



Чермошнцева Алла Анатольевна

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ДОБЫЧЕ ДВУХФАЗНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ФЛЮИДОВ**

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования Камчатском государственном техническом университете (ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»)

Научный консультант:

Шулюпин Александр Николаевич

Доктор технических наук, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФГБУН Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор, г. Хабаровск

Официальные оппоненты:

Алхасов Алибек Басирович

Доктор технических наук, профессор, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ФГБУН Объединенного института высоких температур Российской академии наук, заведующий лабораторией энергетики, г. Махачкала

Пашкевич Роман Игнатьевич

Доктор технических наук, доцент, ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор, г. Петропавловск-Камчатский

Половников Вячеслав Юрьевич

Доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, г. Томск

Ведущая организация:

Акционерное общество «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А.П. Крылова», г. Москва

Защита диссертации состоится 25 апреля 2025 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел.: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@khfrc.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 « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Постоянный рост энергопотребления, глобальное истощение традиционных видов топлива, экологические проблемы и многие другие факторы, обуславливают возрастающий интерес к альтернативным возобновляемым источникам энергии, к числу которых относятся геотермальные ресурсы. Активно развиваются технологии добычи низкотемпературной геотермальной энергии с использованием тепловых насосов для теплоснабжения жилых и производственных помещений. Термальные воды используются в бальнеологии и являются источником ценных химических компонентов. Неуклонно растут масштабы освоения высокотемпературных геотермальных месторождений для нужд электроэнергетики. При этом геотермальные электростанции имеют ряд преимуществ: относительная экологическая чистота, возобновляемый источник тепла с независимым от условий окружающей среды, времени суток и сезона энергетическим потенциалом, сопоставимая с традиционными тепловыми станциями себестоимость продукции.

Наиболее широким спектром проблем характеризуется освоение месторождений парогидротерм, поставляющих теплоноситель в виде смеси пара и воды. Их разработка, обустройство промысла и эксплуатация выявили проблемы, связанные с двухфазными течениями в добычных скважинах и системах наземной транспортировки добытых флюидов. Сложность процессов динамики газожидкостной смеси, которые в данном случае находятся во взаимосвязи с термодинамическими процессами, часто не позволяет получать простые решения возникающих задач. С помощью математических моделей соответствующих процессов определяются эксплуатационные характеристики скважин и трубопроводов при их строительстве, ремонте и реконструкции, прогнозируется реакция питающих пластов при различных схемах эксплуатации, оценивается жизнеспособность и эффективность проектов.

Актуальность данной работы определяет недостаточная изученность гидродинамических процессов при добыче геотермальных флюидов, что требует развития соответствующих теоретических и научно-методических основ для их описания, разработки конкретных методов и средств для адекватного современным вызовам расчета двухфазного пароводяного течения в добычных скважинах и наземных трубопроводах, а также обоснования рекомендаций по выбору конструктивных параметров трубопроводов, обеспечивающих устойчивую работу системы добычи и транспортировки флюидов на месторождениях парогидротерм.

Работа выполнялась по инициативным проектам РФФИ «Выявление механизмов, обеспечивающих устойчивость пароводяного течения в добычной геотермальной скважине, и определение условий их реализации» (2016–2018 гг., № 16-01-00398 а), «Гравитационная неустойчивость пароводяного течения при освоении геотермальных ресурсов» (2020–2022 гг., № 20-05-00161 а); по госбюджетным темам КамчатГТУ «Математическое моделирование пароводяных течений в элементах оборудования геотермальных промыслов» (2012–2014 гг., № 01201351663), «Исследование и компьютерное моделирование пароводяных течений в условиях геотермальных месторождений» (2015–2017 гг., № АААА-А16-116060810034-8),

«Исследование и математическое моделирование физических процессов в условиях геотермальных промыслов» (2018–2021 гг., № АААА-А19-119011790008-5), «Исследование процессов теплопереноса на геотермальных месторождениях» (действующий, с 2022 г., № 122013100136-4); по хозяйственным с ОАО «Геотерм» (в настоящее время Филиал ПАО «Камчатскэнерго» Возобновляемая энергетика): «Разработка способов повышения эффективности парлифтной добычи теплоносителя. Мутновское месторождение парогидротерм» (2019 г., 2021 г.), «Разработка способов повышения эффективности эксплуатации системы добычи и транспортировки теплоносителя на Мутновском месторождении парогидротерм» (2020 г.), «Разработка научно-технического обоснования по возможности извлечения высокопотенциального теплоносителя из глубинных водоносных горизонтов» (2021-2022 г.).

Цель диссертационной работы заключается в разработке отвечающих современным запросам научных основ описания гидродинамических процессов в добычных скважинах и системах наземной транспортировки на месторождениях парогидротерм и развитии методической базы их практического применения.

Идея работы заключается в том, что повышение эффективности разработки месторождений парогидротерм требует развития научно-методической базы решения задач гидродинамики пароводяного геотермального флюида с учетом накопленного опыта и выявленных при этом научных проблем, а также новых практических вызовов.

Для реализации идеи и достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ состояния научной базы для расчета гидродинамических процессов с учетом современного состояния и новых вызовов при освоении месторождений парогидротерм.

2. Разработка научных основ для расчета пароводяного течения в стволе добычной геотермальной скважины и их реализация при создании математических моделей потока в пароводяной скважине, отвечающих современным запросам при освоении месторождений парогидротерм.

3. Выявление факторов, определяющих развитие неустойчивости газожидкостного потока в добычной геотермальной скважине, и оценка их влияния на результаты опробования скважин.

4. Разработка научных основ для расчета пароводяного течения в системе транспортировки добытого флюида и их реализация при создании математической модели пароводяного потока в трубопроводе, отвечающей современным вызовам при освоении месторождений парогидротерм.

5. Использование разработанных научных основ расчета гидродинамических процессов для решения конкретных задач, связанных с двухфазными течениями при освоении отечественных месторождений парогидротерм.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовался комплекс методов, включающих анализ отечественной и зарубежной литературы по предмету исследования, экспериментальные исследования пароводя-

ных потоков на Мутновском и Паужетском месторождениях парогидротерм (Камчатка), теоретическое исследование, математическое и численное моделирование гидро-, газо- и термодинамических процессов в добычных скважинах и системах наземной транспортировки двухфазных геотермальных флюидов, натурные эксперименты для верификации разработанных расчетных моделей.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Сравнение результатов расчета по разработанной математической модели течения в добычной скважине на месторождении парогидротерм WELL-4 и доступным ее зарубежным аналогом с опытными данными давлений на глубине работающих скважин Паужетского месторождения показало наименьшее расхождение с опытными данными отечественного продукта. Расхождение по зарубежным аналогам в среднем в 2,5 раза больше.

2. Стабилизирующий эффект дросселирования потока вблизи устья позволяет расширить диапазон наблюдаемых параметров устойчивой работы при опытном определении графика производительности скважины. Часть опытного графика в области высоких устьевых давлений и малых расходах может не соответствовать устойчивой работе при эксплуатации, осуществляемой без указанного эффекта. При использовании дросселирования, как способа стабилизации режима работы скважины, целесообразно избегать возникновения критического режима истечения.

3. Математическая модель, описывающая пароводяное течение в наземных трубопроводах на геотермальных месторождениях с риском возникновения гравитационной неустойчивости потока, должна учитывать гравитационную составляющую градиента давления. Новая модель SWIP для расчета пароводяного течения в трубопроводах хорошо согласуется с компьютерной программой MODEL в типовых условиях Мутновского геотермального месторождения. Для нетиповых условий (значительный наклон трубопровода, низкие скорости потока) предпочтительна новая модель.

4. Основным фактором изменения производительности добычных скважин Паужетского месторождения является снижение давления в термоводяном комплексе (на 7–13 бар за время эксплуатации), которое сопровождается распространением зоны кипения на питающий коллектор и формированием в термоводяном комплексе «паровых шапок», создающих опасность геотермальных взрывов.

5. Возможности расчетного определения фильтрационных характеристик питающего пласта пароводяной скважины по данным измерений на устье являются крайне ограниченными и сокращаются с ростом энтальпии теплоносителя и водопроницаемости пласта. В частности, для скважин Паужетского и Мутновского месторождений, эксплуатируемых в настоящее время, такой способ неприемлем.

Достоверность научных положений обеспечивается использованием фундаментальных физических законов в качестве исходных предпосылок для теоретического анализа, законов логики применительно к научным выводам, использованием корректно разработанных математических моделей и компьютерных про-

грамм, удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, представленных в достаточном объеме, успешной реализацией выработанных рекомендаций при освоении отечественных месторождений парогидротерм.

Научная новизна работы заключается в разработке соответствующих современным требованиям научных основ описания пароводяных течений в добычных скважинах и системах наземной транспортировки на месторождениях парогидротерм; разработке математических моделей пароводяных течений в геотермальных скважинах и наземных трубопроводах, с учетом условий и опыта разработки отечественных месторождений; создании компьютерных программ по реализации разработанных моделей.

Получены следующие научные результаты:

- Установлено, что аномально высокие расходы критического истечения пароводяной смеси с высоким паросодержанием не могут быть описаны в рамках одномерных термодинамически равновесных и неравновесных моделей. Адекватное описание критического истечения пароводяной смеси возможно на основе гипотезы о неоднородности поля скоростей, распределения фаз и давлений в сечении канала при формировании критического потока.

- Разработано семейство математических моделей WELL-4 и на их основе созданы компьютерные программы, позволяющие решать весь спектр задач, связанных с расчетом течений в добычных скважинах при освоении месторождений парогидротерм, включая течения в наклонных скважинах и в областях сопряжения скважины и питающего пласта.

- На основе численного моделирования установлено наличие гравитационной неустойчивости пароводяного течения в добычных скважинах, выявлены особенности ее проявления. На примере скважин А-2 и А-3 Мутновского месторождения доказана теоретически предсказанная зависимость результатов опробования скважин от условий течения вниз по потоку от устья.

- Разработана отвечающая современным требованиям математическая модель SWIP для расчета пароводяного течения в наземных трубопроводах на геотермальных месторождениях и созданы компьютерные программы по ее реализации для коротких и длинных трубопроводов.

- Установлено соответствие теоретически определяемого условия гравитационной неустойчивости течения в вертикальных восходящих потоках эмпирическому критерию, определяющему предельную скорость устойчивого течения, ранее использовавшемуся в компьютерной программе MODEL для расчета трубопроводов (для типовых условий Мутновского месторождения расхождение предельных скоростей составляет 4 %). Выявлены особенности проявления гравитационной неустойчивости в наклонных каналах, включая нисходящие течения.

- Установлено снижение давления в термоводоносном комплексе Паужетского месторождения парогидротерм (на 7–13 бар за время эксплуатации), сопровождающееся распространением зоны кипения на питающий коллектор и формированием в термоводоносном комплексе «паровых шапок», создающих опасность геотермальных взрывов.

– Выявлены возможности расчетного определения фильтрационных характеристик питающего пласта по данным измерений на устье добычных скважин месторождений парогидротерм. Обосновано отсутствие такой возможности для находящихся в эксплуатации скважин Паужетского и Мутновского месторождений.

Научная значимость работы заключается в создании соответствующих современным вызовам научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов в добычных скважинах и системах наземной транспортировки при освоении месторождений парогидротерм; разработке, на новой основе, математических моделей пароводяного течения в добычных скважинах и наземных трубопроводах; решении, с использованием разработанных моделей, ряда практических научных задач.

Практическая значимость работы заключается в создании комплекса компьютерных программ WELL-4 для расчета течений в добычных скважинах, охватывающего весь спектр возможных задач, отвечающих современному уровню технологий разработки месторождений парогидротерм (наклонные скважины, течение в области питающего пласта и т. д.), а также в создании компьютерных программ для расчета наземных трубопроводов пароводяной смеси, расширяющих возможности гидравлических расчетов по диапазону скоростей транспортировки и учету рельефа трассы. Кроме того, решен ряд конкретных задач, в том числе, установлено снижение давления и образование паровых зон в термоводоносном комплексе Паужетского месторождения, обосновано отсутствие возможности определения фильтрационных характеристик питающего пласта по данным испытания скважин на Паужетском и Мутновском месторождениях, разработаны рекомендации по проектированию геометрии трасс трубопроводов пароводяной смеси.

