

Вх. №25/22
от 20.05.22

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
инновационной работе
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Уфимский государственный
нефтяной технический
университет»

Р. У. Рабаев
« 20 05 2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на диссертационную работу Бельских Дениса Сергеевича «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы выполненной работы

Несмотря на продолжающиеся попытки перейти на экологически более чистые виды топлива, углеводороды, в том числе и природный газ, до сих пор остаются одним из основных источников энергии. При этом по оценкам различных исследователей отмечается, что количество природного газа в виде газовых гидратов может на порядок превышать то количество, что сейчас сосредоточено в газовых и газоконденсатных месторождениях. Также научный интерес представляет процесс повышения температуры пород в зонах «вечной мерзлоты», что приводит к разложению запасов газовых гидратов и высвобождению природного газа, хранящегося в них. С этим связывают появления в земле воронок, когда выделяющийся газ прорывается сквозь земную породу и почву. Масштабная эмиссия метана в атмосферу (парниковая активность метана значительно выше, чем у двуокиси углерода) способна привести к глобальному потеплению, что чревато дополнительной эмиссией метана, особенно из Арктики, где и так уже идет аномальное потепление.

При рассмотрении этих аспектов возникает необходимость в корректном математическом моделировании, что в совокупности с реализацией моделей с помощью современных численных методов позволяет провести теоретическую проработку данных. Полученные при таком теоретическом изучении результаты значительным образом уменьшают объем необходимых экспериментальных и промысловых данных, а также расширят наши представления о закономерностях гидродинамических и теплофизических процессов в природных пластах, сопровождающихся разложением газовых гидратов.

Из всего вышесказанного следует **актуальность и значимость** темы диссертационной работы Бельских Д.С. и ее соответствие области исследований специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника, поскольку работа посвящена изучению термогидродинамических процессов, происходящих при тепловом воздействии на пористый пласт, в начальном состоянии содержащий метан и его гидрат. Изучение данного процесса имеет, несомненно, важное научное и практическое значение.

Значимость для науки результатов диссертационного исследования, полученных автором

В качестве существенных результатов, полученных соискателем, хотелось бы отметить следующее:

1. Процесс теплового воздействия на гидратосодержащую залежь рассмотрен с учетом физико-математической модели тепломассопереноса, учитывающей дополнительные факторы, а именно: рассматривается случай реального газа, учитывается возможность фильтрации воды, а также наличие неизотермических эффектов фильтрации, такие как эффект Джоуля-Томсона и адиабатического охлаждения.

2. Построен алгоритм расчета, включающий в себя собственный метод расчета насыщенностей фаз, в основе которого лежит условие равновесия фазового перехода для гидрата метана. Процесс разложения газогидрата в пористой среде рассматривается для двух видов теплового воздействия на пористый коллектор: закачкой теплого газа в гидратосодержащий пласт и при нагреве на верхней границе пористой среды.

3. В работе на основе анализа результатов вычислительных экспериментов получено, что разложение газового гидрата в случае теплового воздействия происходит без наличия зоны, где одновременно может существовать метан, его гидрат и свободная вода.

4. При изменении параметров теплового воздействия или исходных характеристик были отмечены следующие особенности: увеличение массового расхода при закачке теплового газа не приводит к увеличению зоны разложения, учет движения воды в залежи также приводит к большей по глубине зоне разложения гидрата, отмечена достаточно малая зона разложения по отношению к размерам залежи даже при широком варьировании параметров.

Научная значимость результатов работы не подлежит сомнению, т.к. получены новые знания об особенностях протекания процесса разложения газогидратов в пласте, поры которого насыщены в начальном состоянии газом и его гидратом.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, соответствует общепринятой в рамках специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и обеспечивается адекватностью применяемой математической модели, основанной на законах сохранения механики сплошных сред, а также корректностью формулировок рассматриваемых задач. Достоверность результатов работы следует из получения решений, не противоречащих общим термодинамическим представлениям, согласования результатов расчетов с уже известными аналитическими решениями. Методы вычислительного исследования в диссертационной работе основаны на использовании достаточно хорошо зарекомендовавших себя при решении фильтрационных задач численных методов, техника проведения вычислительных экспериментов в диссертации подробно описана.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 95 страниц. Работа содержит 20 рисунков и одно приложение. Список литературы содержит 67 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость полученных в диссертационном исследовании результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту, апробация работы и информация о публикациях по теме диссертационного исследования.

