

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. Генерального директора
АО «Всероссийский нефтегазовый
научно-исследовательский институт
имени академика А.П. Крылова»

М.А. Шишкова

«09» апреля 2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации АО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А.П. Крылова» на диссертационную работу Чермошенцевой Аллы Анатольевны «Развитие научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов при добыче двухфазных геотермальных флюидов»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертационная работа Чермошенцевой Аллы Анатольевны «Развитие научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов при добыче двухфазных геотермальных флюидов» состоит из введения, семи глав с подразделами, заключения, списка использованных источников из 316 наименований, четырех приложений, списка сокращений и условных обозначений. Работа изложена на 311 страницах, включает 64 иллюстрации, 18 таблиц.

1. Актуальность темы диссертационной работы

Повышенное внимание к поиску экологических и экономически выгодных решений для производства энергии определяет растущие объемы вовлечения в эту сферу геотермальных ресурсов. Геотермальная энергия считается возобновляемой, не зависит от условий окружающей среды, времени суток и сезона, имеет сопоставимую с традиционными тепловыми станциями себестоимость продукции. Наиболее широкий спектр проблем отмечается при освоении парогидротермальных месторождений, теплоноситель которых представлен смесью воды и водяного пара. Разработка, обустройство промысла и эксплуатация выявили проблемы, связанные с двухфазными течениями в добычных скважинах и системах наземной транспортировки. Недостаточная

изученность гидрогазодинамических процессов при добыче геотермальных флюидов приводит к необходимости развития соответствующих теоретических и научно-методических основ для их описания. Требуется разработка обоснованных методов и средств определения параметров пароводяного течения в добычных скважинах и наземных трубопроводах, что позволит повысить эффективность разработки месторождений парогидротерм. В этой связи докторская диссертация Чермошенцевой А.А. является актуальной работой, позволяющей решить важную проблему по стабильному и рациональному энергообеспечению Камчатского края за счет привлечения геотермальных ресурсов.

Тема диссертационной работы соответствует п. 21.6 Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145 (переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников энергии, способов ее передачи и хранения) и Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы), утвержденной распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р, где в п. 2.5.1.7 перечня приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований отмечены альтернативные источники энергии, технологии, производство и преобразование энергии на основе возобновляемых источников.

2. Общая характеристика содержания диссертации

Во введении отмечена актуальность работы, ее цель и идея, определены задачи исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследований, указана достоверность научных положений, научная новизна работы, ее научная и практическая значимость, конкретизируется личный вклад автора.

В первой главе отмечены основные направления развития практического освоения геотермальных месторождений, выявлены проблемы, связанные с добычей и транспортировкой двухфазных геотермальных флюидов. Обоснованы поставленные задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическим основам описания двухфазных течений, определены основные понятия и параметры, характеризующие пароводяную смесь. Проведен анализ существующих методов и подходов к описанию газожидкостных течений, отмечены достоинства и недостатки каждого из них.

В третьей главе рассмотрены особенности истечения пароводяной смеси на геотермальных месторождениях. Представлены многолетние исследования

по критическим двухфазным потокам, включая анализ экспериментальных данных. Разработаны математические модели в вертикальных и горизонтальных каналах для доминирующего на геотермальных промыслах дисперсно-кольцевого режима течения.

В четвертой главе проведен обзор различных подходов к описанию пароводяных потоков в скважинах, отмечены сложности моделирования, представлен разработанный комплекс математических моделей течения в геотермальной скважине WELL-4, позволяющий охватить все разнообразие задач по добыче геотермального флюида на месторождениях парогидротерм. Созданы компьютерные программы для расчета, по которым получено хорошее согласование с экспериментальными данными Паужетского месторождения, выполнены расчеты по обоснованию проектов реконструкции скважин Мутновского месторождения, что позволило сэкономить значительные денежные средства.

Пятая глава посвящена вопросам устойчивости пароводяного течения в геотермальной скважине, выявлены условия возникновения неустойчивости и ее развития. По результатам численного моделирования с использованием WELL-4 была объяснена зависимость результатов опробования скважин от условий течения вниз по потоку от устья, показана возможность существования метастабильного течения, объяснен стабилизирующий эффект дросселирования потока вблизи устья, позволяющий расширить диапазон наблюдаемых параметров устойчивой работы при опытном определении графика производительности скважины.

В шестой главе рассмотрены особенности транспортировки извлеченного флюида до места использования, влияющие на устойчивость режима работы скважины. Разработаны математические модели для гидравлического расчета трубопровода, созданы компьютерные программы, использовавшиеся на Мутновском месторождении.

С помощью разработанных научных основ описания гидро-газо- и термодинамических процессов в **седьмой главе** решаются конкретные практические задачи, связанные с двухфазными течениями, на отечественных месторождениях парогидротерм.

В заключении сформулированы основные результаты по работе.

3. Основные научные результаты диссертации

В диссертационной работе на защиту выносятся пять научных положений.