Реализация работы. Разработанные математические модели были реализованы в соответствующих компьютерных программах, используемых для расчета систем добычи и транспортировки пароводяной смеси. Программы семейства WELL-4 использовались при проектировании реконструкции добычных скважин Мутновского месторождения. Компьютерная программа MODEL до 2021 г. широко применялась при проектировании и обосновании реконструкции трубопроводов пароводяной смеси на Мутновском и Паужетском месторождениях, позднее ее заменила обладающая более широкими возможностями программа SWIP-L. Разработанные математические модели были использованы для исследовательских задач, в том числе с выходом на практические рекомендации по повышению эффективности добычи и транспортировки флюидов на месторождениях парогидротерм в рамках договоров с недропользователями. Также результаты исследований внедрены в учебный процесс КамчатГТУ.

Личный вклад автора В диссертационной работе изложены результаты исследований, выполненные непосредственно автором: разработаны адекватные современным запросам научные основы описания пароводяных течений в добычных скважинах и системах наземной транспортировки на месторождениях парогидротерм, созданы соответствующие математические модели и компьютерные про-

граммы для расчета. С применением созданных программ проведены исследования и решены практические задачи: выполнены обоснования проектов реконструкции добычных скважин Мутновского месторождения, гидравлический расчет для строительства и обоснования реконструкции трубопроводов пароводяной смеси, исследована устойчивость режима работы добычных скважин на Мутновском и Паужетском месторождениях, изучена возможность определения фильтрационных характеристик питающего пласта по данным измерений параметров на устье добычных скважин и динамика состояния термоводоносного комплекса Паужетского месторождения.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на семинарах кафедры физики КамчатГТУ (г. Петропавловск-Камчатский, 2006 и 2007 гг.), на Научно-методической конференции «Проблемы научно-технического развития Камчатского края (КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, 2008 г.), на Всероссийских научно-практических конференциях «Наука, образование, инновации: пути развития» (КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, 2011–2018 гг.), на Международной научно-практической конференции «GEOENERGY» (ГТНТУ, г. Грозный, 2015 г.), на Международной геотермальной конференции «GEOHEAT» (НИГТЦ ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 2017 г.), на Международных научных конференциях «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (ИГД ДВО РАН, г. Хабаровск, 2018, 2020 и 2023 гг.), на Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование» (КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, 2019 г.), на Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (ВЦ ДВО РАН, г. Хабаровск, 2019 г.), на семинарах лаборатории геотехнологии и горной теплофизики ИГД ДВО РАН (г. Хабаровск, 2022 и 2023 гг.), на семинаре в Вычислительном центре ДВО РАН (г. Хабаровск, 2022 г.), на Всемирном геотермальном конгрессе (г. Пекин, Китай, 2023 г.), на семинаре лаборатории тепломассопереноса Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский, 2023 г.), на расширенном заседании Научно-технического Совета ПАО «Камчатскэнерго» Возобновляемая энергетика (г. Петропавловск-Камчатский, 2023 г.), на расширенном заседании кафедры физики и высшей математики КамчатГТУ (г. Петропавловск-Камчатский, 2023 г.). Получена первая премия в Международном конкурсе научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отраслей 2021 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 70 печатных работ, в том числе 37 в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ, из которых 11 работ в научных изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и две монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (316 источников), приложений (4), 64 иллюстраций, 18 таблиц, общий объем 311 страниц.

Автор выражает глубокую признательность д.т.н. Шулюпину Александру Николаевичу за многолетнее сотрудничество и всестороннюю поддержку, включая консультирование в процессе подготовки настоящей диссертационной работы. За содействие в организации и проведении экспериментальных исследований, в практическом внедрении полученных результатов автор благодарит к.т.н. Чернева И.И., Любина А.А.; за сотрудничество к.т.н. Варламову Н.Н., Константинова А.В.; за ценные советы чл.-корр. РАН д.ф.-м.н. Смагина С.И., д.г.-м.н. Кирюхина А.В., д.ф.-м.н. Намма Р.В., д.ф.-м.н. Паровика Р.И., д.т.н. Пашкевича Р.И.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** проведен анализ современного состояния и выделены основные направления развития практического освоения геотермальных месторождений. Отмечены актуальные задачи, связанные с пароводяными течениями, возникающие при разработке и эксплуатации промыслов. Сформулированы задачи исследования.

В настоящее время более 20 стран производят электроэнергию на основе геотермальных ресурсов. Стабильно растет установленная мощность ГеоЭС мира. Россия, обладая огромными геотермальными запасами, находится на 14-ом месте с установленной мощностью 82 МВт, что составляет лишь 0,5 % от общемирового значения. Самые крупные и высококачественные геотермальные ресурсы в России находятся на Дальнем Востоке. На Камчатке функционируют три ГеоЭС, вырабатывающие более 90% отечественной электроэнергии на геотермальных ресурсах. Работу станций обеспечивают Мутновское и Паужетское геотермальные месторождения. Технология выработки электрической энергии на геотермальных месторождениях позволяет конкурировать с традиционными тепловыми станциями, а в некоторых случаях производить более дешевую продукцию. По результатам 2022 г. себестоимость электроэнергии, произведенной на камчатских ГеоЭС в 2,3 раза ниже, чем на обычных ТЭС.

Возможность создания мощных объектов геотермальной энергетики, таких как геотермальные электростанции, призванных решить мировые энергетические проблемы, связывают с разработкой высокотемпературных месторождений теплоэнергетических вод, флюиды которых представлены в основном смесью воды и водяного пара. Наличие теплоносителя в двухфазном состоянии определяет актуальность широкого круга проблем, имеющих принципиальный характер для конкретных стадий освоения месторождений, что обуславливает их высокую практическую значимость.

Значительный вклад в освоение геотермальных ресурсов внесли такие советские и российские ученые как В.В. Аверьев, А.Б. Алхасов, Х.И. Амирханов, В.И. Белоусов, Э.И. Богуславский, В.А. Бутузов, Г.П. Васильев, А.А. Гавронский, Г.М. Гайдаров, С.А. Джамалов, В.А. Дроздин, Ю.Д. Дядькин, Г.Н. Забарный, О.А. Кремнев, А.В. Кирюхин, Р.И. Пашкевич, Б.И. Пийп, О.А. Поваров, Б.Г. Поляк, В.М. Сугробов, Г.В. Томаров, М.Д. Хуторской, А.Н. Шулюпин и др.

Одной из важных задач является необходимость расчета характеристик пароводяных потоков в скважинах. Это позволяет перейти от параметров на устье к параметрам резервуара при подсчете запасов месторождения и, наоборот, перейти от параметров резервуара к параметрам на устье при проектировании разработки месторождения. Хорошо построенная математическая модель, описывающая соответствующие процессы и явления, более доступна и удобна для исследования, а также позволяет научиться правильно управлять объектом путем апробирования различных вариантов. С учетом этого была поставлена задача разработать научные основы для расчета течения в стволе добычной геотермальной скважины с последующим созданием математических моделей, отвечающих современным запросам при освоении месторождений парагидротерм.

В настоящее время актуальными являются вопросы, связанные с повышением эффективности использования имеющегося фонда скважин. Один из способов заключается в обеспечении устойчивого режима работы скважин и их перевод из разряда некондиционных в разряд эксплуатационных. В связи с этим была поставлена задача выявить факторы, определяющие развитие неустойчивости газожидкостного потока в добычной геотермальной скважине, и оценить их влияние на результаты опробования скважин.

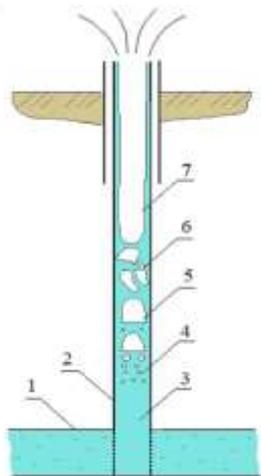
К геотермальному промыслу относится также и оборудование для транспортировки добытого теплоносителя до места использования. При гидравлическом расчете наземных трубопроводов для транспортировки пароводяной смеси рассматриваются потоки не только в трубах горизонтальной ориентации, возможно наличие восходящих и нисходящих участков с различными углами наклона, вплоть до вертикальных. Следует отметить и более широкий спектр местных сопротивлений: возможны не только внезапные расширения, но и компенсаторы, клапаны, отводы и т. д., а также сложные трубопроводы. Кроме того, новые исследования показывают, что трубопровод может выступать как один из факторов стабилизации режима работы скважины. В этой связи была поставлена задача разработать научные основы для расчета пароводяного течения в системе наземной транспортировки и создать математическую модель, соответствующую современным требованиям при освоении месторождений парагидротерм.

Опыт эксплуатации отечественных месторождений парагидротерм выявил ряд конкретных задач, которые удалось решить с использованием разработанных научных основ описания гидрогазодинамических процессов, связанных с двухфазными течениями, и созданных соответствующих математических моделей.

Во **второй главе** рассмотрены теоретические основы описания газожидкостных течений, введены основные понятия и даны определения параметров характеризующих газожидкостную смесь. Проанализированы существующие методы и подходы к описанию течений.

Для вертикальных труб выделяют четыре основные структуры газожидкостного потока: пузырьковую, снарядную, эмульсионную и дисперсно-кольцевую (рис. 1). В горизонтальных трубах может наблюдаться еще расслоенная структура. В настоящее время механизмы смены структур течения изучены недостаточно, но

установлено, что для описания течения различных структур необходимо использовать различные методы и расчетные формулы, поэтому для адекватного описания газожидкостных течений определение режимов течений является весьма важным. На практике используют карты режимов течений, представляющие собой графическое обобщение экспериментальных данных, и эмпирические формулы, корректное использование которых возможно при соответствии условий решаемой задачи условиям экспериментов.



- 1 – подземный коллектор;
- 2 – обсадная колонна;
- 3 – водяное течение;
- 4 – пузырьковое течение;
- 5 – снарядное течение;
- 6 – эмульсионное течение;
- 7 – дисперсно-кольцевое течение.

Рис. 1 – Течение в пароводяной скважине

Для описания газожидкостных течений используют уравнения неразрывности, движения и энергии, формализующие фундаментальные законы физики (закон сохранения массы, второй закон Ньютона и закон сохранения энергии) применительно к особенностям движущейся среды. Их общий вид определяется методом описания, а частный вид зависит от принятых для данного случая допущений. Успех решения конкретных практических задач во многом определяется правильным выбором метода.

При использовании интегрального метода описания течений балансовые уравнения записываются для представительного объема, ограниченного полным сечением канала, что позволяет получить одномерные уравнения. В дифференциальном методе представительный объем движущейся среды имеет характерные размеры намного меньше размера канала. Геометрия канала в этом случае учитывается посредством введения соответствующих граничных условий. Математическое описание существенно усложняется, и в результате получают трехмерные уравнения.

При реализации указанных методов можно записать балансовые уравнения для двухфазной смеси в целом или для каждой фазы в отдельности, что потребует определения дополнительных членов на межфазное взаимодействие внутри представительного объема. Увеличение числа рассматриваемых элементов структуры потока увеличивает число используемых параметров и количество уравнений в математической модели течения, что усложняет ее реализацию.

На практике распространение получил интегральный метод. При этом наиболее просто основные уравнения неразрывности, движения и энергии можно получить, полагая гомогенность среды. Такое предположение не соответствует современным представлениям о газожидкостных течениях, но в некоторых случаях, например, для описания пузырькового течения с хорошо развитой турбулентностью или применительно к критическим потокам, может быть вполне допустимо.

Широкое распространение в рамках интегрального метода получила двухскоростная модель, предполагающая равномерность распределения газосодержаний, скоростей, термодинамических параметров фаз по сечению канала, но учитывающая различие скоростей фаз.

