

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Чермошенцевой Аллы Анатольевны «Развитие научных основ определения параметров гидрогазодинамических процессов при добыче двухфазных геотермальных флюидов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.6 — «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

**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.

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

### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Сравнение результатов расчета по разработанной математической модели течения в добычной скважине на месторождении парогидротерм WELLS-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 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.
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.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Анализ состояния научной базы для расчета гидрогазодинамических 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 гидрогазодинамических процессов для решения конкретных задач, связанных с двухфазными течениями 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.

**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), 4 приложения, 64 иллюстраций, 18 таблиц, общий объем 311 страниц.

#### **Замечания по автореферату:**

1. Стр. 15 второй абзац снизу. Предложение «Для замыкания математической модели течения используются...». Нужно «Для замыкания математической модели течения в скважине (2)-(4) используются...».
2. На формулы (5), (6), (7), (8) нет ссылок в тексте автореферата.
3. Стр. 16 третий абзац снизу. Предложение «Математическая модель WELL-4 была реализована в виде одноименной компьютерной программы». Здесь не хватает информации о среде разработки программы. Является ли среда разработки коммерческой или свободной.
4. Здесь же. Следующее предложение «Для решения дифференциальных уравнений (2)–(4), содержащих параметры, определяемые сложной взаимосвязью, потребовалось численное интегрирование.» Далее не хватает информации о методе численного интегрирования. Если система (2)-(4) решалась численно, то возникают вопросы связанные с анализом погрешности (точности) метода и его влияние на окончательные результаты.
5. Стр. 16 последний абзац. Предложение «Скважина, ранее периодически самозадавливающаяся...». Нужно пояснить какой смысл вкладывается в понятие «периодически самозадавливающаяся».
6. На стр. 17-18 речь идет о модификациях компьютерной программы WELL-4. Здесь возникает вопрос, являются ли эти модификации самостоятельными программами или входят в комплекс программ WELL-4?
7. На стр. 23 в подрисуночной подписи к рис. 6 указан диапазон изменения коэффициента потерь давления. Здесь отсутствует размерность коэффициента.
8. На стр. 26 речь идет о компьютерной программе MODEL. Однако нет информации о среде разработки, является она коммерческой или свободной. Другой вопрос связан с

существующими аналогами этой программы. Если аналоги есть, то проводились ли исследования их эффективности?

9. Далее на стр. 28,29,20. Речь идет о другой компьютерной программе SWIP-S и ее модификации SWIP-L. Здесь также отсутствует информация о среде разработки, аналогах и т.д.

10. В начале автореферата диссертантка оперировала понятием «математическая модель». Однако далее в автореферате диссертантка перешла на понятие «модель». Правильно ли я понимаю, что речь идет здесь о математической модели, а не о физической, компьютерной или какой-нибудь еще?

В целом Чермошнецовой А.А. была проделана большая работа по исследованию пароводяных течений в добычных скважинах и наземной транспортировки на месторождениях парогидротерм. Были разработаны математические модели этих процессов, которые были реализованы в соответствующих компьютерных программах. Компьютерные программы прошли апробацию на геотермальной системе Камчатки и показали хорошие результаты: выявлена гравитационная неустойчивость пароводяного течения в скважинах, установлено снижение давления термоводоносном комплексе Паужетского месторождения, выяснены возможности расчетного определения фильтрационных характеристик питающего пласта и т.д. Все выше сказанное вносит не только большой научный вклад в развитие геотермальной системы Камчатки, но имеет большой экономический эффект, который, например, может возникнуть при ее модернизации.

Исходя из автореферата диссертационного исследования Чермошнецовой Аллы Анатольевны можно сделать заключение о том, что уровень решаемых задач соответствует специальности 2.8.6 — «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика», а диссертантка заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук.

02.04.2025

Профессор кафедры информатики и математики,  
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет  
имени Витуса Беринга», 683032, г. Петропавловск-Камчатский,  
ул. Пограничная, д. 7, <https://kamgu.ru/>,  
доктор физико-математических наук,  
специальность 1.2.2. — «Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ», доцент, профессор ДВО РАН,  
e-mail: romanparovik@gmail.com

Паровик Роман Иванович



Подпись *Паровик Роман Иванович* даверяю.  
Ведущий специалист отдела по работе  
персоналом и обучающимися  
*Томасова Е.П. Томасова*  
подпись  
"02" апреля 2025г.