

На правах рукописи



ФАДЕЕВА ИРИНА ИГОРЕВНА

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ
ГАЗОГИДРАТОВ В ПЕСЧАНЫХ СРЕДАХ
ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Дучков Антон Альбертович

Официальные оппоненты:

Попов Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Центра добычи углеводородов Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»;

Адамова Татьяна Петровна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории клатратных исследований ФГБУН Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

Защита состоится 16 апреля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3; факс 8-(383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/fadeeva2024>

Автореферат разослан 12 марта 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м. н., доцент



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – гидратосодержащие песчаные среды в различных термобарических условиях.

Актуальность исследования

Известно, что газовые гидраты широко распространены в природе, их скопления встречаются в донных отложениях морей и океанов и в многолетнемерзлых породах на суше. Скопления природных гидратов обнаружены в осадках пресноводного озера Байкал. Результаты лабораторных исследований и анализ доступных геофизических данных показывает, что гидраты метана и углекислого газа также могут существовать в угольных пластах [Смирнов, Манаков, Дырдин, 2014, 2017].

Природные газовые гидраты рассматриваются как перспективный источник углеводородного сырья, хотя в настоящее время добыча газа из гидратных скоплений экономически невыгодна. Образование техногенных гидратов является усложняющим фактором при добыче нефти и газа. Газовые гидраты весьма чувствительны к изменениям температуры и давления. Понижение уровня водоемов, потепление климата, вулканическая активность, деятельность человека или другие вмешательства могут привести к дестабилизации скоплений природных гидратов и, в свою очередь, к дестабилизации морского дна и повреждению опирающихся на дно буровых платформ, трубопроводов и кабелей. Выбросы в атмосферу больших объемов углеводородных газов при разложении гидратов могут стать причиной значительных климатических изменений [Shakhova, Semiletov, Sergienko et al., 2015].

Изучение скоплений природных гидратов (гидратосодержащих пород) проводится с использованием геофизических методов (сейсмических, геотермических, электромагнитных), каждый из которых имеют свою область применения и свои ограничения. Как правило, эти методы позволяют установить наличие газовых гидратов в породе, но не дают информации об их количественном содержании (или дают с большой погрешностью) [Riedel, Willoughby, Chopra, 2010].

Основную роль в изучении гидратосодержащих пород играют лабораторные исследования, как правило, требующие использования специально разработанных экспериментальных установок. Наличие гидратов природного газа в мерзлоте или донных отложениях устанавливается главным образом при исследованиях кернов в

лабораторных условиях. Если керн породы извлекается в герметичном пробоотборнике, то гидратосодержание устанавливается по массе или объему газа-гидратообразователя в нем, если в негерметичном, то по количеству поглощенного при разложении газогидрата тепла (метод теплового инфракрасного сканирования керна извлеченной породы [Riedel, Willoughby, Chopra, 2010]).

Учитывая многообразие насыщенных гидратами пород в некоторых случаях необходимы специализированные способы оценки их гидратосодержания с прогнозируемой погрешностью. Таким образом, **актуальность** работы заключается в необходимости разработки и верификации в лабораторных условиях новых способов оценки гидратосодержания осадочных пород на примере простых песчаных сред с дальнейшим обоснованием области их применения.

Цель исследования – развитие геотермического метода оценки количественного содержания газогидратов в осадочных горных породах на примере песчаных сред.

Научные задачи:

1. *Создать* экспериментальную лабораторную установку для формирования гидратосодержащих песчаных образцов при различных термобарических условиях с измерительными устройствами для определения их теплофизических характеристик и исследования процессов разложения в них газогидратов.

2. *Разработать* способы оценки количественного содержания газогидратов в песчаных образцах с разной газопроницаемостью и влажностью в стабильных и нестабильных для существования газогидрата условиях.

Методы исследования и фактический материал

Теоретической основой решения поставленных задач являются математические модели количественной оценки содержания газогидратов:

- для песчаных сред с высокой газопроницаемостью (малым содержанием воды/гидрата) используется аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с линейным источником тепла на оси симметрии с постоянным нагревом среды без разложения и с разложением газогидрата в ней [Гольмиток и др., 2005; Карслоу, Егер, 1964];

- для песчаных сред с низкой газопроницаемостью (высоким содержанием воды/гидрата) используется аддитивное свойство объемной теплоемкости среды [Кобранова, 1986] в разных термобарических условиях: в условиях стабильного существования газогидрата и вне этих условий (среда без газогидрата в порах).

Фактическим материалом являются результаты лабораторных экспериментов, выполненных соискателем в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) и в Институте неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН (ИНХ СО РАН).

Физическое моделирование гидратосодержащих сред проводилось с использованием разработанных сотрудниками институтов ИНГГ и ИНХ СО РАН методик [Манаков, Дучков, 2017; Пермяков, 2010; Дучков и др., 2006] и усовершенствованной экспериментальной лабораторной установкой с увеличенным объемом измеряемых образцов.

Все теплофизические характеристики гидратосодержащих образцов определялись с помощью модифицированных одно/двухигольчатого зондов:

- с повышенной теплопроводностью измерительных иглол зондов до 15 Вт/(м·К) и

- с повышенной чувствительность датчиков к небольшим изменениям температуры за счет использования терморезисторов с температурным коэффициентом – 4 %/°С;

- с уменьшенным влиянием иглол двухигольчатого зонда на измерения за счет увеличенного расстояния между его измерительными иглолками, которое более чем в 10 раз превышает их радиус.

Защищаемые научные результаты:

1. Экспериментальная лабораторная установка с термостатируемой камерой высокого давления, с одно-/двухигольчатым измерительным зондом и регистрирующей системой, используемая для изготовления гидратосодержащих песчаных сред с разной газопроницаемостью, влажностью и определения их теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости с погрешностью не более 10 % на основе теории линейного источника тепла.

2. Способ количественной оценки гидратосодержания песчаных

сред с высокой газопроницаемостью заключается в измерении с помощью игольчатого зонда двух типов экспериментальных термограмм: без разложения газогидрата при малой мощности нагревателя и с его разложением - с высокой мощностью нагревателя. Гидратосодержание оценивается в результате решения обратной оптимизационной задачи, при этом полученные термограммы аппроксимируются аналитической моделью нагрева среды без разложения и с разложением газогидрата.

3. Способ количественной оценки гидратосодержания песчаных сред с низкой газопроницаемостью заключается в использовании двухигольчатого зонда для более точного определения объемной теплоемкости среды в термобарических условиях стабильного существования газогидрата и вне этих условий. В последнем случае в порах среды присутствуют газ и вода. Гидратосодержание оценивается путем сопоставления полученных значений объемных теплоемкостей среды в разных термобарических условиях.

Научная новизна

1. Разработаны новые способы количественной оценки содержания газогидратов в песчаных средах по данным проведенных в них теплофизических экспериментов.

2. Разработана экспериментальная лабораторная установка, с помощью которой можно изготавливать гидратосодержащие образцы с разной влажностью и газопроницаемостью, а также определять их теплофизические характеристики с погрешностью не более 10 % в расширенном диапазоне теплопроводности от 0.02 до 5 Вт/(м·К).

