

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Мамаева Дмитрия Викторовича на тему

«Теплоперенос в породах Кошелевской геотермальной системы в естественном состоянии и при перспективном получении геотермальной энергии», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

### Актуальность темы диссертации.

Одной из основных проблем топливно-энергетического комплекса Камчатского края является зависимость от привозного углеводородного топлива. Это в свою очередь определяет формирование высоких тарифов на электрическую и тепловую энергию. В условиях возрастающего интереса к возобновляемым экологически чистым источникам энергии, в частности к геотермальным ресурсам, освоение Кошелевской геотермальной системы может способствовать совершенствованию топливно-энергетического баланса Камчатского края. Однако отсутствие прогнозных оценок пространственного распределения и изменения во времени термогидродинамических параметров теплоносителя при потенциальном освоении тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы препятствует реализации планов по их использованию.

В настоящее время суммарная прогнозная мощность геотермальных систем на территории полуострова Камчатка составляет 4 – 5 ГВт. Установленная мощность всех типов электростанций Камчатского края составляет около 649 МВт. Доля геотермальных электростанций в структуре установленной мощности – 11,4%. Повышение степени использования возобновляемых источников энергии является актуальной задачей и способно стимулировать экономическое развитие Камчатского края.

**Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

заключается в разработке трехмерной термогидродинамической модели Кошелевской геотермальной системы. Данная модель учитывает фазовые переходы геотермального теплоносителя и теплофизические свойства компонентов системы в полном диапазоне возможных состояний температур и давлений до 1200°C и 1 ГПа соответственно, её сложное геологическое строение, а также фактический рельеф дневной поверхности.

В установлении, на базе разработанной и откалиброванной по данным скважинной термометрии модели, закономерностей распределения температуры и фазового состояния теплоносителя в массиве горных пород исследуемой геотермальной системы.

В оценке технико-экономических показателей пилотного проекта разработки тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы по циркуляционной технологии.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается использованием фундаментальных физических законов сохранения массы и энергии в основе численной модели теплопереноса; подробным анализом предшествующих работ, содержащих данные об объекте исследования; большим количеством выполненных вариантов вычислительных экспериментов в широком диапазоне входных параметров; количественным соответствием полученных в работе результатов с натурными данными, полученными другими авторами при термометрии поисковых скважин.

**Практическая ценность результатов.**

Заключается в том, что результаты термогидродинамического моделирования могут быть использованы для прогноза параметров геотермального теплоносителя при разработке тепловых ресурсов объекта. Установленные технологические параметры геотермальной циркуляционной системы могут быть рекомендованы для проектирования пилотной системы освоения геотермальных ресурсов Кошелевской геотермальной системы.

Разработанная термогидродинамическая модель может быть использована при дальнейшем исследовании Кошелевской геотермальной системы. Полученные данные о распределении термогидродинамических параметров в породах системы могут быть использованы при уточнении прогнозных геотермальных ресурсов.

### Список замечаний.

#### Глава 2

Раздел 2.4.14. При рассмотрении графиков (рис. 2.4) возникает вопрос, почему при снижении температуры стенки магматического очага растет его радиус. В том виде, какой приведен в диссертации уравнение (2.7) будет содержать только положительные члены

$$L_c \rho_c \frac{dr}{dt} = |Q_m(t)| + |Q_c(t)|$$

Полагаю, что вид должен быть  $L_c \rho_c \frac{dr}{dt} = |Q_m(t)| - |Q_c(t)|$

#### Глава 3

Правильнее было бы сказать, что варьируются параметры модели комплексной геотермальной системы. Модель одна, параметры модели варьируются.

Вызывает вопрос зависимость числа Нуссельта от плотности и теплоемкости вмещающих пород, ведь число Нуссельта определяется параметрами жидкого (газообразного) теплоносителя.

Непонятно происхождение вывода о том что «...при увеличении температуры поверхности магматического очага ... уменьшаются числа Нуссельта». Число Нуссельта для пористого материала через параметр с размерностью длины может зависеть от структурных параметров среды. С температурой, если не происходит преобразования скелета, связана лишь вяз-

кость флюида или его теплопроводность. (Для пористых тел существует функциональная зависимость критерия Нуссельта от критерия Рэлея вида –  $Nu=Ra^n$ ).

Возникает следующий вопрос, как этот вывод соотносится с результатами расчета, представленными на рисунке 2.4?

### Основное содержание работы.

В главе 1 выполнен обзор и анализ предшествующих исследований Кошелевской геотермальной системы. Собран и проанализирован комплекс имеющихся геологических, геофизических, гидрогеологических и гидрологических данных о системе. Рассмотрены существующие в настоящее время прогнозные оценки геотермальных ресурсов Кошелевской системы. Сформулированы цель и задачи исследований.

В главе 2 кратко описана суть вычислительного эксперимента. Приведены основные характеристики программного комплекса HYDROTHERM, используемого в работе при постановке вычислительных экспериментов. Описана математическая модель процессов теплопереноса. На основе данных о геологическом строении создана трехмерная термогидродинамическая модель Кошелевской геотермальной системы.

В главе 3 по результатам многочисленных предварительных вычислительных экспериментов достигнуто качественное соответствие расчетных параметров теплоносителя и имеющихся фактических данных. Выполнен анализ чувствительности модели к варьированию свойств горных пород: теплопроводности, теплоемкости, плотности, пористости и проницаемости, а также параметров магматического очага: размеров и температуры его поверхности. Количественное соответствие модели объекту обеспечено калибровкой по имеющимся фактическим данным, для чего решалась задача многомерной безусловной оптимизации.

В главе 4 произведена оценка технологических параметров геотермальной циркуляционной системы при освоении тепловых ресурсов. Приве-

дены технико-экономические и финансово-экономические показатели эффективности проекта по строительству пилотной геотермальной электростанции на основе тепловых ресурсов Кошелевской геотермальной системы.

#### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 наименований, содержит 159 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 47 таблиц.

#### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности.**

В представленной работе рассматриваются процессы тепломассопереноса в горных породах (геотермальных системах), связанные с фазовыми превращениями вода–пар в широком диапазоне свойств горных пород вблизи магматического очага, а также температур и давлений фильтрующегося теплоносителя. Рассмотрение этих процессов полностью соответствует паспорту специальности 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

#### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.**

Автореферат в полной мере отражает существо диссертационной работы, по объему и содержанию соответствует требованиям ВАК РФ.

#### **Заключение о соответствии работы требованиям ВАК.**

Диссертация соискателя Мамаева Дмитрия Викторовича является научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной задачи количественной оценки термогидродинамических параметров геотермального теплоносителя в горных породах Кошелевской геотермальной системы в естественном состоянии и при перспективном освоении тепловых ресурсов, а также в установлении параметров освоения ее тепловых ресурсов по технологии геотермальных циркуляционных систем, имеющей существенное теоретическое и практическое значение.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, а ее автор – Мамаев Дмитрий Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата



технических наук по специальности 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Официальный оппонент – Попов Владимир Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории горной теплофизики.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук (ИГДС СО РАН).

Адрес: 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.

Тел.: 8 (411) 233-59-30 (раб.), 8-924-360-57-61 (моб.)

E-mail: popov.gtf@mail.ru

Попов Владимир Иванович

Я, Попов Владимир Иванович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

21.09.2021

Попов В.И.

Подпись официального оппонента, к.т.н. Попова Владимира Ивановича удостоверяю

Зам. директора  
ФБГУН Институт горного дела Севера  
им. Н.В. Черского к.т.н.



В.П. Зубков

«21» сентября 2021 г.