В **первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных исследований зарубежных и отечественных авторов, связанных с процессом фильтрационного течения при наличии фазовых переходов в виде разложения или образования газовых гидратов. Проведен анализ свойств газовых гидратов, а также условия их стабильного

существования в природе. Рассмотрены основные способы добычи газа из природных залежей гидратов природного газа, при которых происходит изменение термодинамических условий, при которых газовые гидраты не могут существовать. В результате автором было отмечено, что наличие теплового воздействия способствует разложению газовых гидратов и может использоваться в комбинации с другими подходами для добычи газа из его гидрата. Также в главе приведен обзор, связанный с имеющимися на данный момент математическими моделями, в которых использовались как равновесный подход для расчета параметров, так и кинетический подход. Поскольку в данной диссертации рассматриваются значения времен в пять и более порядков секунд, то в работе автора было решено использовать только подход, связанный с термодинамическим равновесием.

В заключении главы были выделены основные моменты для дальнейшего построения модели, а также какие дополнительные параметры учтены для получения результатов вычислительного эксперимента по изучению режима диссоциации газового гидрата и нахождению распределения параметров в рассматриваемой области гидратосодержащего пористого пласта при наличии теплового воздействия. В частности, было решено рассматривать реальный газ, наличие неизотермических эффектов, а также двумерный случай.

Во **второй главе** приведено построение физико-математической модели для описания неизотермической фильтрации газа и воды с учетом разложения имеющихся газовых гидратов. Представлены основные допущения, записаны уравнения общей модели, которые в дальнейшем были преобразованы к необходимому виду для проведения вычислительных экспериментов.

Далее для изучения процесса теплового воздействия на гидратосодержащий пласт полученная модель, а также необходимые начальные и граничные условия были представлены для двух частных случаев: нагнетания теплого газа в пласт и нагрева верхней границы пласта.

В **третьей главе** для двумерной постановки приведен алгоритм решения задачи, с использованием развитой модели рассматриваемого процесса. В главе сразу отмечается необходимость расчета значений гидратонасыщенности для замыкания системы уравнений, с учетом условий фазового равновесия для газового гидрата. Полученные в предыдущей главе уравнения приведены к дискретному виду с помощью разностной схемы и преобразованы для расчета методом прогонки.

Изменение значений гидратонасыщенности находится из слагаемых уравнений системы, содержащих изменение этого параметра по времени.

Возможные изменения рассчитываются при текущем значении температуры и давления, а также значений температуры и давления фазового равновесия.

Отмечается, что при использовании данного алгоритма нет необходимости ставить условие о наличии фронта или протяженной зоны фазовых переходов.

Четвертая глава посвящена исследованию результатов численных экспериментов в двух задачах теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь: закачки теплого газа и нагрева верхней границы. При этом первая задача рассматривается в одномерном случае, а вторая – в двумерном.

В первую очередь была отмечена хорошая сходимость результатов, получаемых с помощью алгоритма, представленного в диссертации, и полученных ранее автомодельных решений в работах других исследователей. При этом результаты сходятся при рассмотрении идеального газа и отсутствия неизотермических эффектов. Если рассматривать реальный газ и наличие изотермических эффектов, то получаемые значения параметров могут отличить друг от друга вплоть до 8%.

При любом виде теплового воздействия было отмечено сохранение только фронтального режима разложения газового гидрата. При этом зона разложения газогидрата, где содержатся лишь свободные газ и вода, увеличивается со временем, при увеличении температуры закачиваемого газа, при меньших значениях гидратонасыщенности, большей температуре нагрева границы и больших значениях проницаемости пласта. Стоит отметить, что увеличение дебита закачиваемого газа не приводит к увеличению зоны, заполненной продуктами разложения, а, наоборот, к ее уменьшению.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные результаты исследования в работе дополняют уже имеющиеся фундаментальные знания о процессах, протекающих в гидратонасыщенном пористом пласте при тепловом воздействии. Наличие дополнительных слагаемых в развитой физико-математической модели, позволяет получить более точные результаты. Реализация математической модели произведена не только в одномерной, но и впервые в двумерной постановке.

Построенный алгоритм решения и используемый вместе с ним численный метод расчета параметров позволяют решать задачи с наличием любых областей фазовых переходов, как протяженных, так и фронтальных.