Необходимые для описания пароводяных потоков термодинамические параметры фаз связаны линией насыщения и определяются по соответствующим уравнениям как функции давления. Принимая во внимание, что для сжимаемых сред объемные расходы существенно зависят от давления, для характеристики пароводяной смеси в качестве основных параметров используют, как правило, массовые расходы, а для характеристики качественного состава смеси – массовое расходное паросодержание. При постоянном режиме работы скважины изменение давления может привести к перераспределению массовых расходов фаз за счет дополнительного выделения пара или его конденсации, поэтому для характеристики потока в скважине целесообразнее использовать не расходы фаз, а менее подверженный изменениям расход смеси. К основными измеряемыми расходными параметрам скважин относится также удельная энтальпия заторможенного потока смеси (сумма удельной энтальпии и удельной кинетической энергии). Действительная энтальпия существенно отличается от заторможенной только для высокоскоростных потоков. Все параметры смеси в скважинах испытывают колебания в широком спектре частот. Поэтому измеряемые параметры фактически являются осредненными как по сечению трубы, так и по времени.

В третьей главе рассмотрены особенности истечения пароводяной смеси на геотермальных месторождениях. Доминирующим здесь является дисперсно-кольцевое течение. Его адекватная модель при высоких скоростях обнаруживает разрыв градиента давления, что указывает на наличие критического потока. Критический режим истечения пароводяной смеси характеризуется тремя практическими признаками: независимостью расхода от противодавления, превышением давления истечения (в выходном сечении) над противодавлением и независимостью давления истечения от противодавления. При истечении однофазных сред все указанные признаки наблюдаются одновременно, а при формировании критического газо-жидкостного потока имеет место их последовательное проявление. Практическое подтверждение такой неодновременности было отмечено при проведении экспериментов на специально построенном стенде «Камчатскэнерго» для исследований двухфазных потоков с параметрами смеси близкими к потокам в скважинах на месторождениях парогидротерм. Наличие стадий критического режима истечения, позволяет при реализации последующей стадии в выходном сечении принимать существование предшествующей стадии в сечении выше по потоку.

Попытки описать критические потоки с помощью гомогенных моделей показали существенные расхождения расчетных и опытных данных. Введение в модель скольжения фаз для достижения лучшего согласования расчетных и экспериментальных данных тоже не позволило полностью решить проблему. Предположение о том, что причина несоответствия расчетных и экспериментальных данных может объясняться отклонением состояния фаз от термодинамического равновесия, предполагающим, что истекающая среда фактически является смесью перегретых пара и воды, тоже не нашло подтверждения. Таким образом объяснить аномально высокие расходы критического истечения пароводяной смеси с высоким паросодержанием в рамках одномерных моделей не удалось.

Летом 2013 г. на Паужетском месторождении были проведены комплексные исследования промысла и оборудования станции. В результате наблюдений была выявлена неравномерность распределения фаз по сечению трубы при формировании критического потока, что позволило предположить неоднородность поля скоростей и давлений в сечении канала. В перспективе эту гипотезу следует использовать в качестве основы для разработки модели критического истечения пароводяной смеси.

В задачах практической геотермии критическому истечению предшествует дисперсно-кольцевой режим течения. В главе 3 представлены модели дисперсно-кольцевого течения на основе структурного подхода, заключающегося в отдельном анализе элементов потока. Для жидкой пленки применялся дифференциальный метод, а для парового ядра с диспергированными каплями воды – интегральный. Скорость на границе пленка – ядро принималась равной критической скорости движения насыщенной воды:

$$v = \left(\frac{d\rho_l}{dp} + \frac{(\rho_l - \rho_g) \cdot \rho_l}{\rho_g r} \cdot \left(\frac{dh_l}{dp} - \frac{1}{\rho_l} \right) \right)^{-0.5}, \quad (1)$$

где ρ_g и ρ_l – плотности газа и жидкости, кг/м³; p – давление, Па; r – удельная теплота фазового перехода, ($r = h_g - h_l$), Дж/кг; h_g и h_l – удельные энтальпии воды и пара, Дж/кг.

Малая толщина пленки, ее относительно низкая скорость и отсутствия проекций сил гравитации на направление движения при горизонтальном течении позволили для анализа динамики пленки определяющими считать силы трения. Динамика дисперсного ядра была описана в рамках гомогенной модели, что позволило для потока в целом использовать гомогенную модель, при этом касательное напряжение на стенке трубы считалось равным касательному напряжению на границе пленка – ядро, коэффициент трения принимался равным 0,02.

При моделировании дисперсно-кольцевого течения в вертикальной трубе необходимо учитывать действие гравитационных сил, приобретающих особую значимость при невысоких скоростях, способных вызвать «захлебывание» и «поворот потока» в пленке, что приводит к смене режима течения.

В четвертой главе исследуются гидро-, газо- и термодинамические процессы в пароводяных скважинах. Отмечены основные сложности моделирования пароводяных потоков в скважинах, выполнен обзор различных подходов к описанию

течений, проведен анализ созданных на их основе математических моделей. Предложены и реализованы методики для разрешения выявленных проблем. Представлены разработанные автором математические модели, позволяющие охватить весь спектр задач, возникающих при добычи геотермального флюида на месторождениях парогидротерм.

Задача моделирования течения в скважинах направлена на определение параметров в конечной точке по известным в начальной. При движении теплоносителя в стволе геотермальной скважины возможно чисто водяное течение, не представляющее проблем для расчета, но по мере снятия давления паровая фаза достаточно быстро становится доминирующей по объему и в скважине могут наблюдаться все основные структуры газожидкостного течения (рис. 1). Для описания каждой структуры требуются свои расчетные методики.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что все известные модели используют для описания течений в скважинах интегральный метод и отличаются только акцентами на отдельные эффекты, количеством и видом эмпирических зависимостей, используемых для замыкания систем уравнений. Модель, хорошо описывающая имеющиеся экспериментальные данные, не гарантирует успешного применения в других условиях. Кроме того, детальные экспериментальные исследования в действующих скважинах, практически отсутствуют, что затрудняет оценку качества модели при сравнении с опытными данными. Регистрируемая аппаратура, помещаемая в скважину, испытывает значительное динамическое воздействие пароводяной смеси. Применение отягощений для предотвращения выброса аппаратуры из скважины создает дополнительное возмущение в потоке и влияет на результаты измерений.

В диссертационной работе широко используется математическая модель течения в пароводяной геотермальной скважине WELL-4, разработанная А.Н. Шулюпиным и А.А. Чермошнцевой при решении задачи по прогнозу производительности скважины А-2 Мутновского месторождения для обоснования проекта ее реконструкции. Исходными данными для расчета являются давление и энтальпия в начальной точке расчета, массовый расход смеси и конструктивные параметры скважины. Основным расчетным параметром является перепад давления, позволяющий затем определить давление и энтальпию в конечной точке.

При моделировании течения в скважине полагается его квазистационарность. Фактически рассматривается стационарная гидродинамическая задача, учитывающая медленные (по сравнению с характерным временем гидродинамических процессов) изменения параметров потока. Характерным временем гидродинамических процессов в скважинах следует считать время подъема теплоносителя от зон притоков флюида до устья, оцениваемое десятками секунд, что является весьма незначительным в процессе разработки месторождений, и принятие условия квазистационарности вполне логично.

Для описания динамики флюида в стволе скважины в WELL-4 используется интегральный метод и двухскоростная модель, что позволяет получить одномерные уравнения неразрывности, движения и энергии:

$$\frac{dG}{dz} = 0, \quad (2)$$

$$\rho_g \varphi v_g \frac{dv_g}{dz} + \rho_l (1 - \varphi) v_l \frac{dv_l}{dz} + \frac{(v_g - v_l)}{\pi R^2} \cdot \frac{dG_g}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \frac{2\tau_c}{R} + \rho g_z, \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dz} + \frac{de}{dz} - g_z = \frac{dq}{dz}, \quad (4)$$

где G и G_g – массовые расходы смеси и пара, кг/с; φ – истинное объемное паросодержание; v_g и v_l – скорости пара и воды, м/с; R – радиус трубы, м; τ_c – касательное напряжение на стенке трубы, Па; g_z – проекция вектора ускорения свободного падения на ось z , м/с²; ρ – плотность смеси, кг/м³: $\rho = \rho_g \varphi + \rho_l (1 - \varphi)$; h – удельная энтальпия смеси, Дж/кг: $h = h_{gx} + h_l (1 - x)$; x – массовое расходное паросодержание; e – удельная кинетическая энергия потока, Дж/кг: $e = (xv_g^2 + (1 - x)v_l^2)/2$; dq – изменение удельной энергии потока за счет теплового потока от стенок скважины, Дж/кг.

Для пароводяных потоков удельные энтальпии и плотности фаз определяются по соответствующим уравнениям состояния. Касательное напряжение на стенке трубы для всех режимов течения определяется зависимостью

$$\tau_c = \frac{\xi}{8} (\rho_g v_g^2 \varphi + \rho_l v_l^2 (1 - \varphi)), \quad (5)$$

где ξ – коэффициент трения.

Для замыкания математической модели течения используются выражения для истинного объемного паросодержания или скорость одной из фаз. Универсальной зависимости здесь нет, для каждой структуры течения в WELL-4 используется свой набор формул. Модель описывает чисто водяное течение и пароводяное, для которого возможна реализация трех режимов: с малым паросодержанием, течение переходной структуры и течение с большим паросодержанием. При течении с малым паросодержанием (пузырьковая и снарядная структура) предполагается непрерывная жидкая фаза. Для определения скорости пара используется хорошо зарекомендовавшая себя формула

$$v_g = 1,2w + 0,35 \sqrt{2gR \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)}. \quad (6)$$

Течение с большим паросодержанием подразумевает непрерывную газовую фазу и ассоциируется с дисперсно-кольцевой структурой. Для ее существования требуется выполнения двух условий. Во-первых, объемное расходное паросодержание β должно быть достаточным для формирования ядра потока ($\beta > 0,8$). Во-вторых, скорость в ядре должна быть достаточной для удержания жидкой пленки на стенке, что требует преобладание сил инерции парового ядра над силами тяжести, т. е. число Фруда должно быть больше единицы ($Fr > 1$). При этом переходным от снарядного к дисперсно-кольцевому, а в случае высоких скоростей – от пузырькового к дисперсно-кольцевому является эмульсионный режим течения, в котором указанные условия еще не выполняются, но скорость пара достигла критической

скорости движения насыщенной воды (1). В дисперсно-кольцевом течении вычисляется коэффициент скольжения (отношение скоростей фаз)

$$s = 1 + \frac{13,5(1 - p/p^*)(1 - M^2)}{Fr^{5/12} Re^{1/6}}, \quad (7)$$

где p^* – давление в критической точке ($22,115 \cdot 10^6$ Па); Fr, Re и M – числа Фруда, Рейнольдса и Маха соответственно.

Для определения изменения удельной энергии потока в уравнении сохранения энергии применялась формула с использованием коэффициента нестационарного теплообмена

$$dq = \frac{-\Delta T(z)2\pi\lambda}{G \ln\left(1 + \sqrt{\pi at/R^2}\right)} dz, \quad (8)$$

где $\Delta T(z)$ – разность текущей температуры теплоносителя и его начальной температуры, равной температуре массива горных пород на бесконечной границе, К; λ – коэффициент теплопроводности окружающих пород, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности окружающих пород, м²/с; t – время с начала пуска скважины, с.

Математическая модель WELL-4 была реализована в виде одноименной компьютерной программы. Для решения дифференциальных уравнений (2)–(4), содержащих параметры, определяемые сложной взаимосвязью, потребовалось численное интегрирование. Расчеты ведутся от устья до забоя, на каждом шаге интегрирования вычисляется более сотни параметров в узловой точке, которые используются для расчета давления и энтальпии смеси на нижней границе шага, значения которых используются далее при расчетах в узловой точке следующего шага. Учитывается телескопическая конструкция скважины.

Для проверки достоверности расчетов по WELL-4 использовались экспериментальные данные по скважинам Паужетского месторождения. Для сравнения были также выполнены расчеты по хорошо известной зарубежной коммерческой программе NOLA. Относительное среднеквадратичное расхождение расчетных и опытных давлений на глубине по разработанной WELL-4 составило 16 %, по NOLA при использовании рекомендаций Арманда – 46 %, Оркишевского – 27 % и Чисхолма – 47 %, что в среднем в 2,5 раза (от 1,7 до 2,9) больше чем по WELL-4.

