

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.418.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 08.06.2022 № 9

О присуждении Бельских Денису Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата» по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 23 марта 2022 года, протокол заседания № 6 диссертационным советом 24.2.418.02, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. Приказ Минобрнауки России от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель Бельских Денис Сергеевич, 05.08.1993 года рождения, в 2017 году окончил магистратуру по направлению подготовки 01.04.01 Математика ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет». В период подготовки диссертации соискатель Бельских Денис Сергеевич обучался в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника (профиль: Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ) с 01.09.2017 по 31.08.2021. Справка о сданных кандидатских экзаменах № 4 выдана 11.01.2022 федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Тюменский государственный университет».

В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории гидродинамики многофазных сред Тюменского филиала ФГБУН Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Диссертация выполнена на кафедре фундаментальной математики и механики Института математики и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, Мусакаев Наиль Габсалямович, главный научный сотрудник Тюменского филиала ФГБУН Института теоретической и прикладной механики СО РАН, по совместительству профессор кафедры прикладной и технической физики Физико-технического института ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Официальные оппоненты: 1) **Рожин Игорь Иванович** – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт проблем нефти и газа СО РАН; 2) **Русинов Алексей Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и физики Бирского филиала ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО УГНТУ) в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, член-корреспондентом АН РБ, заведующим кафедрой физики ФГБОУ ВО УГНТУ **Гималтдиновым Ильясом Кадировичем**, кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры физики ФГБОУ ВО УГНТУ **Столповским Максимом Владимировичем** и утвержденным проректором по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО УГНТУ, кандидатом технических наук **Рабаевым Русланом Ураловичем**, указала, что диссертационная работа Бельских Дениса Сергеевича

«Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата» по содержанию, оформлению, актуальности, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности полученных результатов соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Бельских Денис Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Соискатель имеет 16 работ по теме диссертации, из которых 6 входит в издания из международных баз данных и 2 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Общий объем научных изданий 7,4 п.л., из них вклад автора – 3,1 п.л. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Недостоверные сведения об опубликованных Д.С. Бельских работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значимые публикации:

1. Musakaev N. G. Mathematical modeling of thermal impact on hydrate-saturated reservoir / N. G. Musakaev, S. L. Borodin, D. S. Belskikh // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. 2020. Vol. 20. No. 1. Pp. 43-51. (*WoS, Scopus*)

2. Musakaev N. G. Mathematical Model and Method for Solving the Problem of Non-Isothermal Gas and Liquid Filtration Flow During Dissociation of Gas Hydrates / N. G. Musakaev, D. S. Belskikh, S. L. Borodin // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. Vol. 42, No. 9. Pp. 2198-2204. (*WoS, Scopus, МРБ из ВАК*)

3. Мусакаев Н. Г. Численное исследование процесса разложения газового гидрата при тепловом воздействии на гидратосодержащую область пористого пласта / Н. Г. Мусакаев, Д. С. Бельских // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2021. Том 163. Кн. 2. С. 153-166. (*WoS, Scopus, МРБ из ВАК*)

Musakaev N. G. Numerical study of the process of gas hydrate decomposition under the thermal impact on the hydrate-containing region of a porous formation /

N. G. Musakaev, D. S. Belskikh // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2021. Vol. 163. No 2. Pp. 153-166

4. Мусакаев Н. Г. Численное исследование процесса разложения гидрата метана при закачке теплого газа в гидратонасыщенную залежь / Н. Г. Мусакаев, М. К. Хасанов, С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 56. С. 88-101. (WoS, Scopus, МРБ из ВАК)

Musakaev N. G. Numerical investigation of the methane hydrate decomposition in the process of warm gas injection into a hydrate-saturated reservoir / N. G. Musakaev, M. K. Khasanov, S. L. Borodin, D. S. Belskikh // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2018. No 56. Pp. 88-101

5. Мусакаев Н. Г. Расчет параметров процесса нагнетания газа в насыщенный метаном и его гидратом пласт / Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 3. С. 165-178. (ВАК)

6. Бородин С. Л. Современное состояние исследований, связанных с извлечением метана из гидратосодержащей пористой среды / С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 4. С. 131-147. (ВАК)

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2017617298, Российская Федерация. Hydrate formation or decomposition in a porous medium / Д. С. Бельских, С. Л. Бородин, Н. Г. Мусакаев; заявители и правообладатели: Д. С. Бельских, С. Л. Бородин, Н. Г. Мусакаев. – No 2017617298; заявл. 05.05.2017; опубл. 04.07.2017. – 1 с.