- Для расширения диапазона определяемых теплофизических параметров образцов и повышения точности их определения были изготовлены модифицированные игольчатые зонды с высокой собственной теплопроводностью иглолок и чувствительностью температурных датчиков к незначительным изменениям температуры, с увеличенным расстоянием между иголками двухигольчатого зонда (см. фактический материал).

- Создана большая термостатируемая камера высокого давления (объем образцов около 1000 см³) с модифицированным двухигольчатым зондом (см. фактический материал) для изготовления и определения теплофизических характеристик гидратосодержащих образцов с большим содержанием воды/гидрата (до 100%), относительно

высокой теплопроводностью (менее 5 Вт/(м·К)) и низкой газопроницаемостью (менее 10 мД).

- Малая термостатируемая камера высокого давления с объемом формируемых образцов около 200 см³ использовалась с модифицированным одноигльчатый зондом (см. фактический материал) для изготовления и определения теплофизических характеристик образцов с низкой теплопроводностью (до 1 Вт/(м·К)), высокой газопроницаемостью (более 100 мД) и низким содержанием воды/гидрата (менее 10%).

3. Для количественной оценки гидратосодержания песчаных сред с высокой газопроницаемостью:

- получено уравнение непрерывности теплового потока вблизи стенки игльчатого зонда (линейного нагревателя среды) с учетом разложения газогидрата и без учета выделяющегося при разложении газогидрата газа, из которого выведена формула для расчета массы газогидрата в единице объема среды [Фадеева и др., 2016];

- сформулирована обратная оптимизационная задача определения модельных параметров и оценки гидратосодержания песчаных сред на основе минимизации функционалов невязки между экспериментальными и модельными наборами данных [Фадеева и др., 2016].

4. Для количественной оценки гидратосодержания песчаных сред с низкой газопроницаемостью:

- получены формулы для расчета объемной доли газогидрата в порах среды, основанные на аддитивном свойстве теплоемкости для двух случаев: а) со стопроцентным насыщением порового пространства водой и гидратом; б) при наличии в поровом пространстве среды воды, гидрата и газа [Фадеева и др., 2020].

- гидратосодержание оценивается с использованием указанных формул и с определением объемной теплоемкости среды с гидратом в порах (в условиях стабильного существования газогидрата) и объемной теплоемкости этой же среды без гидрата (вне условий стабильного существования газогидрата).

Личный вклад

Автором лично разработаны способы оценки гидратосодержания песчаных сред как с высокой, так и низкой

газопроницаемостью и проведена верификация предложенных способов оценки гидратосодержания в серии экспериментов с образцами модельных гидратосодержащих песчаных сред:

1. Соискателем проанализированы существующие способы измерений теплофизических характеристик образцов.

2. Модифицированы измерительные зонды с регистрирующей системой и развиты методики определения теплофизических параметров образцов:

- с помощью одноигольчатого зонда с высокой собственной теплопроводностью на основе теории линейного нагревателя постоянной мощности можно определять не только теплопроводность, но и температуропроводность образцов с низкой теплопроводностью (до $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) в разных термобарических условиях;

- с помощью модернизированного двухигольчатого зонда на основе теории линейного нагревателя постоянной мощности можно определять теплофизические параметры образцов в более широком диапазоне теплопроводности (до $5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) и с лучшей относительно импульсной методики точностью в разных термобарических условиях.

3. Проведены калибровочные эксперименты по определению параметров стандартных образцов с известными теплофизическими характеристиками для тестирования модифицированных зондов и измерительного оборудования.

4. Разработана экспериментальная лабораторная установка для формирования и определения теплофизических характеристик образцов как с малым, так и большим содержанием воды/гидрата, высокой/низкой газопроницаемостью.

5. Получено уравнение непрерывности теплового потока вблизи стенки игольчатого зонда с учетом разложения газогидрата в среде с высокой газопроницаемостью и формула расчета гидратосодержания.

6. Получена формула для расчета гидратосодержания среды с низкой газопроницаемостью по изменению её объемной теплоемкости в состояниях с газогидратом и без него (вне условий его стабильного существования).

7. Проведена верификация предложенных способов оценки гидратосодержания в серии экспериментов с образцами

модельных гидратосодержащих песчаных сред, обработаны и проанализированы полученные экспериментальные данные.

Высокая достоверность полученных результатов подтверждается проверкой модифицированных игольчатых зондов и измерительной аппаратуры в калибровочных экспериментах и согласованием оценок гидратосодержания, полученных с помощью предложенных способов и из условий формирования гидратосодержащих сред (согласно измеренному количеству газа-гидратообразователя, перешедшего в гидратную фазу).

Верификация способов количественной оценки гидратосодержания выполнена с помощью теплофизических экспериментов для сформированных в лабораторных условиях гидратосодержащих песчаных образцов с разной газопроницаемостью. Гидратосодержание образцов рассчитанное с использованием экспериментальных и модельных температурных данных сопоставлялось с оценкой гидратосодержания, полученной из измеренного в ходе эксперимента количества газа-гидратообразователя, перешедшего в гидратную фазу.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанные способы оценки гидратосодержания песчаных сред обеспечивают новый подход количественной оценки содержания газогидратов в осадочных породах с разной влажностью и газопроницаемостью. Эти способы чувствительны к наличию малых количеств газогидрата в породе за счет сопоставления измерений, проведенных в условиях стабильного существования газогидрата в породе и в условиях, когда гидрат в породе полностью разложился. Они применимы в условиях низких температур и высоких давлений и могут быть адаптированы для полевых работ погружными геотермическими зондами (термографами), измеряющими теплопроводность и объемную теплоемкость донных отложений водоемов.

Полученные результаты могут стать основой для создания погружных зондов, измеряющих как теплофизические, так и электрические и акустические характеристики осадочных пород, что позволит при работах на акваториях определять содержание гидратов в донных отложениях без их поднятия на судно.

Конструкция созданных измерительных зондов с регистрирующей системой может быть использована для определения теплофизических характеристик пород как в лабораторных, так и

опробована в природных условиях, что является вкладом в развитие измерительных устройств теплофизики и геотермии.

Апробация результатов и публикации

Соискателем в соавторстве с С.А. Казанцевым и А.А. Кальяком получен патент на полезную модель № 213321 (Устройство для измерения теплофизических свойств слабосцементированных пород).