Для обоснования проекта реконструкции скважины А-2 Мутновского геотермального месторождения, с помощью WELL-4 был выполнен прогноз ее производительности при установке от устья до глубины 1200 м внутри существующей обсадной колонны (внутренний диаметр 225 мм) вкладыша внутренним диаметром 160 мм. Результат реконструкции подтвердил прогнозные оценки. Скважина, ранее периодически самозадавливающаяся, стала работать в стабильном режиме. Затраты на реконструкцию скважины А-2 составили около 20 млн. руб., в то время как строительство новой добычной скважины на Мутновском месторождении обошлось бы в 200 млн. руб.

В дальнейшем по WELL-4 для обоснования проектов реконструкции были выполнены расчеты по прогнозу производительности ряда других скважин Мутновского геотермального месторождения. Результаты реконструкций также подтвердили прогнозные оценки. Успешное применение модели явилось подтверждением ее действенности в условиях Мутновского месторождения.

Необходимость решения некоторых практических задач потребовала модификации WELL-4. Исходная модель основана на уравнениях, предполагающих неизменность массового расхода теплоносителя по длине канала течения, а значит, ее использование корректно только до границы питающих зон. Термоводоносный комплекс отечественных геотермальных месторождений состоит из пород, характеризующихся проницаемостью трещинно-жильного типа. По мере бурения скважина пересекает от 1 до 7 питающих зон, толщиной от 1 до 300 м. Ствол скважины в области питания состоит из труб, в стенках которых сделаны отверстия для поступления флюида из термоводоносного комплекса. В некоторых скважинах, пробуренных на стадии разведки месторождения и находящихся в эксплуатации, питание осуществляется через необсаженную трубами часть ствола.

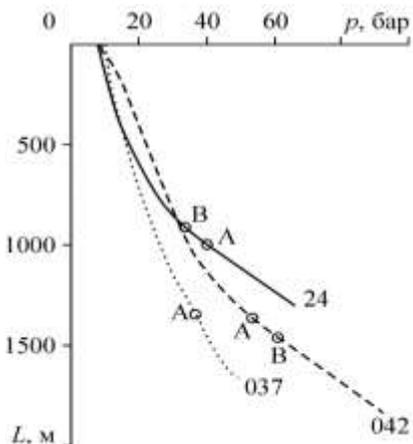
Для расчета течения в области питания на базе WELL-4 была разработана модель WELL-4G. Питание скважины моделируется одной зоной, распространяющейся от верхней границы зон питания до их нижней границы, что потребовало введения в модель дополнительного параметра – толщины зоны питания. Изменение расхода с глубиной было взято линейное, что и учтено в соответствующих уравнениях неразрывности, движения и энергии. При необходимости можно взять другую зависимость. Данная модель была реализована по той же схеме, что и WELL-4. Новую модель рекомендуется использовать в комплексе с предшествующей моделью: от устья скважины до верхней границы зон питания определение параметров проводить по модели WELL-4, ниже – по модели WELL-4G.

С помощью разработанных моделей для работающих скважин 24, 042, 037 Мутновского месторождения парогидротерм были определены профили давления (рис. 2). Зная границы зон питания можно выяснить состояние теплоносителя в них (одно- или двухфазное).

Определение профиля давления в стволе работающей скважины, вскрывающей питающую зону, и сопоставление с данными стационарных условий позволит исследовать фильтрационные потоки в призабойной зоне, оказывающие существенное влияние на производительность скважин.

Для повышения эффективности вскрытия продуктивных пластов в настоящее время активно используется наклонное бурение. Конструкция наклонной скважины предполагает наличие трех участков: верхнего вертикального, среднего искривленного (с задаваемым изменением угла наклона), нижнего наклонного (с постоянным углом наклона). На базе WELL-4 для расчета течений в наклонных скважинах была создана модель WELL-4C. В уравнениях движения и энергии была введена поправка, связанная с наличием отклонения оси скважины от вертикали. При реализации модели в компьютерную программу был введен блок, отвечаю-

щий за определение указанного угла. Остальные формулы и соотношения идентичны WELL-4. По такому же принципу на базе WELL-4G была создана модель WELL-4GC, предназначенная для расчета течений в области питания наклонных скважин.



A – верхняя граница зоны питания;
B – переходу от однофазного течения к двухфазному.

Рис. 2 – Распределение давления по глубине в работающих скважинах 24, 042, 037

Еще одна модификация WELL-4z позволяет проводить расчет в отдельной зоне питающего пласта. Изменения в пласте оказывают существенное влияние на продуктивность скважины. Актуальность разработки такой модели определяется также тем, что в зависимости от технологии возбуждения скважины могут реализовываться различные варианты сочетания активных зон питания, и для исследования этого процесса необходима соответствующая модель. За основу такой модели была взята WELL-4GC. Для известных массовых расходов смеси на границах зоны было предположено равномерное изменение расхода по длине области питания от значения на входе в зону до значения на выходе из зоны, что отразилось на уравнении неразрывности. Исходные данные для расчета те же, что и в WELL-4, но давление и энтальпия смеси задаются на верхней границе зоны питания.

Результаты численного интегрирования позволяют отследить изменения с глубиной интересующих параметров, включая давление и энтальпию смеси. При необходимости провести расчет в следующей зоне полученные в результате расчета по модели параметры для нижней границы зоны следует использовать как входные для нового расчета.

Модели, входящие в семейство WELL-4, создавались под конкретные задачи, возникавшие в ходе практической или исследовательской деятельности, связанные с расчетом течений в скважинах при освоении месторождений парогидротерм, и ориентированы, прежде всего, на отечественные условия. Все указанные модели реализованы в виде одноименных компьютерных программ и зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

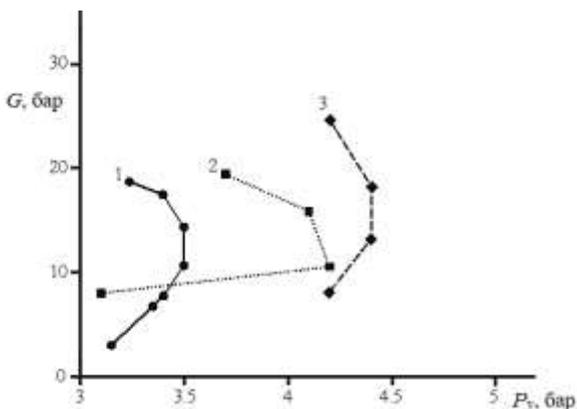
В пятой главе рассмотрены вопросы устойчивости пароводяного течения в геотермальной скважине. Показано, что ранее принятые представления об устойчивой работе скважины противоречат опытным данным. Выявлены факторы, определяющие возникновение и развитие неустойчивости. На базе новых представлений даны рекомендации по практическому обеспечению устойчивой добычи пароводяной смеси.

При реализации геотермальных проектов значительную часть затрат составляет бурение скважин. Обеспечение устойчивого режима работы скважины позволяет повысить эффективность использования уже имеющихся скважин. Устойчивость режима работы скважины зависит как от внешних условий, определяемых процессами в питающем пласте и оборудовании, потребляющем добытый теплоноситель, так и от условий течения в самой скважине.

Опыт эксплуатации геотермальных месторождений выявил ряд особых явлений, наблюдаемых в пароводяных скважинах, способных оказать негативное влияние на устойчивую работу скважины. Гейзерный режим (характеризуется наличием фазы нулевого расхода и несовместим с эксплуатацией), был отмечен, например, в скважинах 5 и Р-1 Паужетского месторождения, вскрывающих слабопродуктивный пласт. Самозадавливание – прекращение работы скважины в связи с тем, что низкое пластовое давление не способно обеспечить работу скважины после падения расхода и соответственного увеличения плотности смеси. Ряд скважин Мутновского (А-2, Э-4 и др.) и Паужетского (106, 121 и др.) месторождений, имеющих статический уровень воды ниже устья, периодически самозадавливались, и для нового запуска требовалось заново возбуждать скважину.

К особым явлениям следует также отнести инверсию графиков производительности. График производительности – основная характеристика продуктивной скважины, выражающая зависимость расхода от устьевого давления, получаемая опытным опробованием сразу после строительства скважины, а также при необходимости в процессе выпусков и эксплуатации. Традиционно считается, что при увеличении устьевого давления расход снижается, но при испытаниях пароводяных скважин в ряде случаев было отмечено, что снижение расхода путем прикрытия регулирующей арматуры на выходе из скважины сначала вело к увеличению устьевого давления до максимального значения, после чего происходило снижение устьевого давления, т. е. при одном устьевом давлении скважина способна работать с двумя различными расходами (рис. 3).

Еще с 60-х годов прошлого века предпринимались попытки объяснить причины возникновения неустойчивости в пароводяных скважинах, но удавалось обосновать только отдельные наблюдаемые явления. Опыт последующих испытаний и эксплуатации выявил такие явления как стабилизация режима работы при увеличении устьевого давления, отсутствие неустойчивости вблизи точки инверсии графика производительности, возникновение неустойчивости при малых расходах, подпадающих под условие устойчивости. Факты, свидетельствующие о том, что скважина в одном случае при заданном давлении работает устойчиво, а в другом – неустойчиво, требуют объяснения и указывают на существование дополнительных условий, обеспечивающих устойчивость режима работы.



- 1 – скважина 108;
- 2 – скважина 120;
- 3 – скважина 123.

Рис. 3 – Графики производительности с инверсией (Паужетское месторождение)

Рассматривая одномерное движение элемента, находящегося в вертикальном канале между сечениями, расположенными на некотором расстоянии друг от друга и анализируя механизм возникновения и развития темпоральной макроскопической неустойчивости, А.Н. Шулюпиным было получено неравенство, соответствующее устойчивой работе скважины

$$\frac{\partial \Delta p_{int}}{\partial G} > \frac{\partial \Delta p_{ext}}{\partial G} = \frac{\partial p_1}{\partial G} - \frac{\partial p_2}{\partial G}, \quad (9)$$

где Δp_{int} – внутренний перепад давления (сумма перепадов давления на трение, конвективное ускорение и гравитацию), Па; Δp_{ext} – внешний перепад давления (разность внешних давлений: p_1 на нижнее и p_2 на верхнее сечение) – для скважины это разность забойного и устьевое давления, Па.

Это неравенство аналогично известному условию Лединегга, полученному для парогенерирующих каналов при значительном подводе тепла. Анализ особенности развития рассмотренной при получении условия (9) неустойчивости в вертикальных каналах без подвода тепла позволил исключить реакцию забойного давления на изменение расхода из числа факторов, способных обеспечить устойчивость, и для скважин условие устойчивости рекомендовано в виде

$$\frac{\partial \Delta p_{int}}{\partial G} + \frac{\partial p_2}{\partial G} > 0, \quad (10)$$

где p_2 – давление на устье, определяемое условиями течения в системе транспортировки теплоносителя от устья, Па.

Нарушение этого условия может иметь место при малом влиянии трения и ускорения, роль которых возрастает с увеличением расхода. Для проявления неустойчивости, в данном случае, определяющей является гравитационная сила, а усиливающим фактором – фазовый переход при декомпрессии, дополнительно снижающий плотность смеси. Этот случай можно классифицировать как гравитационную неустойчивость. С помощью неравенства (10), применяя модель WELL-4, удалось объяснить отмеченные особые явления, способные оказать влияние на устойчивость режима работы скважины.

Одно из следствий выявленного механизма развития неустойчивости проявилось при проведении исследования влияния технологии опробования пароводяных скважин на получаемые графики производительности для получения информации об их эксплуатационных возможностях. В результате проведения вычислительного эксперимента, была установлена зависимость результатов опробования скважин от условий течения вниз по потоку от устья, определяющих второе слагаемое левой части неравенства (10).