Результаты, полученные с помощью вычислительных экспериментов, позволяют оценить то, как различные исходные параметры системы и параметры теплового воздействия влияют на процесс разложения газовых гидратов. Это позволит уменьшить количество необходимых данных из экспериментов или промысловых исследований, а в дальнейшем более подробно рассмотреть случаи добычи газов из их гидратов и исследования экологических проблем, связанных с ними.

Практическая ценность диссертации обусловлена, прежде всего, важностью практических приложений, послуживших мотивацией для изучения тепловых и гидродинамических полей в пористом коллекторе. Полученные результаты с успехом могут быть использованы в учебном процессе, в частности, при изложении таких дисциплин, как «Подземная гидромеханика», «Теория фильтрации», «Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли». Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в Российском государственном университете нефти и газа им. И.М.Губкина, Уфимском государственном нефтяном техническом университете, Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институте механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Тюменском государственном университете, Башкирском государственном университете, Институте проблем нефти и газа СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и в других научно-исследовательских и образовательных учреждениях, занимающихся газогидратной проблематикой.

Замечания по диссертации

В качестве замечаний можно отметить:

1. В первой главе диссертации приведены имеющиеся математические модели и численные эксперименты по изучению в основном процесса отбора газа из гидратонасыщенных залежей. При этом освещение другой задачи, решаемой в работе, а именно тепловое воздействие (повышение температуры на верхней границе пласта) на гидратосодержащую область пористой среды с непроницаемыми границами осталось затронутой в гораздо меньшей степени.

2. При математическом моделировании разложения газогидрата в пористой среде при тепловом воздействии на пласт не используются безразмерные параметры тепломассопереноса. В частности, при оценке роли

конвективного и кондуктивного переноса тепла полезно использовать число Пекле; это позволило бы расширить результаты моделирования на большее число объектов и режимов.

3. 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 (см., например, работу Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. Теоретическое моделирование процесса извлечения газа из пористого газогидратного пласта, частично насыщенного газом, с учетом теплового взаимодействия с окружающими породами // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 4. С. 452-462). Поэтому соискателю необходимо было привести дополнительные аргументы в пользу принятия допущения о том, что через кровлю и подошву пласта не осуществляется теплообмен с окружающими породами.

Заключение

Сформулированные замечания не затрагивают сути защищаемых положений. Диссертационная работа Бельских Дениса Сергеевича выполнена на высоком научном уровне. Автореферат корректно и последовательно отражает основное содержание диссертации, результаты работы были опубликованы в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК, и представлены на научных конференциях различного уровня. В опубликованных работах достаточно полно представлены цель и задачи диссертационной работы, выполненные научные исследования. Результаты диссертационного исследования характеризуют автора как грамотного исследователя, владеющего современными методами научных исследований.

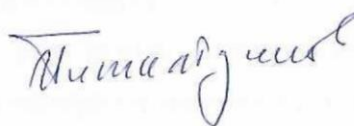
Диссертационная работа Бельских Дениса Сергеевича на тему «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата» по содержанию, оформлению, актуальности, научной новизне, научной и практической значимости, достоверности полученных результатов является законченной научно-квалификационной работой и соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Работа содержит решение научной задачи, связанной с исследованием термогидродинамических процессов, происходящих при

неизотермической фильтрации флюида в пористом пласте, изначально насыщенным метаном и его гидратом, оценку влияния различных параметров на процесс разложения гидрата метана, и имеет научное и практическое значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники, а её автор – Бельских Денис Сергеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация Бельских Дениса Сергеевича и отзыв на диссертацию обсуждены на расширенном заседании кафедры физики ФГБОУ ВО «УГНТУ», протокол № 8 от 6.05 2022 г.

Отзыв подготовили:

Заведующий кафедрой физики
ФГБОУ ВО УГНТУ, д.ф.-м.н.
по специальности 01.02.05 –
механика жидкости, газа и
плазмы, профессор, член-
корреспондент АН РБ



Гималтдинов
Ильяс Кадирович

Доцент кафедры физики
ФГБОУ ВО УГНТУ, к.ф.-м.н.
по специальности 01.02.05 –
механика жидкости, газа и
плазмы



Столповский
Максим
Владимирович

«6» 05 2022 г.

Адрес:

450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Тел. +7 (347) 242-03-70

E-mail: info@rusoil.net

Подпись д.ф.-м.н., проф. Гималтдинова И.К.

и к.ф.-м.н. Столповского М.В. заверяю:

Начальник ОРП



О.А. Дадаян