Основные результаты диссертационной работы успешно докладывались на семинарах, международных и российских конференциях, симпозиумах: 10th International Conference on Gas Hydrates (Singapore, jun 21–26, 2020); Дегазация Земли: геология и экология – 2018: Международная конференция (Москва, 24–26 апреля 2018 г.); 9th International Conference on Gas Hydrates (ICGH9) (Denver, Colorado USA, June 25–30, 2017); Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рожд. проф. М.И. Кучина (Томск, 2017); IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти акад. А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 16–20 февраля 2015 г.); Газовые гидраты в экосистеме Земли' 2014: Программа конференции и тезисы докладов. – 2014; Петрофизическое моделирование осадочных пород: III Балтийская школа-семинар (BalticPetroModel-2014) (Петергоф, 15–19 сентября 2014 г.). Современные проблемы и будущее геокриологии: Тезисы докладов III Всероссийского научного молодежного геокриологического форума (Якутск, 24 июня –13 июля 2013 г.) и на конференциях в Новосибирске: Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2019, 2017, 2015, 2014, 2013); Молодежной конференции «Трофимукотские чтения» (Новосибирск, 2019, 2013); Международной молодежной научной школе-конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 2013, 2011); Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2012).

Материалы диссертации изложены в 28 публикациях, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией («Геология и геофизика», «Сибирский журнал индустриальной математики», «Геофизические исследования»), один патент на полезную модель, две публикации в рецензируемых журналах (РИНЦ) и 22 публикации в трудах и материалах научных конференций.

Объём и структура работы

Общий объём диссертационной работы 130 страниц. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух Приложений. Работа включает 34 рисунка, 8 таблиц, список литературы из 197 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Антону Альбертовичу Дучкову за постановку задачи, руководство работой и предоставление всех необходимых средств к развитию. Выражает глубокую благодарность д.г.-м.н. Альберту Дмитриевичу Дучкову, кандидатам технических наук Сергею Алексеевичу Казанцеву и Михаилу Евгеньевичу Пермякову и к.ф.-м.н. Дмитрию Евгеньевичу Аюнову за ценные советы, поддержку и помощь на разных этапах работы. Благодарит д.т.н. Игоря Николаевича Ельцова за поддержку и внимание к исследованиям автора. Благодарит специалистов в области петрофизики к.т.н. Никиту Александровича Голикова, в области электроники и электротехники Алексея Владимировича Мацко и Андрея Андреевича Белоусова за помощь в разработке и изготовлении измерительной аппаратуры. Выражает благодарность сотруднику Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН д.х.н. Андрею Юрьевичу Манакову за помощь в создании лабораторной установки и проведении экспериментов с газовыми гидратами, сотруднику Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН к.ф.-м.н. Александру Яковлевичу Гольмштоку за помощь в численном моделировании разложения газогидратов и сотруднику Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН д.ф.-м.н. Андрею Леонидовичу Карчевскому за консультации и помощь в работе. Отдельную благодарность автор выражает доценту кафедры геофизики ГГФ НГУ, д.г.-м.н. Нине Николаевне Неведровой за помощь в переосмыслении текста диссертации и его оформлении.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, определен объект, поставлены цель и научные задачи, сформулированы защищаемые научные результаты, их новизна, личный вклад соискателя, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе проанализированы известные методы обнаружения и оценки содержания газовых гидратов в природных условиях. Приведённые в литературе оценки общего количества, находящегося в земной коре гидратного газа, отличаются более чем на 3 порядка от заниженных 2×10^{14} м³ [Соловьев, 2002, 2003] до сильно завышенных 7.6×10^{18} м³ [Dobrynin, Korotajev, Plyushev, 1981]. Существующие методы или совсем не дают, или дают приблизительную оценку количественного содержания газогидратов в породе.

Известные сегодня геофизические методы исследования гидратосодержащих пород (геотермический, сейсмический, электромагнитный, методы потенциальных полей и другие) имеют свою область применимости и свои ограничения [Riedel, Willoughby, Chopra, 2010]. Возможность обнаружения придонных гидратных скоплений геотермическим методом впервые была отмечена в 1998 г. В.А. Голубевым, занимающимся изучением теплового потока озера Байкал [Голубев, 1998]. В 2005 г. неоднородные термограммы были получены Р.И. Кутасом с его коллегами при изучении осадков Черного моря [Кутас и др., 2005]. Возможности геотермического поиска гидратных скоплений также рассматривались в работах А.Д. Дучкова и А.Я. Гольмштока [Дучков и др., 2009; Гольмшток и др., 2005]. Однако в попытках количественной интерпретации неоднородных термограмм возникали сложности с учетом движения фронта диссоциации газогидрата. Была поставлена задача количественной оценки гидратосодержания осадочной породы согласно определению ее теплофизических характеристик и описанию процесса разложения газогидрата в ней.

Кроме того, в главе анализируются известные методики измерений теплофизических характеристик песчаных, глинистых и других сред, способы экспериментальных исследований гидратосодержащих сред и математические модели разложения газовых гидратов в пористых средах, что необходимо для постановки и решения задачи определения количественного содержания газогидратов в песчаных средах.

Во второй главе рассмотрены теоретические аспекты возможного развития нестационарной методики измерения теплофизических характеристик сред с помощью одноигольчатого зонда. Установлено, что с помощью однородного откалиброванного (определены его собственные теплофизические характеристики) одноигольчатого зонда можно определять не только теплопроводность,

но и температуропроводность исследуемых сред [Фадеева, Дучков, 2017].

В главе описана экспериментальная установка в качестве основного элемента которой использовалась либо малая, либо большая термостатируемая камера высокого давления, предназначенная для моделирования гидратосодержащих сред с разной газопроницаемостью и их исследования при низких температурах и высоких давлениях. Малая камера использовалась для моделирования сред с малым содержанием воды, высокой газопроницаемостью (более 1 Дарси) и низкой теплопроводностью (до $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Большая камера использовалась для моделирования гидратосодержащих сред с большим содержанием воды, низкой газопроницаемостью (менее 1 Дарси) и относительно высокой теплопроводностью (менее $5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Вспомогательное оборудование установки включало жидкостный термостат (поддерживающий заданную температуру в камере), баллоны со жатым газом (CH_4 , CO_2) с подводными капиллярными трубками и вентилями, датчики температуры и давления, игольчатые зонды и измерительное оборудование. Одноигольчатый зонд использовался в малой камере, а двухигольчатый – в большой камере высокого давления. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

Описаны доработанные измерительные игольчатые зонды (одноигольчатый и двухигольчатый) с регистрирующей системой и методики измерения теплофизических характеристик: для сред с относительно низкой теплопроводностью (до $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) с помощью одноигольчатого зонда и для сред с относительно высокой теплопроводностью (до $5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) с помощью двухигольчатого зонда при постоянной мощности нагревателя. Методика постоянного нагрева используется в силу высокой собственной теплопроводности иголок, высокой чувствительности температурных датчиков к изменениям температуры и относительно большим расстоянием между иголками двухигольчатого зонда, что увеличивает объем изучаемой среды и уменьшает влияние иголок на измерения.

Калибровка измерительной аппаратуры была проведена на однородных образцах с диапазоном теплопроводности, который охватывает большую часть осадочных пород ($0.1 \div 4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, теплопроводность горных пород [Бабичев и др., 1991]): пластик POLYCAST, парафин, бетон, цементированный песок. Теплофизические характеристики образцов измерялись на сертифицированной установке оптического сканирования Ю.А. Попова в Сколковском институте науки и технологий (Сколтех, Москва).