На рис. 4 представлены графики производительности, полученные при испытании некоторых скважин Мутновского месторождения парогидротерм: скважины 037, 053, 048 и Гео-1 не испытывали никаких трудностей при вводе в эксплуатацию, скважина 012 оказалась неспособной обеспечить необходимое для эксплуатации давление. Интерес представляют скважины А-2 и А-3. Показав устойчивую работу при опробовании в диапазоне устьевых давлений 7,0–11,9 бар и 3,0–12,2 бар, соответственно, они оказались неспособными к устойчивой эксплуатации с устьевым давлением 7,0–7,5 бар. Влияние временного фактора в данном случае исключается, т. к. попытки ввода в эксплуатацию этих скважин проводились непосредственно перед опробованием и после него.

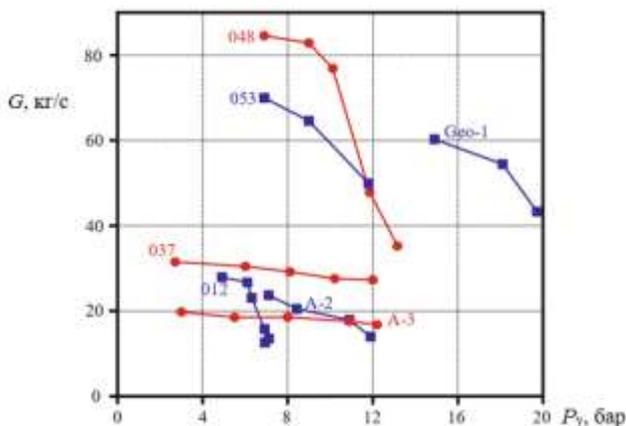


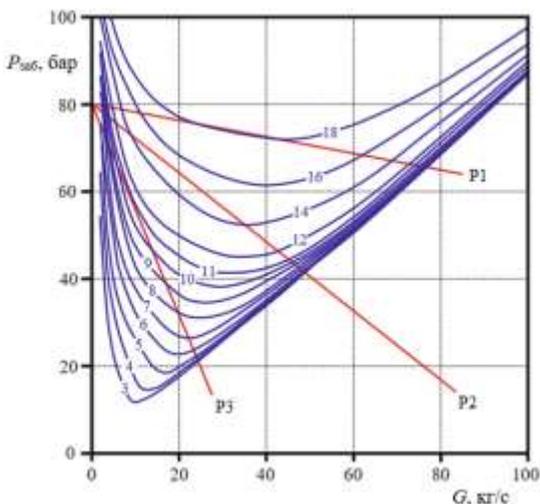
Рис. 4 – Графики производительности скважин Мутновского месторождения

Очевидно, что при равенстве устьевых давлений в процессе опробования и эксплуатации ожидается равенство расходов. Первый член левой части неравенства (10) будет одинаковым в обоих случаях. Наличие в одном случае устойчивого, в другом неустойчивого течения объясняется различием значений второго слагаемого левой части этого неравенства.

При эксплуатации скважина работает на коллектор, или на магистральный трубопровод, или на групповой сепаратор. При этом поддерживается относительно постоянное давление, которое обеспечивает относительное постоянство и устьевого давления, т. е. $\partial p_2 / \partial G$ близко к нулю.

Для моделирования условий эксплуатации с помощью WELL-4 при постоянных независимых от расхода устьевых давлениях (от 3 до 18 бар) были построены графики зависимости забойного давления от расхода для средней по конструкции

скважины Мутновского месторождения: глубина скважины до верхней границы пласта составляет 1400 м; внутренний диаметр до глубины 1100 м – 0,225 м, ниже – 0,152 м; энтальпия – 1200 кДж/кг; статическое давление на верхней границе пласта 80 бар, текущее давление в скважине на уровне верхней границы пласта полагось забойным, пласт – тонким (рис. 5).



P1 – высокопродуктивный;
P2 – среднепродуктивный;
P3 – низкопродуктивный пласт.

Рис. 5 – Графики зависимости забойного давления от расхода при постоянных, независимых от расхода устьевых давлениях (от 3 до 18 бар) и характеристики пластов различной продуктивности

Рассматривая забойное давление как сумму внешнего устьевого давления и внутреннего перепада давления, условие устойчивости можно интерпретировать как требование положительного знака производной забойного давления по расходу, что соответствует возрастающим участкам графика характеристики скважины. В области высоких расходов графики, соответствующие низким устьевым давлениям, сливаются, что объясняется возникновением критического потока на устье. Также на рис. 5 приведены характеристики пластов различной продуктивности (стационарный приток при линейном законе фильтрации). Рабочие точки определяются пересечением характеристик скважины и пласта.

Характеристика P1 проведена через точку экстремума для устьевого давления 18 бар. Скважина с данной характеристикой при среднем для эксплуатации устьевом давлении 8 бар будет соответствовать высокопроизводительным скважинам месторождения. Характеристика P2 проведена через точку экстремума для устьевого давления 14 бар. Скважина с данной характеристикой при среднем давлении 8 бар будет иметь среднюю производительность. Характеристика P3, проведенная через точку экстремума для устьевого давления 7 бар соответствует «проблемной» скважине с низкой производительностью. При постоянном устьевом давлении выше 7 бар рабочих точек нет, т. е. скважина работать не сможет. Именно такая ситуация и сложилась для скважин А-2 и А-3 по значению расходов при давлении 7 бар.

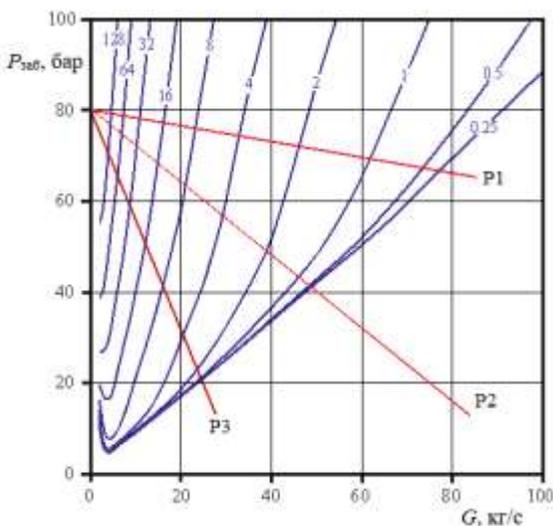
При проведении опробования устанавливаются различные ступени устьевого давления, которые обеспечиваются определенной степенью дросселирования потока на задвижке, расположенной перед входом в расходомерную установку, т. е. вблизи устья имеет место значительный перепад давления, существенно зависящий от расхода. При этом величина $\partial p_2 / \partial G$ значительна и имеет положительный знак, что повышает устойчивость и объясняет факт повышенной устойчивости работы скважин А-2 и А-3 при опробовании.

Для моделирования условий опробования были рассмотрены линейная зависимость устьевого давления от расхода, рекомендованная для критического потока, и квадратичная, рекомендованная для развитого турбулентного течения. В случае квадратичной зависимости в выражении для производной устьевого давления появляется коэффициент 2, что при прочих равных условиях дает стабилизирующий эффект при дросселировании для обычного режима в два раза выше чем для критического. Поэтому при использовании дросселирования как способа стабилизации режима работы скважины, следует избегать критического режима истечения.

На рис. 6 представлены графики зависимости забойного давления от расхода при меняющемся устьевом давлении при квадратичной зависимости

$$p_2 = p_a + 400k_{\text{пл}} G^2, \quad (11)$$

где p_a – атмосферное давление, Па; $k_{\text{пл}}$ – коэффициент потерь давления, $(\text{м}\cdot\text{кг})^{-1}$.



P1 – высокопродуктивный;
P2 – среднепродуктивный;
P3 – низкопродуктивный пласт.

Рис. 6 – Графики зависимости забойного давления от расхода при различных коэффициентах потерь давления (от 0,25 до 128) и характеристики пластов различной продуктивности

В этом случае для характеристики низкопродуктивного пласта P3 рабочие точки, соответствующие условию устойчивости (10), имеются. То есть скважина может работать при меньших расходах и больших устьевых давлениях.

По точкам пересечения характеристик скважины и пластов различной продуктивности для постоянного и меняющегося устьевого давления (квадратичная зависимость) были построены графики производительности (рис. 7).

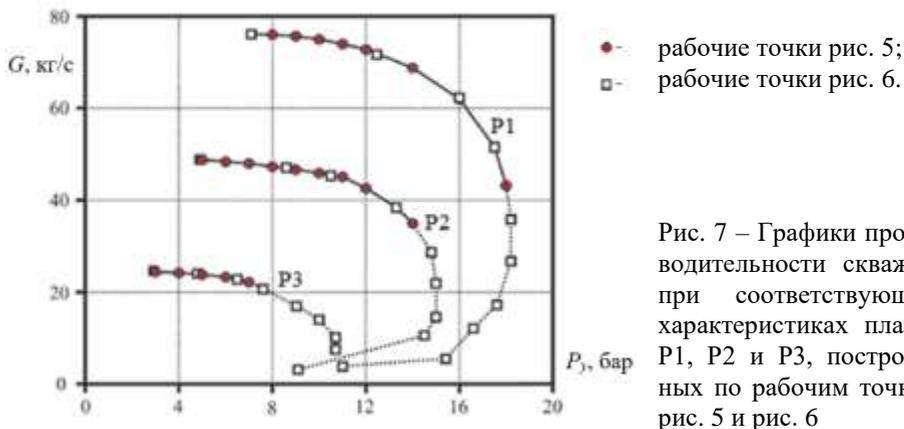


Рис. 7 – Графики производительности скважин при соответствующих характеристиках пласта P1, P2 и P3, построенных по рабочим точкам рис. 5 и рис. 6

В области существования графиков производительности для постоянного давления графики для меняющегося (рис. 6) и постоянного устьевого давления (рис. 5) совпадают, но для меняющегося устьевого давления графики имеют продолжение (пунктир на рис. 7), давая область инверсии (аналогично графикам на рис. 3). Таким образом графики производительности, полученные в ходе опробования скважин, зависят не только от характеристики пласта, но и от технологии проведения опробования.

Еще одним из следствий выявленного механизма развития неустойчивости является возможность существования метастабильного течения – когда условие устойчивости в скважине (10) в целом не выполняется, но на устье нет условий для развития неустойчивости. Данный вид течения был предсказан теоретически. В диссертационной работе представлены результаты исследований в пользу гипотезы о метастабильном течении.

При эксплуатации Мутновской ГеоЭС-1 скважины 4-Э и А-3 вводились в эксплуатацию путем дросселирования потока на устье. При этом степень дросселирования подбиралась эмпирически, а значит, если метастабильное течение существует, то высока вероятность того, что оно реализуется в указанных скважинах при достижении устойчивого режима работы, установленного опытным путем.

Внутренний диаметр скважины 4-Э от устья до глубины 1084 м равен 0,225 м, далее до верхней границы зон питания на глубине 1423 м – 0,152 м. Скважина А-3 до глубины 1100 м имеет диаметр 0,225 м, далее, до зон питания на глубине 1473 м – 0,152 м. Расходные параметры скважин 4-Э и А-3 при устойчивой работе с дросселированием на устье представлены в табл. 1.

Изменение площади сечения внутри рассматриваемого элемента несколько усложняет рассмотрение течения на предмет устойчивости, но как показывает детальный анализ, не влияет на вид конечного соотношения (10). Для определения производной внутреннего перепада давления использовалась WELL-4. При расчете производной устьевого давления по расходу использовалось предположение

о квадратичной зависимости перепада давления между устьем и ГеоЭС от расхода (11). Сумма слагаемых в левой части неравенства (10) в обоих случаях меньше нуля (табл. 1), а значит по данному критерию, согласно расчетам, обе скважины не должны работать устойчиво, но на практике имело место устойчивое течение, что и является аргументом в пользу гипотезы о метастабильном течении.

