

Вх. №28/22
от 23.05.22

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Бельских Дениса Сергеевича
«Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь
с учетом разложения газового гидрата»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

На сегодняшний день газовые гидраты рассматриваются в мире как перспективный нетрадиционный источник углеводородного сырья и представляют огромный интерес, поскольку количество природного газа, содержащегося в газогидратных залежах, на порядок превышает то количество, имеющееся в традиционных газовых и газоконденсатных месторождениях. При этом проблема выявления и освоения газогидратных скоплений остается недостаточно изученной.

Отмечается, что при повышении температуры горных пород в районах распространения многолетней мерзлоты возможны появления в Земле воронок (или кратеров), когда из-за разложения гидратов выделяющийся из них газ прорывается сквозь земную породу и почву. Природные газовые гидраты очень чувствительны к любому виду техногенного воздействия, например, в процессе бурения и эксплуатации добывающих скважин, что может привести к их разложению и, как следствие, к активному газовыделению. Такие выбросы природного газа, особенно метана, имеющего большой парниковый эффект, еще больше усугубят текущую ситуацию по изменению климата Земли.

При рассмотрении этих аспектов возникает необходимость в корректном математическом моделировании, что в совокупности с различными численными методами и алгоритмами позволяет провести теоретическую проработку изучаемого процесса. При этом созданные на их основе программные продукты могут существенно сократить объем промысловых и экспериментальных работ для изучения процессов, связанных с разложением газовых гидратов.

Все вышеизложенное свидетельствует об **актуальности** выбранной темы диссертационной работы Д.С. Бельских.

Научная новизна работы заключается в обобщении физико-математической модели, ранее используемой в работах других авторов, с учетом некоторых дополнительных факторов: случая реального газа, наличия неизотермических эффектов при фильтрации газа и воды, при этом модель впервые рассматривается в двумерном приближении. По результатам численного эксперимента в работе были установлены

некоторые особенности разложения гидрата метана в пласте. Разложение газовых гидратов рассмотрено на примере двух видов теплового воздействия: закачки теплого газа в гидратонасыщенный пласт и нагрева его верхней границы.

Результаты проведенных численных экспериментов необходимы для понимания процесса разложения газовых гидратов при тепловом воздействии с учетом дополнительных факторов, что и говорит о научной значимости результатов.

Практическая значимость выполненной работы состоит в том, что полученные результаты исследования с учетом дополнительных слагаемых в математической модели позволяют получить более точные результаты и дополняют уже имеющиеся фундаментальные и теоретические знания о процессах, протекающих при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт. Представленный вычислительный алгоритм можно использовать для решения задач Стефана с протяженной и фронтальной областями фазовых переходов. Результаты, полученные в численных экспериментах, позволяют оценить влияние различных параметров теплового воздействия на процесс разложения газовых гидратов в гидратонасыщенном пласте.

Результаты исследований описывают природные явления и существенны для понимания их особенностей, т.е. служат ориентирами, позволяющими правильно выбрать рациональные схемы освоения газогидратных месторождений, а главное, выбрать наиболее рациональные методы геофизического изучения этих скоплений в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Дадим краткую характеристику основных результатов диссертации, где в той или иной мере были отражены основные элементы численного моделирования: математические модели физических процессов, вычислительные алгоритмы и реализующие их программы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 95 страницах текста, включая 20 рисунков и одно приложение. Библиография содержит 67 наименований, в том числе 43 источника из зарубежной литературы.

Во **введении** содержится обоснование актуальности темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, указываются научная новизна и практическая ценность работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится обзор научной литературы по теме диссертации. Здесь представлен анализ свойств газовых гидратов и условий их стабильного существования. При рассмотрении основных способов добычи газа из газогидратных залежей соискателем отмечается, что тепловое воздействие на пласт совместно с другими способами

эффективно для разложения газовых гидратов. Из обзора имеющихся на данный момент математических моделей разложения газогидрата в пористой среде сделан вывод, что в данной диссертации можно использовать подход, связанный с условием термодинамического равновесия. В заключении главы отмечено, что для получения более точных результатов расчета положения фронта разложения газовых гидратов в модели будут учтены свойства реального газа, неизотермические эффекты фильтрации газа и воды.