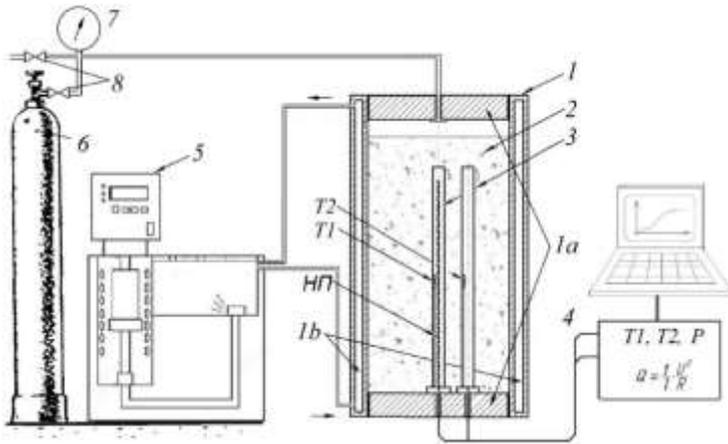


Рисунок 1 – Схема установки для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их тепловых свойств. 1 – цилиндрическая камера высокого давления в термостатирующей рубашке в разрезе, 1a – верхний и нижний obtураторы камеры, 1b – термостатирующая рубашка камеры, 2 – изучаемый образец, 3 – измерительный зонд (двухигольчатый), 4 – измерительный модуль с компьютером, 5 – жидкостный термостат, прокачивающий термостатирующую жидкость через рубашку камеры, 6 – баллон с газом-гидратообразователем, 7 – датчик давления (P), 8 – вентили для напуска (нижний) и сброса (верхний) газа. $T1$ и $T2$ – терморезисторы нагревательной (датчик 1) и измерительной (датчик 2) игл двухигольчатого зонда, HP – нагревательная проволока (характеристики нагревателя: Q – удельная тепловая мощность, Вт/м; R – сопротивление, Ом; l – длина, м; U – напряжение, подаваемое на нагреватель).

В результате сравнения полученных соискателем значений теплопроводности и объемной теплоемкости этих образцов с данными из Сколтеха в программную реализацию методики измерения объемной теплоемкости с помощью двухигольчатого зонда была введена поправка для устранения систематической ошибки измерений.

После калибровочных экспериментов с помощью одноигольчатого и двухигольчатого зондов дополнительно определялись теплофизические характеристики сухого песка и смесей песка с глиной (с низкой теплопроводностью), и с помощью только двухигольчатого зонда определялись теплофизические характеристики льда при атмосферном давлении и разных температурах (таблица 1). Полученные соискателем значения теплопроводности и температуропроводности льда в пределах погрешности согласуются со значениями, взятыми из работы [Богородский, Гаврило, 1980].

Таблица 1 – Определение теплофизических характеристик различных образцов игольчатыми зондами

Теплофиз. параметры	Способ измерения:		Импульс	Константа	Независ. данные
	Исследуемый образец	Одноигольчатый зонд	Двухигольчатый зонд		
λ , Вт/(м·К) a , м ² /с ρ , кг/м ³ С, Дж/(кг·К)	Сухой песок. Т=23 °С, Р=1 атм.	0.23 1.8·10 ⁻⁷ 1500 852	0.22 1.79·10 ⁻⁷ 1500 819	0.23 1.85·10 ⁻⁷ 1500 829	0.25 (ИТП-МГ4)
λ , Вт/(м·К) a , м ² /с ρ , кг/м ³ С, Дж/(кг·К)	Уплотненная смесь 4т сухого песка и 1т каолиновой глины (m=277 г). Т=23 °С, Р=1 атм	0.29 2.7·10 ⁻⁷ 1533 701	0.27 2.71·10 ⁻⁷ 1533 650	0.30 2.72·10 ⁻⁷ 1533 719	
λ , Вт/(м·К) a , м ² /с	Лед. Т= -5 °С, Р=1 атм.		2.04 1.05·10 ⁻⁶	2.25 1.17·10 ⁻⁶	2.25* 1.21·10 ⁻⁶ *
λ , Вт/(м·К) a , м ² /с	Лед. Т= -10 °С, Р=1 атм.		2.11 1.14·10 ⁻⁶	2.31 1.21·10 ⁻⁶	2.30* 1.25·10 ⁻⁶ *
λ , Вт/(м·К) a , м ² /с	Лед. Т= -15 °С, Р=1 атм.		2.09 1.22·10 ⁻⁶	2.35 1.27·10 ⁻⁶	2.34* 1.29·10 ⁻⁶ *
λ , Вт/(м·К) a , м ² /с	Лед. Т= -20 °С, Р=1 атм.		2.25 1.31·10 ⁻⁶	2.40 1.32·10 ⁻⁶	2.39* 1.34·10 ⁻⁶ *

Примечание: дополнительные измерения теплопроводности проводились с помощью прибора ИТП-МГ4; * - данные приводятся из работы [Богородский, Гаврило, 1980].

В третьей главе предложен и экспериментально проверен способ количественной оценки гидратосодержания сред с высокой проницаемостью для газа. Идея способа состоит в измерении (с помощью внедренного в исследуемую гидратосодержащую среду игольчатого зонда) двух типов экспериментальных термограмм:

стабильной и термограммы с разложением газогидрата. Первую измеряют в стабильных для существования газогидрата условиях, при малых мощностях нагревателя (S-термограмма). Термограмму с разложением (D-термограмма) получают при высокой мощности линейного нагревателя, такой, что в процессе нагрева температура гидратосодержащей среды превышает температуру диссоциации газогидрата, гидрат распадается, происходит поглощение тепла, при этом оценивается затраченная на разложение газогидрата энергия и объем, в котором произошло его разложение, и далее рассчитывается количество гидрата в единице объема среды вокруг зонда [Фадеева, Дучков, Пермяков, 2016].

Для описания стабильных экспериментальных термограмм, полученных при нагревании искусственных гидратосодержащих образцов в стабильных для газогидрата условиях, использовалось решение (4) одномерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах (1) с расположенным на оси симметрии линейным источником тепла, который задавался как граничное условие постоянного теплового потока с оси (3)

$$\frac{a}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) - \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $T(r,t)$ – текущая температура среды в момент времени t [с] на расстоянии r [м] от оси симметрии, a [м²/с] – температуропроводность среды.

В начальный момент $t=0$ при любом $r \geq 0$ температура в среде T_0 . Так как испускаемая источником энергия ограничена, то на бесконечном расстоянии от источника она также равна начальной

$$T(\infty, t) = T_0; \quad T(r, 0) = T_0. \quad (2)$$

Если линейный нагреватель рассматривать как бесконечную тонкую нить, то в малой окрестности источника поток определяется линейной мощностью нагревателя, Q [Вт/м]

$$-\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow 0} = \frac{Q}{2\pi}, \quad (3)$$

где λ [Вт/(м·К)] – теплопроводность среды.

