система разработки – 4 «дублета» (4 нагнетательные и 4 добычные скважины) суммарной мощностью 25 МВт;
- средняя глубина скважин – 2200 м;
- суммарный расход теплоносителя – 80 кг/с;
- длительность работы ГеоЭС за годовой период – 8000 часов в год;
- расходы электричества на собственные нужды – 8%;
- расчетный период работы ГеоЭС – 40 лет.

Технико-экономические показатели перспективного проекта Авачинской ГеоЭС

Наименование показателя	Значение
Капитальные затраты, млн. руб.	
Геофизические исследования	30
Бурение 12 скважин глубиной 2200 м	2392
Устьевая обвязка 8 скважин	20
Система транспорта пароводяной смеси	106
Оборудование ГеоЭС установленной мощностью 25 МВт	1000
Линия ВЛ 110 кВ (25 км)	312,5
Трансформаторная подстанция 110/35/10 кВ	150
Основные объекты строительства	1000
Суммарные капзатраты	5010,5
Эксплуатационные затраты, млн. руб./год	
Годовой бюджет предприятия	9
Система скважин, ГеоЭС, подстанция и линии, и др.	10
Суммарные эксплуатационные затраты	19
Расчетная себестоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	2,87
Отпускной тариф ПАО «Камчатскэнерго» Центрального энергоузла во 2-м полугодии 2016 г., руб./кВт·ч	4,7

По результатам предварительных расчетов установлено, что средняя расчётная себестоимость производства 1 кВт·ч электроэнергии на протяжении 40 лет эксплуатации ГеоЭС составит 2,87 рублей. Отпускной тариф ПАО «Камчатскэнерго» для населения г. Петропавловска-Камчатского во втором полугодии 2016 г. составил 4,7 рублей за 1 кВт·ч. Таким образом, из приведенных предварительных расчетов можно сделать вывод, что перспективный проект может быть конкурентоспособным на рынке электроснабжения Петропавловск-Камчатского городского округа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой содержится решение актуальной задачи количественной оценки термогидродинамических условий в породах Авачинской геотермальной площади и установления рациональных параметров освоения ее тепловых ресурсов по технологии геотермальных циркуляционных систем.

Основные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. На базе всей имеющейся геолого-геофизической информации разработана концептуальная модель Авачинской геотермальной площади.
2. На основе принятой концептуальной модели разработана трехмерная численная термогидродинамическая модель Авачинской геотермальной площади.
3. Оценены тепловые ресурсы горных пород Авачинской площади. При установленных размерах и глубине залегания ее очага область высокотемпературных пород, перспективных для разработки, может находиться на удалении до 3-х км от стенки очага и на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности.
4. Установлено, что при освоении тепловых ресурсов Авачинской площади по технологии циркуляционной системы типа «дублет», забой нагнетательной скважины следует размещать на расстоянии 800 м над забоем добычной при дебите скважин 20 кг/с.
5. Установлено, что эксплуатация циркуляционной системы типа «дублет», с вырабатываемой электрической мощностью 5,5-8 МВт, в условиях Авачинской геотермальной площади, возможна в течение 40 лет.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Павлов К.А.** Численное моделирование работы геотермальной циркуляционной системы в надкритических начальных условиях с целью оценки возможности выработки электрической энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск 2. "Камчатка" (специальный выпуск). – 2014. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 214–233.
2. **Павлов К.А.** Оценка эффективности извлечения тепловой энергии магма-геотермальных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск 2. "Камчатка" (специальный выпуск). – 2014. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 234–251.
3. Пашкевич Р.И., **Павлов К.А.** О размере, глубине залегания и свойствах магматического очага Авачинского вулкана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск 2. "Камчатка" (специальный выпуск). – 2014. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 183–191.
4. Пашкевич Р.И., **Павлов К.А.** Численное моделирование работы надкритической геотермальной циркуляционной системы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск 2. "Камчатка" (специальный выпуск). – 2014. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 205–213.
5. Пашкевич Р.И., **Павлов К.А.** Оценка эффективности перспективной разработки тепловых ресурсов Авачинской геотермальной системы с целью выработки электрической энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск 2. "Камчатка" (специальный выпуск). – 2014. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 252–260.
6. Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Тарелко Н.Ф., Чернев И.И., **Павлов К.А.**, Муратов П.В. Новые данные о тепловых свойствах пород геотермальных месторождений Камчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск 2. "Камчатка" (специальный выпуск). – 2014. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 36–46.
7. Пашкевич Р.И., Мамаев Д.В., **Павлов К.А.** Термогидродинамическое моделирование Авачинской геотермальной системы с учетом данных термометрии и космических снимков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 63–78.
8. Пашкевич Р.И., **Павлов К.А.** Современное состояние использования циркуляционных геотермальных систем в целях тепло- и электроснабжения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 388–398.
9. Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Савельев Е.Г., Ромушкевич Р.А., **Павлов К.А.** Экспериментальные исследования тепловых свойств пород Авачинской геотермальной системы, Камчатка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. – М.: Издательство «Горная книга». – С. 7–23.

В прочих изданиях:

10. **Павлов К.А.** Перспективы использования тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади для электроснабжения // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2017. – Издательство Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск. – т. 4.– №1. – С. 147-153.

Материалы конференций

11. **Павлов К.А.** Электроснабжение на основе тепловых ресурсов Авачинского вулкана, Камчатка // *Будущее науки-2017. Сборник научных статей 5-й Международной молодежной научной конференции:* в 4-х томах. Ответственный редактор Горохов А.А.. 2017. С. 251-254