Во **второй главе** приведено построение физико-математической модели для описания неизотермической фильтрации газа и воды с учетом образования/разложения газовых гидратов. Для изучения процесса теплового воздействия на гидратосодержащий пласт разработанная модель, а также необходимые начальные и граничные условия с учетом некоторых допущений рассматриваются для двух частных случаев: нагнетания теплого газа в газогидратную залежь (одномерный плоскорадиальный случай) и нагрева верхней границы гидратонасыщенного пласта (двумерный плоскопараллельный случай).

В **третьей главе** представлен алгоритм численной реализации модели, где полученные в предыдущей главе уравнения приводятся к дискретному аналогу с помощью разностной схемы и преобразовываются для расчета необходимыми численными методами. Возможные изменения значений гидратонасыщенности рассчитываются при текущем значении температуры и давления, а также при значениях температуры и давления фазового равновесия. При использовании алгоритма нет необходимости ставить условие о наличии фронта фазовых переходов.

Четвертая глава посвящена анализу результатов вычислительных экспериментов для двух задач теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь: закачки теплого газа и нагрева верхней границы пласта. Соискателем выявлена хорошая сходимость результатов, получаемых с помощью алгоритма, описанного в третьей главе диссертации, и полученных ранее автомодельных решений в диссертационной работе Хасанова М.К.

В серии вычислительных экспериментов изучалась зависимость решений от параметров математических моделей и от начальных и граничных условий. При тепловом воздействии отмечено сохранение только фронтального режима разложения газового гидрата. Зона с продуктами разложения газогидрата увеличивается со временем при увеличении температуры закачиваемого газа, при меньших значениях гидратонасыщенности, при больших значениях температуры нагрева верхней границы и проницаемости пласта, и не изменяется при повышении дебита закачиваемого газа.

Основные выводы обобщены в **заключении** диссертации.

Однако работа не лишена некоторых недочетов и упущений.

1. Название темы диссертации следовало бы сформулировать таким образом: «Численное исследование разложения газовых гидратов при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь». Тем самым показать, что соискатель претендует на присуждение ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

2. Формулировки защищаемых положений не имеют достаточной четкости. Первое положение начинается со слова «развитая» – более литературный, чем научный термин. Вероятно, речь идет об обобщении или модификации существующих математических моделей разложения газовых гидратов при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт? И в третьем положении неудачно использован термин «насыщающий флюид», под которым можно понять любую систему в зависимости от числа фаз (газовой, гидратной и водной).

3. На стр. 13 приведены два значения стандартной энтальпии разложения гидрата метана. Возможно, что последнее значение относится к случаю разложения гидрата на газ и воду. Какой температуре соответствуют эти значения энтальпии?

4. Непонятно, о какой работе идет речь, т.к. здесь отсутствует ссылка на литературу (абзац 2 на стр. 13). В конце этого абзаца встречается неудачное выражение «... процесс массопередачи». Также в нескольких местах по тексту диссертации имеются неправильные словосочетания про «вечную мерзлоту», выражения «... не закончатся все фазы образователи гидрата». На стр. 15 не приведена ссылка на источник, в котором написано «... некоторые компании в Мексиканском заливе тратят по 1 миллиону долларов на каждый километр газопровода».

5. Последнее предложение на стр. 27 «Модель учитывает движение воды в модели, но при распространении температуры учитывается только теплопроводность» – несогласованное. В его первой части слово «в модели» явно лишнее, а во второй части должно быть распространение тепла, а не температуры. Также в последнем абзаце на стр. 29 в модели динамической газогидратной системы «компоненты» перепутаны с «элементами». В симуляторе Сан и Моханти пропущено описание пятой фазы (стр. 30).

6. В коэффициенте сверхсжимаемости (2.16) уравнения состояния природных газов эмпирическое число в формуле Латонова-Гуревича равно 0.17376, а не 0.4. Так, в работе [Аргунова К.К. Бондарев Э.А., Рожин И.И. Свойства реального газа и их аналитическое представление // Газохимия, 2010. – №6(16). – С. 52-54] показано, что результаты расчетов по этой формуле хорошо соответствуют экспериментальным данным для метана и природного газа.

