

**Отзыв**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**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»**

**1. Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Чермошенцевой А.А. направлена на решение важной проблемы стабильного и рационального энергообеспечения Камчатского края за счет эффективного и рационального использования геотермальных ресурсов. Глобальное истощение традиционных видов топлива, рост энергопотребления, экологические проблемы и другие факторы обуславливают возрастающий интерес к использованию альтернативных возобновляемых источников энергии. Перспективы решения мировой энергетической проблемы за счет привлечения геотермальных ресурсов предполагают создание мощных объектов, таких как геотермальные электростанции, что напрямую связано с разработкой месторождений высокотемпературных теплоэнергетических вод и необходимостью вывода на поверхность глубинных флюидов в двухфазном состоянии.

Актуальность темы диссертации определяет недостаточная изученность гидрогазодинамических процессов при добыче геотермальных флюидов. Разработка отвечающих современным запросам научных основ описания указанных процессов в добычных скважинах и системах наземной транспортировки и развитие методической базы их практического применения, несомненно, является важной составляющей повышения эффективности разработки месторождений парогидротерм.

Тема диссертации соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021–2030 годы (2.5.1.7 – альтернативные источники энергии, технологии, производство и преобразование энергии на основе возобновляемых источников), отмеченных в Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы), утвержденной распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г № 3684-р, а также направлению Стратегии научно-технологического развития

Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145 (п. 21.б переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников энергии, способов ее передачи и хранения).

## **2. Научная новизна работы**

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.

### **3. Степень обоснованности и достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации**

Представленная к защите диссертация состоит из введения, семи глав с подразделами, заключения, списка использованных источников из 316 наименований, четырех приложений, списка сокращений и условных обозначений. Работа содержит 311 страниц, 64 иллюстрации, 18 таблиц.

Во введении представлена актуальность и научная новизна работы, сформулирована цель и идея работы, определены основные задачи исследования, основные научные положения, выносимые на защиту. Описываются методы исследований и достоверность научных положений, конкретизируется личный вклад автора, обосновывается научная и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе анализируется современное состояние изученности вопросов, связанных с добычей двухфазных геотермальных флюидов, выделены основные направления развития практического освоения геотермальных месторождений. Отмечены актуальные задачи, связанные с пароводяными течениями, возникающие при разработке и эксплуатации промыслов. Обоснованы задачи исследования.

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

В третьей главе представлены математические модели описания дисперсно-кольцевого режима течения в вертикальных и горизонтальных каналах, являюще-

гося доминирующим на геотермальных промыслах. На основании многолетних исследований и анализа экспериментальных данных по критическим потокам рекомендовано проводить разработку соответствующей математической модели на основе гипотезы о неоднородности поля скоростей, распределения фаз и давлений в сечении канала при формировании критического потока.

В четвертой главе 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 математические модели течения в геотермальной скважине, создан комплекс программ WELL-4, охватывающий весь спектр задач, возникающих при добычи геотермального флюида на месторождениях парогидротерм, включая течения в наклонных скважинах и областях сопряжения скважины и питающего пласта. Получено удовлетворительное согласование с экспериментальными данными по скважинам Паужетского месторождения, проведены успешные обоснования проектов реконструкции по скважинам Мутновского месторождения, позволившие сэкономить значительные денежные средства.

В пятой главе рассмотрены вопросы устойчивости пароводяного течения в геотермальной скважине, выявлены факторы, определяющие возникновение и развитие неустойчивости. На базе новых представлений по результатам проведения численного моделирования с использованием WELL-4 даны рекомендации по практическому обеспечению устойчивой добычи пароводяной смеси, что позволяет повысить эффективность добычи пароводяного геотермального флюида.

В шестой главе рассмотрены вопросы, связанные с условиями транспортировки извлеченного флюида до места использования, оказывающие влияние на устойчивость режима работы скважины. Представлены разработанные математические модели для гидравлического расчета трубопровода, широко применявшиеся на Мутновском месторождении.

В седьмой главе с помощью разработанных научных основ рассмотрено решение целого ряда практических задач, связанных с гидро-газо- и термодинамическими процессами, возникавших при освоении и эксплуатации отечественных месторождений парогидротерм.

В заключении сформулированы основные выводы по работе.