Табл. 1 – Рабочие параметры и показатели устойчивости скважин 4-Э и А-3 Мутновского месторождения

Показатель	Скважина 4-Э	Скважина А-3
Устьевое давление, бар	8,0	9,2
Расход, кг/с	20,9	18,1
Энтальпия, кДж/кг	1110	1261
Давление ГеоЭС, бар	6,3	6,3
$\partial \Delta p_{int} / \partial G$, кПа·с/кг	-116	-74
$\partial p_2 / \partial G$, кПа·с/кг	16	32

Практика эксплуатации скважин, устойчивость работы которых обеспечивается дросселированием на устье, показала, что срок их службы значительно меньше срока службы обычных скважин. Дальнейшие исследования устойчивости пароводяного течения могут способствовать созданию методик по увеличению срока службы проблемных, с точки зрения устойчивости, скважин.

Поскольку устойчивость режима работы скважины определяется не только процессами в питающем пласте и условиями течения в самой скважине, но и внешними условиями, в **шестой главе** рассмотрены вопросы, связанные с условиями транспортировки извлеченного флюида до места использования.

В начале эксплуатации геотермальных месторождений сепарация осуществлялась вблизи устья скважин: пар транспортировался по трубопроводам на станцию, а вода сливалась на рельеф. Ужесточение экологических требований к разработке месторождений, развитие технологий химических производств, использующих в качестве сырья геотермальную воду, стремление эффективнее использовать тепловой потенциал геотермальных флюидов (не только пара, но и воды), а также возможность управлять промыслом в пиковом режиме (с изменяющимся объемом добычи) привели к активному внедрению в практику эксплуатации геотермальных месторождений транспортировки теплоносителя в виде пароводяной смеси.

Кроме отмеченных достоинств транспортировка пароводяной смеси имеет и проблемы. На стадии проектирования трубопровода возникает проблема выбора его диаметра, который, с одной стороны, обеспечил бы минимальные гидравлические потери, с другой – устойчивый режим транспортировки. Требуется знать взаимосвязь перепада давления с расходом, учитывая при этом зависимость расхода скважин от устьевого давления, т. е. возникает необходимость гидравлического расчета трубопровода. Исходными данными для гидравлического расчета транспортировки пароводяной смеси в условиях геотермальных месторождений служат графики производительности (для учета возможных изменений расходных параметров, вводится запас

надежности, обеспечивающий нормальный режим работы трубопровода при возможных вариациях параметров), рабочее давление на входе в ГеоЭС (конечная точка трубопровода) и геометрия трассы. Практическое решение данной задачи предполагает большой объем вычислительной работы, что обуславливает необходимость применения математического моделирования.

Учитывая проектные упрощения при строительстве первых трубопроводов эксплуатирующее предприятие ОАО «ГЕОТЕРМ» предложило А.Н. Шулюпину и А.А. Чермошнцевой выполнить гидравлический расчет проектируемого трубопровода пароводяной смеси от скважины 013 Мутновского геотермального месторождения. Для выполнения поставленной задачи была разработана компьютерная программа MODEL, использующая для расчета модель дисперсно-кольцевого режима течения в горизонтальной трубе, описанную в главе 3.

При расчете перепада давления в MODEL учитывается перепад давления на трение и на местные сопротивления. Параметры определяются в одной узловой точке, что вполне приемлемо для коротких труб. Длинные трубы следует разбить на расчетные участки длиной до 200 м. Параметры состояния теплоносителя, включая массовое расходное паросодержание, определяются по уравнениям для чистой воды и водяного пара в состоянии насыщения. Перед началом расчета проверяется принципиальная возможность транспортировки смеси без пульсаций, что обеспечивается поддержанием дисперсно-кольцевого режима течения, при этом используется условие

$$x > \left(1 + 1,6\sqrt{\rho_l/\rho_g}\right)^{-1}. \quad (12)$$

Выбор рационального диаметра осуществляется в соответствии с неравенством, рекомендованным по результатам исследований на стенде «Камчатск-энерго»

$$D \leq 0,278(G/\rho_w)^{0,4}, \quad (13)$$

где D – диаметр трубы, м; ρ_w – плотность смеси по гомогенной модели, кг/м³.

Перед выполнением заказа был осуществлен расчет уже существующего трубопровода от скважины 037 с использованием разработанной компьютерной программы MODEL. При этом трубопровод длиной 2080 м разбивался на участки, и расчет выполнялся последовательно для каждого из них. Расхождение расчетного и фактического перепадов давления не превысило 3 %. Такое согласование даже при однофазном течении считается удачным.

Простота применения, а главное достаточная точность проводимых расчетов, предопределили широкое использование программы MODEL. Впоследствии все трубопроводы пароводяной смеси на Мутновском месторождении рассчитывались с ее помощью (рис. 8).

Расчеты выполнялись как для выработки оптимальных решений по возможным вариантам транспортировки, так и для определения конструктивных параметров для дальнейшего рабочего проектирования. Было обоснованно множество модификаций трубопроводов (замена П-образных компенсаторов на сильфонные, удаление нефункциональной запорной арматуры и пр.). Эксплуатация трубопро-

водов подтвердила эффективность расчетов. Пульсационные режимы не наблюдались, перепады давления близки к прогнозируемым значениям.

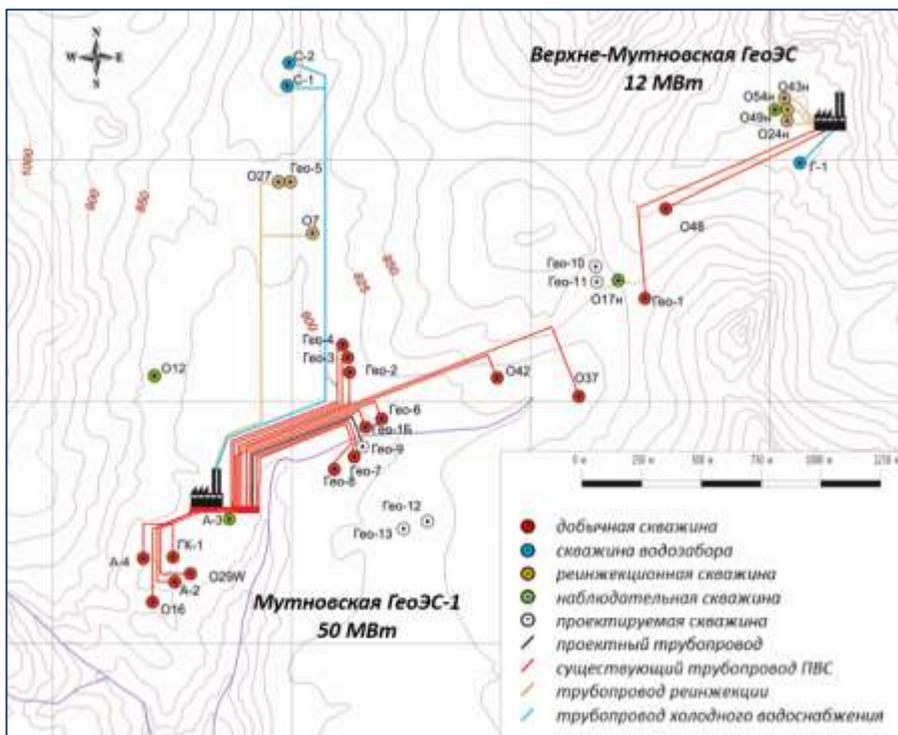


Рис. 8 – Трубопроводы на Мутновском месторождении (Камчатка)

Несмотря на успешное применение программы MODEL, следует отметить, что она ориентирована на дисперсно-кольцевое течение в узком диапазоне скоростей. Опыт эксплуатации геотермальных месторождений показал, что транспортировка пароводяной смеси при выполнении условия (13) сопряжена с заметными гидравлическими потерями, а при отсутствии восходящих участков это условие слишком жесткое. К тому же в трубопроводе, изначально рассчитанном на определенный расход, из-за снижения производительности скважин со временем расход может упасть до значений, не обеспечивающих выполнение этого условия. Возникает необходимость корректировки условия устойчивости течения, дающего возможности расширения расчетной методики в область меньших скоростей.

Устойчивость режима работы скважины соответствует неравенству (10), в котором второе слагаемое левой части определяется условиями течения в системе наземной транспортировки теплоносителя. При этом трубопровод выступает как

стабилизирующий фактор: если на устье происходит спонтанное увеличение расхода, увеличивается перепад давления в трубопроводе, увеличивается устьевое давление, развитие неустойчивости подавляется, в случае спонтанного снижения расхода на устье, снижается перепад давления в трубопроводе, снижается устьевое давление, вызывая компенсационное увеличение расхода.

Отмеченные недостатки актуализировали разработку научных основ транспортировки пароводяной смеси и создание методики расчета перепада давления в трубопроводе, корректно учитывающей гравитационную составляющую перепада давления с учетом современных представлений об устойчивости. Возможность прогнозировать возникновение неустойчивых режимов эксплуатации скважин позволит принимать соответствующие решения по их устранению на стадии проектирования трубопроводов.

Поскольку давление в магистральном трубопроводе не имеет значимой зависимости от расхода конкретной скважины, то условие устойчивости системы будет определяться положительным значением первого слагаемого (10)

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{int}}}{\partial G} > 0. \quad (14)$$

Используя теоретически обоснованный критерий устойчивости (14), на базе компьютерной программы MODEL, с учетом гравитационной составляющей перепада давления, была создана новая математическая модель SWIP (Steam Water Inclining Pipeline).

Для заданного начального давления, расхода и энтальпии смеси рассчитываются параметры состояния теплоносителя с помощью уравнений для чистой воды и водяного пара в состоянии насыщения. Внутренний перепад давления в трубопроводе определяется по формуле

$$-dp = \frac{4\tau_c}{D} dl + \frac{0,7\zeta \rho_w w^2}{L} dl + \rho g \sin \theta dl, \quad (15)$$

где ζ – суммарный коэффициент местных сопротивлений; θ – угол наклона оси трубы относительно горизонтальной плоскости, dl – длина элемента трубы, м.

Первое слагаемое правой части в (15) определяет составляющую перепада давления на трение, при этом касательное напряжение вычисляется по формуле

$$\tau_c = (\rho_l v_l^2 (1 - \varphi) + \rho_g v_g^2 \varphi + \rho_w w^2) \xi / 16. \quad (16)$$

Второе слагаемое правой части в (15) описывает перепад давления на местных сопротивлениях (формула основана на гомогенной модели и рассчитана на широкий диапазон скоростей). Третье слагаемое описывает гравитационную составляющую перепада давления по направлению потока. Искомый перепад давления определяется интегрированием (15) по всей длине трубопровода. При этом основная сложность заключается в определении плотности смеси, зависящей от истинного объемного паросодержания, которое не может быть определено теоретически, и на практике используют различные эмпирические зависимости. Анализ и исследование основных определяющих факторов, а также численное моделирова-

ние коэффициентов в различных типовых корреляциях, позволили получить на основе «модели дрейфа» соотношения для определения истинного объемного паросодержания, используемые в математической модели SWIP.

Представленная модель была сначала реализована в компьютерной программе SWIP-S для коротких труб, со схемой расчета аналогичной при создании компьютерной программы MODEL – все величины и их градиенты определялись для одной узловой точки и считались неизменными на всем расчетном интервале (на практике всегда имеется возможность разбить трубопровод на участки, в пределах которых данное упрощение приемлемо).

Не имея достаточного количества экспериментальных данных для верификации разработанной модели, был принят во внимание богатый и успешный опыт применения программы MODEL по расчету трубопроводов на отечественных месторождениях. Поскольку MODEL не учитывает гравитационную компоненту для сравнения результатов расчетных перепадов давления, полученных по MODEL и SWIP-S, была взята горизонтальная труба типичная для Мутновского геотермального месторождения. В номинальном диапазоне расходов (50–60 кг/с) имело место хорошее согласование.

Для верификации новой модели в условиях наклонных труб использовались данные по трубопроводу от скважины Гео-1 на Мутновском месторождении. В настоящее время этот трубопровод имеет самый большой перепад высот (110 м) из действующих трубопроводов пароводяной смеси на Камчатке: длина 1050 м, внутренний диаметр 0,406 м, суммарный коэффициент местных сопротивлений 8. При расчете суммарного перепада давления трубопровод разбивался на 7 участков. Погрешность определения тестового перепада давления оценивается $\pm 0,2$ бар. Было получено хорошее согласование расчетных и опытных перепадов давления (табл. 2).