Исходя из принципа подобия решение поставленной задачи (1)–(3) [Карслоу, Егер, 1964]

$$T(r,t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\lambda} \cdot E_1 \left(\frac{r^2}{4at} \right), \quad (4)$$

где $E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) = \int_{r^2/4at}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$ – интегральная показательная функция.

Для описания термограмм разложения, решалась задача с фазовым переходом (задача Стефана) [Гольмиток и др., 2005]. С момента начала разложения газогидрата в среде вблизи зонда возникает движущийся от нагревателя фронт разложения: $r = r_{ph}(t)$, отделяющий область среды без гидратной фазы ($r < r_{ph}(t)$ – область среды вблизи зонда с водой и газом в порах) от области среды с гидратной фазой ($r > r_{ph}(t)$ – область среды с газогидратом, водой и газом в порах) и характеризующийся коэффициентом распространения фронта во времени α : $r_{ph}(t) = \alpha \cdot \sqrt{t}$. Каждая из областей характеризуется своими теплофизическими характеристиками: λ_2 и a_2 , λ_1 и a_1 – тепло- и температуропроводности среды до (область среды с газогидратом в порах: $T < T_{ph}$), после (область среды без газогидрата в порах: $T > T_{ph}$) диссоциации газогидрата в среде соответственно. T_{ph} [К] – температура фазового перехода газогидрата для существующего в среде давления P [МПа].

На границе фазового перехода (движущемся фронте) учитывается непрерывность температуры и теплового потока

$$T(\zeta(t) - 0, t) = T(\zeta(t) + 0, t) = T_{ph},$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\zeta(t)-0} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\zeta(t)+0} = -L \cdot \rho_0 \cdot \frac{d\zeta(t)}{dt}, \quad (5)$$

где L [Дж/кг] – удельная теплота разложения газогидрата на газ и воду; $\rho_0 = \rho_h \cdot \varphi \cdot \delta_h$ [кг/м³] – гидратосодержание (масса диссоциирующего газогидрата в единичном объеме среды); φ – пористость среды; δ_h – объемная доля газогидрата в порах среды; ρ_h [кг/м³] – плотность сплошного газогидрата.

Решение задачи с фазовым переходом (1)–(3) и (5) имеет вид [Гольмиток и др., 2005]:

$$T(r, t) = T_0 + (T_{ph} - T_0) \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4a_2 t}\right) \Big/ E_1\left(\frac{\alpha^2}{4a_2}\right), \quad r > r_{ph}(t), \quad T < T_{ph}, \quad (6)$$

$$T(r, t) = T_{ph} + \frac{Q}{4\pi\lambda_1} \cdot \left(E_1\left(\frac{r^2}{4a_1 t}\right) - E_1\left(\frac{\alpha^2}{4a_1}\right) \right), \quad r < r_{ph}(t), \quad T > T_{ph}. \quad (7)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_0} + L\rho_0 \frac{d\zeta}{dt}, \quad (9)$$

$$\rho_0 = \frac{4\lambda_2}{L\alpha^2} \cdot b_2^{d^2} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4a_2}\right) - \frac{Q}{L\alpha^2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4a_1}\right). \quad (10)$$

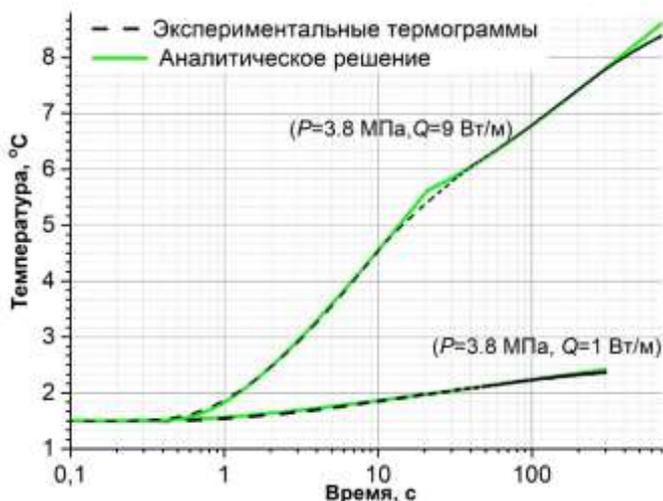


Рисунок 2 – Термограммы: экспериментальные (пунктирная черная линия) и теоретические (сплошная зеленая линия), полученные с помощью игольчатого зонда в исследуемом гидратосодержащем образце.

Предложенный способ оценки гидратосодержания среды проверен в лабораторном эксперименте на установке (рисунок 1) с малой камерой высокого давления и с использованием одноигльчатого зонда. Согласно описанной в [Пермяков, 2010] методике I, из кварцевого песка, воды и газа метана был сформирован гидратосодержащий образец, с помощью вмонтированного в камеру игольчатого зонда измерены S- и D-термограммы, которые аппроксимировались аналитическим решением (8) (см. рисунок 2): решалась обратная задача нахождения модельных параметров, вычислялись теплофизические характеристики среды с гидратом метана и без него в порах, коэффициент распространения фронта и гидратосодержание (таблица 3). В таблице также приведены независимые оценки полученных величин.

Как видно из таблицы 3 гидратосодержание образца составило 55 кг в одном кубическом метре образца, что соответствует объемной доли гидрата метана в его порах: $\delta_h \approx 0.15$ (при пористости $\varphi = 0.38$). Независимая оценка гидратосодержания образца (2-ая строка в таблице 3) получена из измеренного количества газа CH_4 , перешедшего в гидратную фазу: $\delta_h = \frac{N_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{CH}_4}}{\gamma \rho_h \varphi V} \approx 0.16$, где V и φ – объем и пористость образца, γ – массовая доля CH_4 в гидрате, M_{CH_4} – молярная масса метана, N_{CH_4} – количество газа CH_4 , перешедшего в гидратную фазу.

Таблица 3 – Результаты решения обратной задачи

λ_2 , Вт/(м·К)	$a_2 \cdot 10^7$, м ² /с	λ_1 , Вт/(м·К)	$\alpha^2 \cdot 10^8$, м ² /с	δ_h
0.48±0.02	3.6±0.4	0.72±0.03	5.9±1.7	0.15±0.09
0.52±0.02	3.7±0.2	0.70±0.02	3.8	0.16

В **четвертой главе** предложен и экспериментально проверен способ оценки гидратосодержания песчаных сред с низкой проницаемостью для газа (например, донных отложений).

Переход поровой воды в газогидрат заметно снижает теплоемкость среды, так как теплоемкость гидрата примерно в 2 раза меньше теплоемкости воды. Предлагаемый способ подразумевает определение теплофизических характеристик среды в двух ее состояниях: с газовым гидратом в порах, т. е. в условиях его стабильного существования (состояние 1), и вне условий его стабильного существования, когда после его полного разложения в порах остается вода и газ (состояние 2) [Фадеева и др., 2020].

Теплопроводность и температуропроводность песчаной среды можно определять с помощью двухигольчатого зонда по описанной во второй главе методике. Объемная теплоемкость рассчитывается как отношение теплопроводности к температуропроводности и используется для оценки количества содержащегося в порах газогидрата.