Первое научное положение. 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.

Второе научное положение. 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.

Третье научное положение. 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.

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

Пятое научное положение 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.

Все научные положения обоснованы. 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 программ, удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, представленных в

достаточном объеме, успешной реализацией выработанных рекомендаций при освоении отечественных месторождений парогидротерм.

4. Научная новизна работы

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:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

5. Научная и практическая значимость

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.

6. Публикации и апробация результатов

Основные научные результаты, положения и рекомендации диссертационной работы докладывались на многочисленных научных всероссийских, национальных и международных мероприятиях с 1998 г. по 2024 г. и достаточно полно отражены в публикациях: всего опубликовано 70 печатных работ, в том числе 37 в научных изданиях, рекомендованных ВАК 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.

Доклад по диссертационной работе Чермошенцевой А.А. был представлен на расширенном заседании Управления разработки месторождений «ВНИИнефть».

7. 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 программы 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.

8. О стиле и языке диссертации и автореферата. Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Тема диссертационной работы и ее содержание соответствуют паспорту научной специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». Структура и содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация и автореферат написаны грамотным языком, оформлены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Выводы и рекомендации изложены четко, автор использует общепринятую научную терминологию, что делает работу доступной для широкого круга специалистов.

9. Вопросы и замечания по диссертации и автореферату

1. В главе 2 представлен анализ существующих методов и подходов к описанию газожидкостных течений. Обосновывается предпочтительность использования интегрального метода при разработке математической модели двухфазного течения. Предпринимались ли автором попытки использовать дифференциальный метод?

2. В диссертационной работе используются результаты исследований, проводимых в 1985-1992 годах на экспериментальном стенде

«Камчатскэнерго», созданного для разработки методик гидравлического расчета двухфазных потоков и испытания нового геотермального оборудования в условиях, близких к реальным. Почему были прекращены испытания, есть ли сейчас возможность возобновить эксперименты?

3. В диссертационной работе описаны этапы совершенствования математической модели WELL-4 (предшествующие версии WELL, WELL-2, WELL-3), а в автореферате такая информация отсутствует. Полагаем, что этому следовало отметить.

4. Первое защищаемое положение отмечает значительно меньшее расхождение расчетных значений по разработанной автором WELL-4 с опытными данными по сравнению с зарубежным аналогом. За счет чего получено такое преимущество?

5. Для рисунков 5.8 и 5.9 следовало указать используемый вид зависимости перепада давления между устьем и атмосферой не только в тексте диссертационной работы, но и в подрисуночной подписи.

6. В главе 6 описывается разработанная автором компьютерная программа MODEL. Есть ли существующие аналоги этой программы? Если есть, то проводились ли исследования их эффективности?

7. В Приложении Б представлены акты, подтверждающие использование разработанных автором методик и компьютерных программ в практике освоения геотермальных месторождений на Камчатке. Полагаем, что это следовало отметить в тексте диссертации и автореферата.

10. Общее заключение по диссертации

Диссертационная работа Чермошенцевой А.А. на тему «Развитие научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов при добыче двухфазных геотермальных флюидов» обладает научной новизной и практической значимостью, является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, выполненной на высоком научном уровне. Выдвинутые на защиту положения обоснованы и доказаны, поставленные задачи решены в полном объеме. Представлены новые научно-технические и технологические решения, внедрение которых является значительным вкладом в развитие геотермальной энергетики в Камчатском крае.

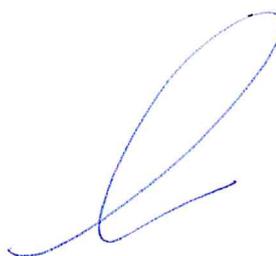
Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки, работа обладает внутренней логикой, изложена в научно-техническом стиле, оформление соответствует установленным требованиям. Автореферат соответствует содержанию диссертации и в полной мере передает ее суть.

Таким образом, диссертационная работа на тему: «Развитие научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов при добыче

двухфазных геотермальных флюидов», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук соответствует требованиям, предъявляемым в пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, а ее автор Чермошенцева Алла Анатольевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв ведущей организации рассмотрен и одобрен на расширенном заседании Управления разработки месторождений АО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А.П. Крылова», протокол №12 от 03.04.2025 г.

Технический советник
АО «Всероссийский нефтегазовый
научно-исследовательский институт
имени академика А.П. Крылова», д.т.н.



Петраков А.М.

Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А. П. Крылова»
Адрес: 127422, Российская федерация, г. Москва, Дмитровский проезд, 10
Тел.: +7 (495) 748-39-50; +7 (495) 748-39-49
e-mail: vnii.office@nestro.ru
веб-сайт: www.vniineft.ru

09.04.2025

Подпись Петракова А.М. заверяю

Адрес АО «ВНИИнефть»:
127422, г. Москва, Дмитровский проезд, 10
Телефон: + 7 (495) 748 -39- 49
Факс: + 7 (495) 611-05-08
Email: vnii.office@nestro.ru