Табл. 2 – Параметры на входе в трубопровод (устье скважины) и результаты расчетов

Дата	Расход, кг/с	Энтальпия, кДж/кг	Устьевое давление, бар	Расчетный перепад, бар	Опытный перепад, бар
16.09.2011	65,0	1221	11,3	1,52	1,5
11.09.2019	65,3	1121	8,9	1,76	1,8

Таким образом, предложенная модель в типовых условиях транспортировки пароводяной геотермальной смеси хорошо согласуется с расчетом по программе MODEL, которая в указанных условиях хорошо согласуется с опытными данными. Для нетиповых условий (значительный наклон трубопровода, низкие скорости потока) предпочтительнее выглядит новая модель SWIP.

В дальнейшем, математическая модель SWIP была реализована в виде компьютерной программы SWIP-L с возможностью проводить расчеты для длинных трубопроводов, состоящих из неоднородных участков (до 15 участков) с различной геометрией трассы (разной длины и наклона: восходящие, горизонтальные и

нисходящие), не фиксируя промежуточные расчеты с целью введения полученных данных в качестве исходных для следующего участка, что обеспечивается численным интегрированием (15) с шагом 10 см. Предпочтительность использования такого подхода очевидна. Это подтверждается и сопоставлением результатов расчета по SWIP-L с результатами испытаний для трубопровода от скважины Гео-1 на Мутновском месторождении.

Все компьютерные программы для наземной транспортировки пароводяной смеси зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Современные представления о режиме работы добычной скважины на месторождениях парогидротерм свидетельствуют о том, что трубопровод является одним из факторов стабилизации режима ее работы. Конструкция трубопровода способна повлиять на режим работы системы скважина – трубопровод в целом.

Для исследования неустойчивости пароводяного течения по компьютерной программе SWIP-S была рассчитана величина $\partial P_{int} / \partial G$ (левая часть неравенства (14)), характеризующая устойчивость. Неустойчивость была выявлена не только в восходящих, но и в нисходящих потоках.

Спонтанное увеличение расхода в восходящем потоке снижает плотность смеси, силу тяжести и приводит к увеличению суммарной силы, вызывающей движение. Такое увеличение расхода в нижней части не приводит к снижению массы смеси в трубе в целом. Эффективное развитие неустойчивости возможно только вверх по потоку, т. е. в направлении от выхода из трубы к устью.

В нисходящих потоках при экстремально малых расходах, когда скорость воды больше скорость пара, спонтанное увеличение расхода может привести к увеличению плотности смеси, силы тяжести и суммарной силы, вызывающей движение. Такое увеличение расхода на выходе из трубы не увеличит силу тяжести в трубе в целом. При этом спонтанное увеличение расхода на выходе из трубы не увеличит силу тяжести в трубе в целом, и развиваться неустойчивость будет иначе. В частности, для нисходящих потоков не следует ожидать наиболее опасных проявлений неустойчивости аналогичных самозадавлению в вертикальных.

С применением новой модели было проведено множество численных экспериментов для выяснения оптимальной конструкции трубопроводов, выработаны практические рекомендации по их проектированию. Исследована зависимость минимальной приведенной скорости, обеспечивающей устойчивое течение, от угла наклона трубы. Установлено, что теоретически определяемое условие гравитационной неустойчивости течения в вертикальных восходящих потоках соответствует эмпирическому критерию, определяющему предельную скорость устойчивого течения, ранее использовавшемуся в программе MODEL. Для типовых условий Мутновского месторождения расхождение расчетных предельных скоростей составляет 4 %.

В седьмой главе рассмотрен ряд практических задач, связанных с гидродинамическими процессами при добыче и транспортировке пароводяной смеси на геотермальных месторождениях, решаемых с помощью разработанных научных основ.

Для выяснения причин снижения со временем объемов вырабатываемой электроэнергии на Паужетской ГеоЭС и принятия мер по стабилизации и увеличению добычи летом 2013 г. были проведены комплексные исследования промысла и оборудования станции, включавшие опробование значительной части добычных скважин с целью получения новых графиков производительности.

Новые измерения выявили небольшое снижение расхода скважин при номинальном устьевом давлении и существенное снижение максимального рабочего давления, что сказывается на общей производительности промысла и является причиной вывода из эксплуатации скважин. Это может быть связано со снижением давления в подземном коллекторе, питающем скважины в процессе эксплуатации («сработка») и со снижением его фильтрационных свойств. «Сработка» в коллекторе практически исключает возможность положительного результата от строительства новой или реконструкции имеющейся скважины на эксплуатируемом участке. Снижение же фильтрационных свойств коллектора более вариативно, и допускает возможность повышения верхнего предела давления путем сравнительно недорогой реконструкции скважин.

С целью установления причины были взяты данные наблюдений по скважинам 103, 108 и 123. Диапазон расходов по ним имеет общие точки для прежнего (до 1979 г.) и нового опробования (2013 г.). Результаты расчетов давления на верхней границе питающего коллектора (для одних и тех же расходов) представлены в табл. 3.

Табл. 3 – Расчетное давление на верхней границе питающего коллектора

Скважина, глубина	Год	Устьевое давление, бар	Расход, кг/с	Энтальпия, кДж/кг	Давление в пласте, бар
103, 320 м	1973	7,4	16,5	775	31,1
	2013	5,9	16,5	808	17,9
108, 190 м	1975	6,1	8,4	783	12,8
	2013	3,4	8,4	754	5,7
123, 260 м	1978	6,7	17,5	821	16,5
	2013	4,4	17,5	879	6,7

Снижение давления в термоводоносном комплексе Паужетского геотермального месторождения за время эксплуатации составило 7–13 бар. Причем раньше в скважинах 108 и 123 термодинамические параметры флюида на забое соответствовали однофазному (жидкому) состоянию, теперь – двухфазному, т. е. зона кипения распространилась на питающий коллектор. Это затрудняет приток к скважине, снижает ее производительность и приводит к выводу скважины из эксплуатации. Расширение зоны кипения может привести к формированию в термоводоносном комплексе «паровых шапок», которые в свою очередь могут вызвать «геотермальные взрывы». Кроме того, кипение в коллекторе может сопровождаться отложениями в фильтрующих каналах, что также снижает приток. Для достижения приемлемого уровня добычи теплоносителя требуется освоение новых участков месторождения.

Для эффективной эксплуатации парогидротермальных месторождений необходимо получение практической характеристики питающего пласта. Непосредственное измерение на забое сложная, а в некоторых случаях технически невыполнимая задача. В этой связи возник вопрос о возможности расчетного определения характеристик питающего пласта добычной скважины по данным измерений на устье. Точность расчета забойного давления по данным устьевых измерений зависит как от погрешности используемой расчетной методики, так и от погрешности определения исходных данных. Наиболее значимую роль играет погрешность измерения энтальпии на устье, используемой в качестве исходной величины. При энтальпии 800 кДж/кг, соответствующей средней величине для эксплуатирующихся в настоящее время скважин Паужетского месторождения, было рассмотрено влияние только одной этой погрешности на результаты определения забойного давления для пласта с однофазным флюидом (вода). По допустимому значению погрешности измерения энтальпии определялся диапазон разброса значений определения давления. Вычисленное при этом предельное значение водопроницаемости оказалось в 2–5 раз ниже действительных, что, конечно же, неприемлемо. С ростом энтальпии скважин, возможности расчетного определения характеристик пласта будут еще ухудшаться, поэтому для скважин Мутновского месторождения этот способ также неприемлем.

Расчеты и натурные эксперименты показывают, что и на Мутновском, и на Паужетском месторождениях имеются скважины, питающиеся двухфазным флюидом. В этом случае взаимосвязь расхода и давления на верхней и нижней границах области питания скважины может существенно отличаться. Рассматривая давление на верхней границе области питания от расхода в качестве забойного давления была проанализирована методика его определения, положенная в основу математической модели WELL-4. Средняя погрешность расчетного определения среднего градиента давления на пароводяном участке составляет $\pm 8\%$. По проведенным оценкам диапазон погрешности расчета перепада давления от забоя до устья составит 32%. И если в результате расчетного определения забойного давления для различных устьевых расходных параметров, полученных в ходе испытания скважин, диапазон его изменения будет существенно превышать указанную величину, то расчетное определение характеристики пласта будет возможным.

Указанному условию соответствуют только испытания по скважине 106 Паужетского месторождения, проведенные в 1977 г. Для находящихся в настоящее время в эксплуатации скважин Паужетского и Мутновского месторождений такой способ неприемлем.

В комплекс мероприятий, проводимых на Паужетском месторождении летом 2013 г., были включены исследования, направленные на повышение эффективности использования имеющегося фонда скважин. Планировалась реконструкция системы транспортировки от скважин 103, 120, 122 и 131. За счет снижения гидравлических сопротивлений должен снизиться перепад давления в системе транспортировки, что при фиксированном давлении на входе в станцию снизит устьевое давление и заметно увеличит расход добываемого теплоносителя. Принимая во внимание неравенство, обеспечивающее устойчивую работу скважин, снижение

устьевого давления и соответственный рост расхода снизит величину второго слагаемого левой части (10), что может привести к потере устойчивости режима работы скважины.

Для действующих скважин Паужетского месторождения по эксплуатационным значениям расходных устьевые параметры определялась производная забойного давления по расходу для верхней границы зоны питания скважины. Расчеты выполнялись по WELL-4 (табл. 4).

Табл. 4 – Текущие эксплуатационные и расчетные параметры добычных скважин Паужетского месторождения

Скважина	Устьевое давление, бар	Расход, кг/с	Энтальпия, кДж/кг	$\partial p_{\text{заб}} / \partial G$, бар·с/кг
103	5,5	28,1	775	0,40
106	2,6	26,1	696	0,18
108	3,1	31,6	741	0,45
120	4,1	14,0	814	-0,04
121	3,0	18,4	830	0,15
122	4,1	41,6	846	0,19
123	3,5	36,3	863	0,19
131	5,1	37,8	802	0,38
ГК-3	2,6	30,2	750	0,49

Только для скважины 120 (с учетом погрешностей расчетных моделей и измерения исходных данных) было получено отрицательное, близкое к нулю, значение (-0,04), что не исключает возможность устойчивой эксплуатации скважины за счет стабилизирующего эффекта гидравлических сопротивлений (перепад давления от устья до магистрального трубопровода превосходит 1 бар). Опасения в отношении устойчивости вызывают скважины 106 и 121, у которых потери давления при транспортировке теплоносителя от устья до магистрального паропровода весьма малы, т. е. практически отсутствует стабилизирующий эффект гидравлических сопротивлений. В совокупности с малым значением $\partial p_{\text{заб}} / \partial G$ это указывает на возможные проблемы с обеспечением устойчивого режима работы, что подтверждается практикой эксплуатации: скважина 121 – иногда, а скважина 106 часто самозадавливались.

По скважинам, включенным в план реконструкции (103, 120, 122 и 131) также по WELL-4 были выполнены расчеты по прогнозируемым расходным параметрам. Для всех скважин получено $\partial p_{\text{заб}} / \partial G > 0$, что указывает на устойчивую работу после модификации. К настоящему моменту планируемая реконструкция частично выполнена, потери устойчивости режима работы не возникало. Таким образом, повышение производительности скважин Паужетского месторождения путем снижения гидравлических сопротивлений при транспортировке теплоносителя не оказывает негативного влияния на режим работы скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена решению крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение – разработке отвечающих современным требованиям научных основ описания гидрогазодинамических процессов при добыче двухфазного флюида и развитию их приложений для комплексного решения задач, возникающих в практике освоения парогидротермальных месторождений. Научно обоснованы, разработаны, реализованы и внедрены технологические решения по эффективному освоению геотермальных месторождений Камчатки, что вносит значительный вклад в развитие экономики дальневосточного региона России. Итогом проведенных исследований явились следующие результаты:

1. На основе анализа опыта освоения геотермальных месторождений и принимая во внимание новые направления в развитии технологий обустройства промыслов, определены основные проблемы, связанные с течением пароводяной смеси в элементах системы добычи и транспортировки теплоносителя.