Достоверность и обоснованность положений, выводов и рекомендаций работы определяется применением фундаментальных физических законов в качестве исходных предпосылок для теоретического анализа, компетентным использованием имеющихся на настоящий момент знаний по предмету исследования, привлечением натуральных экспериментов для верификации разработанных расчетных моделей, корректным логическим обоснованием получаемых результатов. Также достоверность и обоснованность положений, выводов и рекомендаций работы подтверждается успешным их применением в практике разработки высокотемпературных геотермальных месторождений Камчатского края.

#### **4. Практическая значимость работы**

Практическая значимость полученных результатов заключается в создании соответствующих современным вызовам научных основ для расчета гидрогазодинамических процессов в добычных скважинах и системах наземной транспортировки при освоении месторождений парогидротерм. На новой основе разработаны математические модели пароводяного течения в добычных скважинах и создан комплекс компьютерных программ WELL-4 для расчета течений в добычных скважинах, охватывающий весь спектр возможных задач, отвечающих современному уровню технологий разработки месторождений парогидротерм. Данный комплекс был успешно использован при обосновании реконструкции скважин крупнейшего отечественного геотермального месторождения – Мутновского на Камчатке. Также на новой основе разработаны математические модели пароводяного течения в наземных трубопроводах и созданы компьютерные программы по их реализации, которые нашли широкое применение при разработке отечественных месторождений парогидротерм.

#### **5. Публикации и апробация работы**

Основные научные результаты достаточно полно отражены в опубликованных статьях. Всего 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. Основные положения

диссертационной работы докладывались на многочисленных научных мероприятиях, включая международные, в период 1998–2024 гг.

#### **6. По диссертации имеются следующие замечания:**

1. Поскольку представленная в главе 4 математическая модель WELL-4 позволяет проводить расчет для чисто водяных участков, несмотря на то, что методы расчета для них хорошо изучены и принципиальных проблем не представляют, следовало привести используемые расчетные формулы.

2. Также не указано какой численный метод использовался и в какой среде написаны компьютерные программы.

3. Отмеченная в главе 5 (стр. 162) квадратичная зависимость перепада давления между устьем и атмосферой от расхода соответствует не только развитому турбулентному течению, но и ламинарному при дросселировании потока.

4. Рисунки 5.1 и 7.4 можно было объединить.

5. В Приложении представлены акты внедрения разработок автора. Можно было отметить это в тексте диссертационной работы.

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы Чермошенцевой А.А. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне и заслуживает высокой оценки.

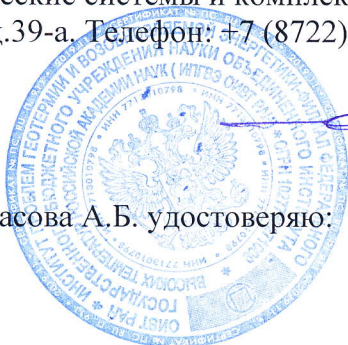
#### **7. Общее заключение по диссертации**

Диссертационная работа Чермошенцевой А.А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно автором на высоком научном уровне. Поставленные в диссертации задачи решены в полном объеме, защищаемые положения, выводы и рекомендации имеют высокую степень достоверности и обоснованности. Изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие геотермальной энергетики России. Работа обладает внутренней логикой, ее содержание изложено четко и ясно в научно-техническом стиле, оформление соответствует установленным требованиям. Автореферат соответствует содержанию диссертации и в полной мере передает ее суть, обоснованность выводов и рекомендаций.

Таким образом, диссертация Чермошенцевой Аллы Анатольевны на тему: «Развитие научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов при добыче двухфазных геотермальных флюидов» соответствует требованиям, п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024, от 01.10.2018 № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, 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».

#### Официальный оппонент

доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ИПГВЭ ОИВТ РАН). Шифр специальности, по которой защищена диссертация 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы». Почтовый адрес: 367030, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, д.39-а. Телефон: +7 (8722) 62-93-57. Электронный адрес: [ran\\_ipg@mail.ru](mailto:ran_ipg@mail.ru).



*Алибек*

Алхасов Алибек Басирович

Подпись Алхасова А.Б. удостоверяю:

*Вед. спец. ОК*



Дата составления отзыва «10»марта.2025 г.