Состояние 1. Объемная теплоемкость песчаной среды в условиях стабильного существования газогидрата складывается из объемных

долей теплоемкостей минерального скелета, газогидрата, воды и газа-гидратообразователя:

$$\rho C_{eff1} = (1-\varphi) \cdot \rho_s C_s + \varphi \delta_h \rho_h C_h + \varphi \left(\delta_{w0} - (1-\gamma) \frac{\rho_h}{\rho_w} \delta_h \right) \rho_w C_w + \\ + \varphi \left(1 - \delta_h - \delta_{w0} + (1-\gamma) \frac{\rho_h}{\rho_w} \delta_h \right) \rho_g C_g,$$

где ρ_s и C_s , ρ_h и C_h , ρ_w и C_w , ρ_g и C_g – плотность, кг/м³ и теплоемкость, Дж/(кг·К) минеральной матрицы породы (s), газогидрата (h), воды (w) и газа-гидратообразователя (g) соответственно; φ – пористость породы, δ_h и δ_{w0} – объемная доля газогидрата и общая доля всей воды в поровом пространстве породы; γ – массовая доля газа-гидратообразователя в газогидрате.

Состояние 2. Объемная теплоемкость песчаной среды вне условий стабильного существования газогидрата складывается из объемных долей минерального скелета, воды и газа-гидратообразователя:

$$\rho C_{eff2} = (1-\varphi) \rho_s C_s + \varphi (\delta_{w0} \rho_w C_w + (1-\delta_{w0}) \rho_g C_g).$$

В случае стопроцентного насыщения порового пространства среды водой, что характерно для донных отложений (если не учитывать её газовую составляющую), при определении объемной доли газогидрата необходимо знать пористость и объемные теплоемкости среды в двух состояниях – с газогидратом в порах (ρC_{eff1}) и без него (ρC_{eff2}):

$$\delta_h = \frac{\rho C_{eff2} - \rho C_{eff1}}{\varphi [\rho_w c_w - \rho_h c_h]}.$$
 (11)

В случае учета газовой составляющей следует также знать общую долю всей воды в среде и плотность газа в ней в этих состояниях (ρ_{g1} и ρ_{g2}):

$$\delta_h = \frac{\rho C_{eff2} - \rho C_{eff1} + \varphi (1 - \delta_{w0}) (\rho_{g1} - \rho_{g2}) C_g}{\varphi [(1-\gamma) \rho_h C_w + (1 - (1-\gamma) \rho_h / \rho_w) \rho_{g1} C_g - \rho_h c_h]}.$$
 (12)

Предложенный способ оценки гидратосодержания проверен в лабораторном эксперименте на установке с большой камерой высокого давления и двухигльчатый зондом (рисунок 1). Гидратосодержащий образец формировался из известных масс кварцевого песка, воды и углекислого газа. С помощью вмонтированного в эту камеру двухигльчатого зонда и регистрирующей системы получены стабильные термограммы нагревательной и измерительной игловок зонда (рисунок 3), находящегося в образце в разных его состояниях. Сперва

образец находился в состоянии *A* (без газогидрата, с водой и газом CO_2 в порах), при атмосферном давлении и температуре $22\text{ }^\circ\text{C}$. Далее, после формирования гидрата CO_2 измеряли термограммы для образца в состояниях *B* и *C* (с гидратом CO_2 в порах, таблица 4). При аппроксимации полученных термограмм аналитическим решением (4) определяли теплопроводность и температуропроводность образца в состояниях *A*, *B* и *C*. Далее рассчитывалась объемная теплоемкость образца в этих состояниях: без газогидрата ($\rho C_{\text{eff}1}$, состояние *A*) и с гидратом CO_2 ($\rho C_{\text{eff}2}$, состояния *B* и *C*) в порах.

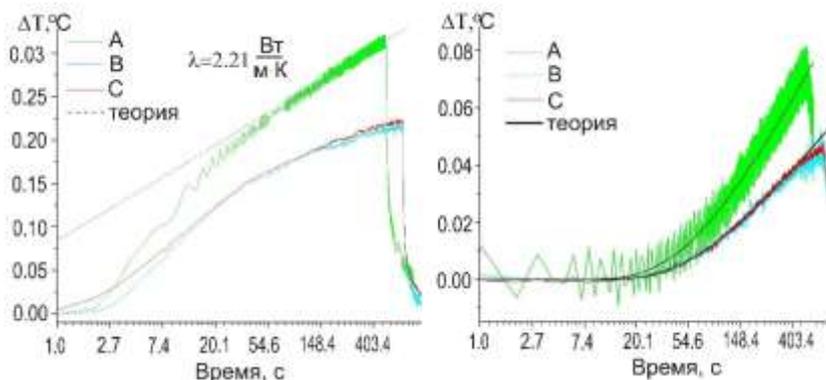


Рисунок 3 – Экспериментальные термограммы нагрева образца в разных его состояниях: *A* – образец без гидрата ($Q = 0.98$ Вт/м), *B* и *C* – образец с равномерно распределенным гидратом CO_2 ($Q = 0.49$ Вт/м) и теоретические термограммы (черные линии). Термограммы нагревательной (левый график) и измерительной (правый график) иглолок двухигльчатого зонда, находящегося в образце в состояниях *A*, *B* и *C* – зеленая, голубая и красная линии соответственно.

На рисунке 3 представлены очищенные от теплового фона термостата термограммы нагревательной иглы (левый график) и измерительной иглы (правый график) двухигльчатого зонда для образца в состояниях *A*, *B* и *C* (таблица 4). Используемая в измерениях тепловая мощность нагревателя составила 0.98 Вт/м для образца в состоянии *A* (без гидрата в порах) и 0.49 Вт/м в случае образца в состояниях *B* и *C* (с гидратом CO_2 в порах). Так как теплофизические характеристики образца в состояниях *B* и *C* очень близки, то их термограммы накладываются друг на друга.

В таблице 4 приведены полученные теплопроводность (λ) и объемная теплоемкость (ρC) образца в состояниях *A*, *B*, *C*, а также оценки

объемной доли гидрата: $\delta_h(\Delta\rho C)$ рассчитывалась по формуле (12) и независимая оценка $\delta_h(\Delta P)$ рассчитана согласно количеству газа CO_2 , перешедшего в гидратную фазу.

Независимая оценка объемной доли гидрата $\delta_h(\Delta P)$, рассчитывалась по формуле: $\delta_h = m_h / (\rho_h \phi V_{sam})$, где V_{sam} и ϕ – объем и пористость образца, $m_h = N_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} / \gamma$ – масса наработанного в объеме образца гидрата CO_2 . Количество газа CO_2 (N_{CO_2}), перешедшего в гидратную фазу рассчитывалось с использованием записи изменения температуры и давления в образце в процессе гидратоформирования и уравнения состояния Пенга-Робинсона для газа CO_2 .