2. Установлено, что гипотеза о наличии перегрева фаз не позволяет объяснить аномально высокие массовые расходы, наблюдаемые при критическом истечении пароводяной смеси в характерных для геотермальных месторождений условиях. Данная особенность может являться следствием неоднородности поля скоростей, распределения фаз и давлений при формировании критического потока, распространяющейся на выходное сечение канала.

3. Разработано семейство математических моделей WELL-4 и на их основе созданы компьютерные программы, позволяющие решать весь спектр задач, связанных с расчетом пароводяных течений в добычных скважинах, как поставленных в ходе освоения отечественных и зарубежных месторождений, так предполагаемых с учетом тенденций развития технологий освоения месторождений.

4. На основе численного моделирования установлено наличие гравитационной неустойчивости пароводяного течения в добычных скважинах, выявлены особенности ее проявления, в том числе обоснована гипотеза о метастабильном течении, характеризующимся нарушением условия устойчивости течения в скважине в целом при наличии в верхней части участка, обладающего внутренней устойчивостью и препятствующего развитию неустойчивости.

5. На основании анализа опытных данных по испытанию скважин А-2 и А-3 Мутновского месторождения и сопоставления их с результатами численного моделирования доказана теоретически предсказанная зависимость результатов опробования скважин от условий течения вниз по потоку от устья. Установлено влияние дросселирования на увеличение верхнего предела рабочего давления на графике производительности.

6. Разработана отвечающая современным требованиям математическая модель SWIP для расчета пароводяного течения в наземных трубопроводах на геотермальных месторождениях, учитывающая гравитационную составляющую перепада давления, и созданы компьютерные программы по ее реализации для коротких и длинных трубопроводов.

7. Показано, что риск возникновения гравитационной неустойчивости пароводяного течения в трубопроводах на геотермальных месторождениях существует при скоростях, близких к характерным номинальным значениям (около 25 м/с). При снижении производительности скважин со временем, имеющем место в процессе разработки месторождения, этот риск будет возрастать.

8. Для типовых условий Мутновского месторождения установлена близость (в пределах 4 %) предельных скоростей для обеспечения устойчивого течения, определяемых теоретически обоснованным условием гравитационной неустойчивости в вертикальных восходящих потоках и эмпирическим критерием, ранее использовавшемуся в программе MODEL для расчета трубопроводов. Выявлены особенности проявления гравитационной неустойчивости в наклонных каналах, включая возможность ее наличия в нисходящих течениях.

9. Установлено снижение давления в термоводоносном комплексе Паужетского месторождения парогидротерм (на 7–13 бар за время эксплуатации), сопровождающееся распространением зоны кипения на питающий коллектор, что требует рассматривать условия фильтрации в термоводоносном комплексе с учетом двухфазного состояния флюида и учитывать опасность геотермальных взрывов за счет формирования «паровых шапок».

10. Определены пределы возможности расчета фильтрационных характеристик питающего пласта по данным измерений на устье добычных скважин месторождений парогидротерм, которые сокращаются с ростом энтальпии теплоносителя и водопроницаемости пласта. Обосновано отсутствие такой возможности для находящихся в эксплуатации скважин Паужетского и Мутновского месторождений.

11. На основе новых представлений об устойчивости течения выяснено, что мероприятия по повышению производительности скважин Паужетского месторождения путем снижения гидравлических сопротивлений при транспортировке теплоносителя не оказывают негативного влияния на режим работы скважин.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Шулюпин А.Н., Чермошнцева А.А. Гидравлический расчет трубопроводов для транспортировки пароводяной смеси на геотермальных промыслах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2004. Приложение № 4. С. 97–102.

2. Чермошнцева А.А. Течение теплоносителя в геотермальной скважине // Математическое моделирование, 2006. Т. 18. № 4. С. 61–76.

3. Шулюпин А.Н., Чермошнцева А.А. Влияние теплообмена с окружающими породами на эксплуатационные параметры пароводяной скважины // Научный журнал КубГАУ. 2007. № 23(03). URL: <http://ej.kubagro.ru/2007/03/pdf/02.pdf>

4. Чермошнцева А.А., Плотникова И.С. Численные схемы решения двумерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах // Вестник КамчатГТУ. 2011. № 15. С. 21–25.

5. Чермошенцева А.А., Плотникова И.С., Карноушенко М.О. Особенности реализации численных схем решения двумерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах // Вестник КамчатГТУ. 2011. № 17. С. 79–83.
6. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Гидравлический расчет транспортировки пароводяного теплоносителя геотермальных электростанций // Известия вузов проблемы энергетики. Казань. 2012. № 3-4. С. 28–37.
7. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. О расчете пароводяного течения в геотермальной скважине // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 8. С. 14–19.
8. Чермошенцева А.А. Проблемы математического моделирования пароводяных течений при освоении геотермальных месторождений // Вестник КамчатГТУ. 2013. № 23. С. 43–47.
9. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Оценка изменения условий в термоводоносном комплексе Паужетского месторождения парогидротерм // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 4. С. 82–88.
10. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Оценка максимальных расходов добычных скважин Паужетского месторождения парогидротерм // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 7. С. 378–382.
11. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Мизерханов Г.С., Васянович Ю.А. Математическая модель пароводяного течения в геотермальной скважине в зоне питания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 12. спец. вып. 5: Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. С. 49–57.
12. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Пароводяное течение в геотермальной скважине // Теплофизика и аэромеханика, 2015. Т. 22. № 4. С. 493–499.
13. Чермошенцева А.А., Шулюпин А.Н. Расчет течений в пароводяных геотермальных скважинах по математическим моделям WELL // Вестник КамчатГТУ. 2015. № 33. С. 29–33.
14. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В. О расчете характеристик питающего пласта пароводяной скважины по данным измерений на устье // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 6. С. 360–368.
15. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В. Об устойчивости работы скважин при разработке месторождения парогидротерм // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 4. С. 4–9.
16. Шулюпин А.Н. Чермошенцева А.А. Семейство математических моделей WELL-4 для расчета течений в пароводяных геотермальных скважинах. // Математическое моделирование, 2016. Т. 28. № 7. С. 56–64.
17. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Некоторые особенности критического истечения пароводяной смеси // Вестник КамчатГТУ. 2017. № 39. С. 25–31.
18. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Чернев И.И. Метастабильное течение в пароводяной геотермальной скважине // Вестник КамчатГТУ. 2018. № 43. С. 37–43.
19. Chermoshentseva A., Shulyupin A. The tasks of hydraulics of steam-water wells in the development of steam-hydrothermal fields // E3S Web of Conferences «VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources"». 2018. V. 56. N. 01009. 7 p.

20. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В. Особенности интерпретации результатов опробования скважин высокопотенциальных месторождений теплоэнергетических вод // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 21–30.

21. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н. Новые вызовы при освоении месторождений парогидротерм с транспортировкой пароводяной смеси // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 43–49.

22. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. Numerical study of the stability of the steam-water flow in pipelines of geothermal gathering system // CEUR Workshop Proceedings (Information Technologies and High-Performance Computing). 2019. N. 2426. P. 103–109.

23. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Васянович Ю.А., Фаткулин А.А. Течение в пароводяных скважинах в области отдельной зоны питающего пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. спец. вып. 30: Проблемы освоения ресурсов Дальнего Востока. С. 141–149.

24. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. New data on the stability of flow in steam-water geothermal well //3rd International Geothermal Conference GEOHEAT 2019, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 367. N. 012024. 10 p.

25. Shulyupin A.A., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. A new program for the hydraulic calculation of steam-water mixture pipelines in geothermal fields // E3S Web of Conferences, «8th International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources", PCDG 2020». 2020. N. 04004. 7 p.

26. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н. Влияние геометрии трассы трубопровода на устойчивость пароводяного течения при эксплуатации ГеоЭС // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2020. Т. 32. № 3. С. 143–153.

27. Chermoshentseva A.A., Shulyupin A.N. Comparative analysis of computer programs for hydraulic calculation of steam-water mixture in pipelines // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 895. N. 012011.

28. Чермошенцева А.А., Шулюпин А.Н. Развитие математических моделей для расчета параметров при транспортировке пароводяной смеси // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2021. Т. 36. № 3. С. 94–109.

29. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 165–176.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660776 SimWell-4 / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В.; рег. 22.09.2016.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660775 SimWell-4G / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В.; рег. 22.09.2016.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20177660982 InclinedWell / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В.; рег. 02.10.2017.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20177660980 InclinedWell-G / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В.; рег. 02.10.2017.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617611 Модель трубопровода / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Константинов А.В., Фараонов А.А.; рег. 26.06.2018.

35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612396. WELL-4z / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н., рег. 19.02.2019.

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660438. SWIP-S / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Чернев И.И., Варламова Н.Н., рег. 03.09.2020.

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619598. SWIP-L / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Чернев И.И., Варламова Н.Н.; рег. 24.05.2022.

Монографии:

38. Чермошенцева А.А., Шулюпин А.Н. Математическое моделирование пароводяных течений в элементах оборудования геотермальных промыслов. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2011. – 144 с.

39. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Чернев И.И., Любин А.А., Варламова Н.Н. Теоретические основы парлифтной добычи геотермальной энергии. Хабаровск: ООО «Амурпринт», 2024. – 438 с.

Статьи в прочих изданиях:

40. Чермошенцева А.А. О значении межфазного теплообмена при критическом истечении пароводяной смеси // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. М.: МЭИ. 1999. С. 272–275.

41. Chermoshentseva A.A., Shulyupin A.N. Annular-mist flows of steam-water geothermal mixture // Proceeding of the 27-th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2002.

42. Чермошенцева А.А. Особенности разработки и реализации математических моделей для геотермальных скважин // Проблемы современного естествознания. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 2002. С. 48–53.

43. Чермошенцева А.А. Теплообмен пароводяного потока в геотермальной скважине с окружающими горными породами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. М.: МЭИ. 2005. Т.1. С. 289–292.

44. Чермошенцева А.А. Двумерный тепловой поток при моделировании геотермальных скважин // Вестник КамчатГТУ. 2005. №4. С. 86–90.

45. Чермошенцева А.А. Математическая модель течения пароводяной смеси в добычной геотермальной скважине // Труды 4-ой Российской национальной конференции по теплообмену. М.: МЭИ. 2006. Т. 5. С. 309–312.

46. Чермошенцева А.А. Решение уравнения теплопроводности для учета тепловых потерь при моделировании геотермальных скважин // Проблемы научно-технического развития Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 2008. ч. 2. С. 135–143.

47. Чермошенцева А.А. Методы расчета теплообмена геотермальной скважины с массивом окружающих горных пород // Научно-технические исследования в рыбохозяйственной отрасли Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 2009. С. 114–117.

48. Чермошенцева А.А., Карноушенко М.О. Исследование разностных схем для численного решения задач теплопроводности // Наука, образование, инновации: пути развития Ч. I. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2014. С. 126–130.

49. Shulyupin A., Chermoshentseva A. Maximum Flow-Rate of Steam-Water Wells mixture // Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia. 2015. N. 25015.

50. Чермошенцева А.А., Карноушенко М.О. Уравнения математической физики в гидродинамике // Наука, образование, инновации: пути развития. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2015. С. 109–112.

51. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. Calculation of characteristics of a feeding aquifer of a steam-water well by wellhead measurements mixture // Proceedings of the 44-th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 2019. 4 p.

52. Чермошенцева А.А., Шулюпин А.Н. Опыт математического моделирования пароводяных течений в геотермальных скважинах и наземных трубопроводах // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. С. 133–138.

53. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. Simulators for steam-water flow in geothermal wells and pipelines // Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland. 2021. N. 33028. 4 p.

54. Любин А.А., Чернев И.И., Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Обоснование способов повышения эффективности использования фонда скважин при эксплуатации ГеоЭС // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отраслей 2021 г. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технологии развития». 2021. С. 76–81.

55. Чермошенцева А.А. Геотермальная энергетика как одно из приоритетных направлений в сфере использования ВИЭ // Приоритетные направления развития науки в современном мире. Уфа. 2022. С. 21–28.