На автореферат поступили отзывы от:

1. Кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории гидратов природных газов Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН **Власова В.А.**, отзыв положительный, с замечаниями:

1. В выражении (7) такая величина, как коэффициент теплопроводности среды λ , представлена в виде суммы коэффициентов теплопроводности фаз, составляющих эту среду. Такое представление не является очевидным, поскольку коэффициент теплопроводности не аддитивная величина. К сожалению, автор никак не аргументирует, почему он представил коэффициент λ в таком виде.
 2. Не понятно как получены коэффициенты A_0 , A_1 и A_2 , которые фигурируют в эмпирическом уравнении (8). Автор не поясняет этого.
 3. На рис. 3 автор использует автомодельную координату, однако выражение для этой величины не приведено. Поэтому не понятно, как были рассчитаны значения этой координаты.
 4. Что автор в своей работе подразумевает под давлением равновесия вода-гидрат-газ и давление p ? Вместо этих величин следует использовать концентрацию газа при равновесии вода-гидрат-газ, которую можно легко рассчитать, зная давление равновесия вода-гидрат-газ, а также концентрацию гидратообразующего газа в пласте. Можно ли видоизменить представленную модель с учетом этих замен?
2. Доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры строительной механики Строительного института ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» **Мальцевой Т.В.**, отзыв положительный, с замечаниями:
1. При сопоставлении результатов численного моделирования с известным аналитическим решением используется терминология «хорошее согласие» (стр. 12), что не является количественной оценкой. Необходимо провести максимальную погрешность отклонения.
 2. Не объясняется установленный в работе эффект – увеличение массового расхода закачиваемого в пласт теплого газа не приводит к увеличению зоны разложения газового гидрата в гидратонасыщенной залежи.

3. Кандидата технических наук, старшего научного сотрудника Института теплофизики СО РАН **Мисюры С.Я.**, отзыв положительный, с замечанием: при тепловом воздействии на пласт темпы разложения газогидратов могут быть существенно ниже полученных в работе из-за эффекта самоконсервации (аномально низкие скорости диссоциации газовых гидратов вследствие образования прочной корки льда без пор). Было бы полезно представленные численные исследования дополнить за счет учета данного эффекта.
4. Кандидата технических наук, заведующего лабораторией вскрытия залежей сложного строения научно-исследовательского отдела бурения Тюменского отделения «СургутНИПИнефть» **Ахметзянова Р.Р.**, отзыв положительный, с замечанием: было бы целесообразно провести обоснование выбора исходных данных при численном исследовании процесса закачки теплого газа в гидратосодержащий пласт.
5. Кандидата физико-математических наук, старшего преподавателя кафедры геофизики Физико-технического института ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» **Канафина И.В.**, отзыв положительный, с замечаниями:
 1. Отсутствие модели скважины, так как исследование пластов (измерение температуры) производится непосредственно в стволе скважины.
 2. Отсутствие сравнения результатов моделирования с промысловыми данными.
6. Доктора химических наук, главного научного сотрудника Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН **Нестерова А.Н.**, отзыв положительный, с замечаниями:
 1. Что такое T_{ij}^{k+1} и p_{ij}^{k+1} в уравнении (8) и зачем понадобились две корреляции для равновесных значений давления и температуры, если равновесие в трехфазной двухкомпонентной системе вода (лед)-гидрат метана-газ является моновариантным – т.е. между равновесными давлением и температурой существует однозначная зависимость?
 2. Равновесное давление диссоциации гидратов метана при температуре 283 К около 7 МПа (Gayet et al. Chem.Eng.Sci. 60(2005) 5751), что выше давления p_0

= 6,0 Мпа в исходном состоянии системы. Почему тогда автор считает, что при температуре закачиваемого газа $T_e = 283$ К диссоциация гидратов метана не происходит (рис. 5)?

3. Диссоциация гидратов является эндотермической реакцией, т.е. происходит с поглощением теплоты. Что тогда обеспечивает повышение температуры на верхней границе гидратосодержащей залежи до значения T больше T_e (рис. 9)?
7. Кандидата физико-математических наук, доцента, старшего научного сотрудника Института угля и углехимии ФГБНУ Федерального исследовательского центра угля и углехимии **Смирнова В.Г.**, отзыв отрицательный, с замечаниями:
 1. Неэффективный и недостаточно обоснованный выбор газообразного метана в качестве теплоносителя, посредством которого осуществляется тепловое воздействие на гидратонасыщенную залежь.
 2. Некорректное рассмотрение при фильтрационном течении одновременно адиабатического эффекта и эффекта Джоуля-Томсона.
 3. Несоответствие части граничных условий сформулированной задаче.
 4. На полученных численными методами кривых распределения температуры и давления вдоль радиальной координаты отсутствуют признаки, отражающие тепловой эффект и барический эффект разложения газовых гидратов.
8. Доктора физико-математических наук, доцента, главного специалиста отдела проектирования и анализа исследований скважин и пластов «РН-БашНИПИнефть» **Чиглинцевой А.С.**, отзыв положительный, с замечаниями:
 1. Автор в качестве определения равновесных значений давления и температуры для фазовых переходов гидрата использует корреляции, представленные формулой (8). Здесь требуется их обоснование. Так, например, в диссертационной работе М.К. Хасанова, которая упоминается в автореферате, представлена простая аппроксимация экспериментальной зависимости, описывающей условия термодинамического равновесия системы «газ-вода-гидрат».