Таблица 4 – Теплофизические параметры образца в процессе формирования в его порах гидрата CO_2 и оценки объемной доли наработанного в порах гидрата

Состав и термобарическое состояние образца	Теплопроводность	Объемная теплоемкость	Доля гидрата в порах	
	λ , Вт/(м·К)	ρC , Дж/(м ³ ·К)	$\delta_h(\Delta\rho C)^*$	$\delta_h(\Delta P)^{**}$
A: песок, вода, газ CO_2 $T=22$ °C, $P = 1.01325$ бар	2.21±0.02	(2.26±0.05)·10 ⁶	-	-
B: песок, гидрат, вода, газ CO_2 $T=2.2$ °C, $P= 25$ бар	1.75±0.02	(2.04±0.05)·10 ⁶	0.51±0.1	0.53±0.03
C: песок, гидрат, вода, газ CO_2 $T=2.2$ °C, $P= 24$ бар	1.74±0.02	(2.01±0.05)·10 ⁶	0.57±0.1	0.54±0.03

* – оценка, полученная по изменению объемной теплоемкости образца (12)

** – оценка, полученная по изменению термобарических условий в системе, согласно уравнению состояния Пенга-Робинсона, для газа CO_2

Как видно из таблицы 4 полученная согласно предложенному способу оценка гидратосодержания хорошо согласуется с независимой оценкой, рассчитанной с использованием количества газа CO_2 , перешедшего в гидратную фазу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом диссертационной работы являются два способа оценки гидратосодержания песчаных сред, на основе выполненных в этих средах теплофизических экспериментов. Способы рассматриваются как перспективные для практического применения для осадочных пород. Их значимость состоит в однозначном выявлении газогидрата в породе и оценке его количества за счет сопоставления измерений, проведенных в условиях стабильного существования газогидрата и вне этих условий (либо в условиях его разложения).

Разработанные способы оценки гидратосодержания песчаных пород могут применяться в лабораторных исследованиях, например, как контролирующее содержание газогидрата при изучении акустических, электрических, механических или других параметров гидратосодержащих сред. Благодаря возможности масштабирования созданных измерительных игольчатых зондов, предложенные способы могут быть адаптированы для оценки гидратосодержания донных отложений с использованием геотермического зонда, измеряющего теплопроводность и объемную теплоемкость осадков.

Первый способ оценки гидратосодержания состоит в проведении сравнительных теплофизических измерений, которые позволяют рассчитать затраченную на разложение газогидрата энергию и определить объем, в котором произошло его разложение. В результате обработки этих данных можно рассчитать массу газогидрата в единице объема среды вокруг нагретателя. Возможная область применения - обнаружение предложенным способом гидратов в угольных пластах. В поровом пространстве угольного пласта в стабильных для существования гидрата метана термобарических условиях при наличии даже небольшого количества поровой воды метан может переходить в гидратную твердую фазу. Известные на сегодняшний день геофизические методы не позволяют подтвердить или опровергнуть наличие гидратов в угольных пластах.

Второй способ оценки гидратосодержания применим к донным осадкам глубоких водоемов. Теплофизические измерения можно выполнять с помощью колонкового пробоотборника, обеспечивающего захват и измерение теплофизических характеристик донных осадков вначале на дне (в условиях стабильного существования газогидрата) и далее по мере поднятия осадка в пробоотборнике на судно, при разложении газогидрата. Как вариант, измерения могут проводиться с использованием погружных геотермических зондов, путем проведения сравнительных измерений в осадках, где его состав известен и выдержан на некоторой площади с измерениями на участках с неизвестным составом осадка. Разница объемных теплоемкостей породы в разных точках измерений позволит определить количество газогидрата в породе.

Преимущество разработанного измерительного устройства и методики определения теплофизических параметров сред с помощью двухигольчатого зонда состоит в получении и теплопроводности и температуропроводности среды, в то время как устройства, используемые в работах В.А. Голубева [Голубев, 1998], Von Herszen [Von Herszen, Maxwell, 1959], М.Е. Пермякова [Пермяков, 2010] и

А.Д. Дучкова [Дучков и др., 2012], позволяли измерить только теплопроводность.

В дальнейшем соискатель планирует провести лабораторные эксперименты предложенными способами со смесью песка-глины и с углем, разработать и создать двухигольчатый зонд, измеряющий теплофизические, электрические и акустические характеристики осадочных пород, что даст возможность определять их состав (объемные доли твердой матрицы, гидрата, воды, нефти, газа или других поронаполнителей) *in situ* (без извлечения породы на поверхность).

Использование более сложных многофункциональных зондов для исследования несцементированных пород *in situ* было показано, например, при определении теплоемкости и диэлектрической проницаемости почвы с помощью двухигольчатого зонда и теории распространения в среде теплового и электромагнитного импульсов [Ochsner, Horton, Ren, 2001]. Областью применения таких зондов может стать как определение объемных долей порового флюида и вмещающего скелета осадочной породы при нормальных условиях, так и состава породы в условиях высоких давлений и температур.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. **Фадеева И.И.** Оценка количественного содержания гидрата СО₂ в лабораторных образцах с помощью двухигольчатого зонда / **И.И. Фадеева**, А.А. Дучков, А.Ю. Манаков, Д.Е. Аюнов // Геофизические исследования. – 2020. – Т. 21. – № 2. – С. 61-77.

2. Кальяк А.А. Устройство для измерения теплофизических свойств слабосцементированных пород: Патент на полезную модель № 213321 / Кальяк А.А., Казанцев С.А., **Фадеева И.И.**

3. **Фадеева И.И.** Определение теплофизических свойств сред при помощи одноигольчатого зонда / **И.И. Фадеева**, А.А. Дучков // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2017. – Т. 20. – № 4 (72). – С. 80-89.

4. **Фадеева И.И.** Теплофизический метод количественной оценки гидратосодержания в образцах, имитирующих донные осадки / **И.И. Фадеева**, А.А. Дучков, М.Е. Пермяков // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 6. – С. 1251-1261.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях

5. **Фадеева И.И.** Исследование возможностей развития метода определения теплофизических свойств линейным источником / **И.И. Фадеева**, Д.Е. Аюнов, А.А. Дучков //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – №. 3. С. 174–180.

6. **Фадеева И.И.** Развитие методики определения теплофизических параметров сред с помощью двухигольчатого теплового зонда / **И.И. Фадеева** // Трофимуковские чтения - 2019: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. (Новосибирск, 7-12 октября 2019 г.). – 2019. – С. 90-92.

7. **Фадеева И.И.** Количественная оценка гидратосодержания лабораторных образцов с помощью двухигольчатого зонда / **И.И. Фадеева** // Геодинамика. Геомеханика и геофизика: Материалы девятнадцатой Всероссийской конференции (стадионар "Денисова пещера", Россия, Алтайский край, п. Солонешное, 22-28 июля 2019 г.). – 2019. – С. 53-54.