2. Из автореферата непонятно, при каких значениях параметров, характеризующих исходное состояние пласта и нагнетаемого газа, следует учитывать свойства реального газа и эффекты неизотермичности. Здесь стоило бы привести оценки.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются специалистами высокого уровня в области теплофизики, механики многофазных систем и подземной гидродинамики, а ведущая организация известна своими достижениями в области теплофизики и математического моделирования, что позволяет им оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложена физико-математическая модель процессов, происходящих при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт, учитывающая фильтрацию газа и воды, разложение в пористой среде газогидрата, неидеальность газа и неизотермические эффекты при движении газа и воды в пористой среде;

разработана методика расчета параметров фильтрационного газожидкостного течения с учетом разложения газового гидрата в пористой среде при закачке в гидратосодержащий пласт теплого газа или при повышении температуры на верхней границе замкнутой гидратонасыщенной области пласта;

предложены:

- физико-математическая модель неизотермической фильтрации газа или газожидкостной смеси с учетом разложения газогидрата в пористом коллекторе при нагреве гидратосодержащих пород;

- алгоритм численной реализации модели, описывающей в одномерном и двумерном приближениях процесс теплового воздействия на область пористой среды, содержащую в начальном состоянии метан и его гидрат;

- распределения параметров системы «пористый пласт – насыщающий флюид» при диссоциации газового гидрата при тепловом воздействии на гидратосодержащий пласт.

показана практическая значимость исследования в моделировании теплофизических процессов, протекающих в системе «пористый пласт — насыщающий флюид» при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь;

введены основные особенности разложения газогидратов в пористых пластах при тепловом воздействии на гидратосодержащую залежь в зависимости от интенсивности теплового воздействия и исходных параметров пористой среды.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

предложена физико-математическая модель процессов, происходящих при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт, учитывающая движение в пористой среде газа и воды, наличие фазовых переходов, реальные свойства газа, эффекты Джоуля-Томсона и адиабатического расширения;

построена методика расчета нестационарных одномерных и двумерных полей давления, температуры и насыщенностей фаз при закачке в гидратосодержащий пласт теплого газа или при повышении температуры на верхней границе замкнутой гидратонасыщенной области пласта;

применительно к проблематике диссертации **результативно использована** неявная разностная схема, метод прогонки, метод простых итераций и оригинальный метод для расчета гидратонасыщенности для численного моделирования;

разработаны алгоритм и программные продукты для проведения численных экспериментов по установлению особенностей неизотермического фильтрационного течения при изменении параметров теплового воздействия и различных исходных характеристиках пласта;

доказана перспективность применения результатов диссертационного исследования для изучения процесса теплового воздействия на пористый пласт,

насыщенный в исходном состоянии метаном и его гидратом, путем сравнения результатов расчетов с уже известными автомоделными решениями;

изложены результаты численного исследования процесса закачки теплого (с температурой выше исходной температуры пласта) газа в гидратонасыщенный пласт и повышении температуры на верхней границе гидратосодержащей залежи;

изучены основные особенности процесса теплового воздействия на пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии метаном и его гидратом;

показано, что при тепловом воздействии на пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии метаном и его гидратом, разложение газогидрата происходит только на фронтальной поверхности, разделяющей зоны пласта, поры которых насыщены газом и водой, газом и его гидратом.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

создана методика расчета насыщенностей фаз в пористой среде при тепловом воздействии на гидратосодержащую залежь, в основе которой лежит допущение о равновесности фазового перехода;

разработан алгоритм решения, позволяющий проводить численные эксперименты для установления особенностей неизотермического фильтрационного течения при изменении параметров теплового воздействия и различных исходных характеристиках пласта;

определены влияния параметров теплового воздействия и различных исходных характеристик пласта на протяженность зоны, насыщенной продуктами разложения гидрата метана;

обоснована возможность использования физико-математической модели неизотермического фильтрационного течения с учетом диссоциации в пористой среде газового гидрата при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь;

выполнен расчет распределения основных параметров системы при различных значениях параметров теплового воздействия и исходных характеристиках пласта.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на основе фундаментальных законов теплофизики и механики многофазных систем;

идея исследования базируется на анализе практического опыта моделирования теплофизических процессов и применения метода теплового воздействия на гидратонасыщенные залежи;

использованы апробированные численные методы, проверенные при моделировании других задач о тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь;

верифицированы результаты исследования многочисленным тестированием используемых программ при различных исходных данных и сопоставлением с расчетами других авторов.