8. **Фадеева И.И.** Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических свойств гидратосодержащих пород [Электронный ресурс] / **И.И. Фадеева**, А.А. Дучков // Дегазация Земли: геология и экология - 2018: Международная конференция (г. Москва, 24-26 апреля 2018 г.). – 2018. – С. 1-7. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art69>

9. **Фадеева И.И.** Исследования зависимости газопроницаемости несцементированных песчаных грунтов от их водонасыщенности / **И.И. Фадеева** // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рожд. проф. М.И. Кучина. – 2017. – Т. 1. – С. 504-505.

10. **Фадеева И.И.** Конструктивные особенности игольчатого зонда, используемого для определения теплофизических свойств горных пород / **И.И. Фадеева** // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 4 т.. – 2017. – Т. 4. – С. 95-99.

11. **Фадеева И.И.** Разработка полевой методики определения тепловых свойств различных сред / **И.И. Фадеева** // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 120-летию со дня

основания Томского политехнического университета. – 2016. – Т. I. – С. 503-504.

12. **Фадеева И.И.** Исследование температурного отклика геотермического зонда на внедрение в донные осадки / **И.И. Фадеева** // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 18-22 апреля 2016 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сборник материалов в 4 т.. – 2016. – Т. 4. – С. 65-70.

13. **Фадеева И.И.** Моделирование распределения температуры при внедрении геотермического зонда в донные осадки / **И.И. Фадеева**, А.Д. Дучков, С.А. Казанцев, М.Е. Пермяков // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 2. – С. 153-161.

14. Дучков А.Д. Формирование образцов неконсолидированных осадков, содержащих газогидраты, и изучение их акустических свойств [Электронный ресурс] / А.Д. Дучков, Н.А. Голиков, А.А. Дучков, А.Ю. Манаков, М.Е. Пермяков, А.Н. Дробчик, Р.В. Орлов, **И.И. Фадеева** // Петрофизическое моделирование осадочных пород: IV Балтийская школа-семинар (BalticPetroModel 2015) (г. Петергоф, 14-18 сентября 2015 г.). – 2015. – С. 24-27.

15. Казанцев С.А. Устройство для оперативного измерения температуропроводности слабосцементированных пород / С.А. Казанцев, **И.И. Фадеева** // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 2, № 2. С.82–85.

16. Пермяков М.Е. Лабораторное моделирование гидратосодержащих сред и исследование их физических свойств / М.Е. Пермяков, **И.И. Фадеева**, А.Д. Дучков, А.Ю. Манаков, А.А. Дучков, Н.А. Голиков, А.Н. Дробчик, Н.А. Манченко // IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти акад. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, 16-20 февраля 2015 г.): Материалы конференции. – 2015. – С. 550-554.

17. Дучков А.А. Количественная оценка гидратосодержания в донных осадках (по результатам лабораторных измерений теплопроводности) / А.А. Дучков, А.Д. Дучков, **И.И. Фадеева** // Газовые гидраты в экосистеме Земли' 2014: Программа конференции и тезисы докладов – Новосибирск – 26с. – 2014.

18. **Фадеева И.И.** Теория метода игольчатого зонда для одновременного определения тепло- и температуропроводности различных сред / **И.И. Фадеева**, А.А. Дучков, А.Л. Карчевский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8-18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. "Недропользование.

Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 4 т. Т. 3 – СГГА – Новосибирск – с.124-128 – 2014 (статья в сборнике материалов конференции).

19. **Фадеева И.И.** Лабораторные исследования физических свойств образцов, содержащих газовые гидраты [Электронный ресурс] / **И.И. Фадеева**, А.Д. Дучков, А.Ю. Манаков, А.А. Дучков, М.Е. Пермяков, Н.А. Голиков, А.Н. Дробчик, Н.А. Манченко // Петрофизическое моделирование осадочных пород: III Балтийская школа-семинар (BalticPetroModel-2014) (г. Петергоф, 15-19 сентября 2014 г.) – Петергоф – 18103с. – 2014

20. **Фадеева И.И.** Определение теплофизических свойств среды методом игольчатого зонда / **И.И. Фадеева** // Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач: Пятая Международная молодежная научная школа-конференция (Новосибирск, Академгородок, 8-13 октября 2013 г.); Тезисы докладов – Сибирское научное издательство – Новосибирск – с.91-92 – 2013

21. **Фадеева И.И.** Методика одновременного измерения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости среды игольчатым зондом / **И.И. Фадеева**, М.Е. Пермяков, Д.Е. Аюнов, Н.А. Манченко //Трофимуковские чтения - 2013: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых (г. Новосибирск, 8 - 14 сентября 2013 г.) – Новосибирск – с.342-327 – 2013

22. Аюнов Д.Е. Изучение физических свойств гидратосодержащих сред в лаборатории / Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков, **И.И. Фадеева**, Н.А. Манченко //Современные проблемы и будущее геокриологии: Тезисы докладов III Всероссийского научного молодежного геокриологического форума (Якутск, 24 июня-13 июля 2013 г.) – Изд-во мерзлотоведения СО РАН – Якутск – с.38-39 – 2013

23. **Фадеева И.И.** Количественная оценка гидратосодержания в образце по данным измерения температурного поля от линейного источника тепла / **И.И. Фадеева**, А.А. Дучков, М.Е. Пермяков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 3 т. – СГГА – Новосибирск – том Т. 2 – с.46-51 – 2013.

24. **Фадеева И.И.** Количественная оценка гидратосодержания в породе по измерениям температурного поля от линейного источника

тепла / **И.И. Фадеева** // Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач: Тезисы IV Международной молодежной научной школы-конференции (Новосибирск, Академгородок, 5-15 августа 2012) – Новосибирск – 117с. – 2012

25. **Фадеева И.И.** Развитие метода количественной оценки гидратосодержания в породе по данным измерения температурного поля от линейного источника тепла / **И.И. Фадеева** // Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс": Геология. 13 - 19 апреля 2012 г. – Изд-во НГУ – Новосибирск – С. 123-123 – 2012

26. Дучков А.А. Оценка глубинного теплового потока через дно Телецкого озера по результатам мониторинга температуры в донных осадках / А.А. Дучков, **И.И. Фадеева**, С.А. Казанцев, Ф. Андерссон // Интерэкспо Гео-Сибирь-2012: VIII Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.) – СГГА – Новосибирск – том Т. 1 – С. 14-18 – 2012

27. **Fadeeva I.I.** Quantitative estimation of the gas-hydrates content from the heating experiment with a needle probe [Электронный ресурс] / **I.I. Fadeeva**, A.A. Duchkov // 9th International Conference on Gas Hydrates (ICGH9) (Denver, Colorado USA, June 25 - 30, 2017): Abstract. – 2017.

28. **Fadeeva I.I.** Quantitative evaluation of gas hydrate saturation in sediments using a two-needle probe / **I.I. Fadeeva**, G.A. Dugarov, A.A. Duchkov, A.Y. Manakov // 10th International Conference on Gas Hydrates (ICGH10). Singapore. Jun 21-26, 2020.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 07.02.2024

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 100. Зак. № 00

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3