Личный вклад автора состоит в участии его во всех этапах исследования от постановки задачи и выбора метода ее решения до получения и анализа результатов. Автору полностью принадлежит численная реализация физико-математической модели (в одно- и двумерной постановке) неизотермической фильтрации газа и воды с учетом разложения газового гидрата.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1) В диссертации при рассмотрении закачки теплого (с температурой выше исходной температуры пласта) газа в пласт, содержащий в начальном состоянии метан и его гидрат, использована одномерная модель, в рамках которой не учитываются потоки тепла в кровлю и подошву пласта. Это ограничивает область применимости модели, ведь возможна добыча газа из гидратонасыщенного пласта за счет отбора тепла из окружающих газогидратный пласт горных пород.

2) В результате численных расчетов получено, что не образуется протяженная (объемная) зона разложения газового гидрата, т.е. область пористой среды, где газ, вода и гидрат находятся в состоянии термодинамического равновесия. Возможно, тут ошибка в вычислительном алгоритме, где равновесные температура и давление

вычисляются по отдельности, соответственно раздельно определяются возможные изменения гидратонасыщенности. Следовало было их связать, т.е. по вычисленному значению давления следует определять искомую температуру фазового перехода из соотношения, выражающего условие фазового равновесия (например, из зависимости $T_h = a \ln(p) + b$, где a и b – эмпирические коэффициенты, которые находятся путем аппроксимации кривой термодинамического равновесия гидратообразования).

3) Почему теплофизические характеристики скелета пористой среды являются постоянными по мере разложения газовых гидратов?

Соискатель Бельских Д.С. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1) Для нашего граничного условия мы рассматриваем случай, когда тепловой поток в горизонтальном сечении скважины распространяется строго радиально, а распространение тепла по вертикали будет пренебрежимо мало в виду симметрии задачи.

2) Для вычисления равновесных температуры и давления использовалась только одна корреляция, поэтому другие зависимости было решено не использовать. В работе расчетным путем доказан фронтальный режим разложения газового гидрата при тепловом воздействии на пласт, насыщенный в исходном состоянии метаном и его гидратом. Факт того, что при тепловом воздействии возможен только фронтальный режим диссоциации газогидрата, показан также в работе [Musakaev, Khasanov, "On the issue of the solutions existence of the problem of gas hydrate dissociation in a porous medium with the formation of an extended region of phase transitions", 2019].

3) При наших диапазонах изменения основных параметров (давления и температуры) такие параметры, как теплопроводность и объёмная теплоёмкость можно считать постоянными. Их изменения составляют меньше 5% [Шагапов, Мусакаев, «Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа», 2016].

Соискатель Бельских Д.С. также ответил на критические замечания в отзыве на автореферат от канд. физ.-мат. наук Смирнова В.Г.:

1) Действительно, закачка газа в пласт является не самым энергоэффективным способом подачи тепла в пласт, однако закачка воды с точки зрения рассматриваемой модели – более простая задача. Так неизотермические эффекты проявляются сильнее именно в газовой фазе, а не в жидкой, которая бы и имела большую теплоёмкость.

2) Оба процесса могут протекать в рассматриваемой системе «пористая среда – насыщающий флюид», а характер этих процессов зависит от законов теплообмена между компонентами пористой среды [Чекалок, Термодинамика нефтяного пласта, 1965]. Используемое уравнение притока тепла приведено в монографии Басниева (1993 г.) и выведено с учетом первого начала термодинамики. Одновременно эти процессы при неизотермической фильтрации газа с учётом разложения и образования газовых гидратов также рассматривались в работах Рамазанова А.Ш. и Шарафутдинова Р.Ф. (для случая отбора газа из залежи и разложения газогидрата), а также Бондарева Э.А. и Рожина И.И. (для случая образования газового гидрата в пористой среде).

3) Внутренняя часть граничных условий по температуре соответствует поставленной задаче, поскольку рассматриваемые в работе времена расчета существенно больше характерных времен выравнивания температуры в пласте и используется однотемпературная модель. При этом тепловой поток в горизонтальном сечении скважины распространяется строго радиально (распространение тепла по вертикали пренебрежимо мало в виду симметрии задачи).

4) На кривых распределения температуры и давления присутствуют признаки, отражающие тепловой и барический эффекты разложения газовых гидратов, поскольку наличие неизотермических эффектов приводит к понижению давления и температуры, а также исчезновению области с одинаковой температурой вблизи внутренней границы, что можно видеть на рис. 3 автореферата диссертации. На этом