7. Почему в вычислительном алгоритме при решении разностных уравнений (3.1) и (3.2) двумерной задачи для определения давления и температуры методом прогонки на одном временном шаге несколько раз меняются шаги по времени? Прочитав текст из рукописи «1. Расчет давления... Далее методом прогонки по оси y находим значения давления в узлах пространственной сетки на новом шаге по времени... 3. Расчет температуры ... Методом прогонки по оси x вычисляются промежуточные значения температуры в узлах пространственной сетки на новом временном шаге... Далее методом прогонки по оси y находим значения температуры в узлах пространственной сетки на новом шаге по времени». Если применяется продольно-поперечная схема или схема переменных направлений по координатам, то проведено ли исследование на устойчивость и сходимости экономичной разностной схемы?

8. Для какого газа используется корреляция равновесных условий образования/разложения газогидрата, приведенная на стр. 65 рукописи (еще см. уравнение (8) в автореферате) – для метана или углекислого газа?

9. В численных расчетах коэффициент теплопроводности гидрата принят равным $4 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К) и 0.45 Вт/(м·К) (см. стр. 67 и 76). Это очень маленькая величина, т.к. при температуре 263 К и давлении 7 МПа коэффициент теплопроводности гидрата метана составляет в среднем 2.07 Вт/(м·К) [Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. – Новосибирск: Наука, 1985].

10. 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, здесь ошибка в вычислительном алгоритме, где распределения температуры и давления вычисляются независимо друг от друга. Следовало бы 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).

11. В предложенной математической модели разложения газогидрата при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь не учитываются изменение фильтрационно-емкостных свойств горных пород, состав и тип минерализации пластовых вод. Также в работе не обсуждается расположение гидратной частицы в поровом пространстве. Она может перекрывать какую-то поровую часть, может располагаться на его стенке, частично перекрывая течение в этом канале.

Отмеченные недостатки носят в основном рекомендательный характер и существенно не влияют на общую положительную оценку работы, а также ориентированы на дальнейшее развитие исследований в этом направлении.

Заключение. Считаю, что диссертация Д.С. Бельских является завершённой научно-квалификационной работой, результаты которой основаны на численном моделировании процесса разложения газовых гидратов при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь. Проведенные исследования имеют большое значение для развития науки и практики в соответствующей области. Научная новизна полученных результатов, обоснованность и достоверность сформулированных защищаемых положений обеспечены необходимой теоретической проработкой исследуемых проблем тепломассопереноса, использованием апробированных вычислительных алгоритмов и соответствием расчетных данных результатам автомодельных решений.

Область диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (физико-математические науки): «1. Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах».

В диссертации Д.С. Бельских даны новые решения задач тепломассопереноса в пластовой системе с учётом разложения газовых гидратов методами математического моделирования. Представленный в диссертации комплекс научных результатов является существенным вкладом в математическое моделирование природных явлений и технологических процессов.

Результаты диссертационной работы отражены в 16 научных работах, которые позволяют считать, что научная общественность имеет полную возможность оценить достижения соискателя. Основные из них опубликованы в 2 рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, и в 6 изданиях, индексируемых в международных базах научного цитирования Web of Science и Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Тем самым требования к публикациям, предусмотренные пунктами 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней», соблюдены. Материалы диссертации прошли апробацию на 4 международных и всероссийских научно-практических конференциях.

Автореферат диссертации дает достаточно полное представление о её содержании. Работа структурирована, отвечает поставленным задачам исследования, представленные материалы непротиворечивы, графическое оформление работы в достаточно полной мере

раскрывает полученные результаты. Заимствованные материалы других авторов, использованные в диссертации, содержат ссылку на источник. При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных автором лично и (или) в соавторстве, соискатель отметил это обстоятельство, что соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (пункт 14).

Оценивая диссертационную работу Бельских Дениса Сергеевича «Процесс теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь с учетом разложения газового гидрата» считаю, что работа полностью соответствует всем критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» (пункт 9), утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Я, Рожин Игорь Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории техногенных газовых гидратов ИПНГ СО РАН, ЯНЦ СО РАН, доктор технических наук (01.04.14), кандидат физико-математических наук (05.13.18), доцент

 Рожин Игорь Иванович

Отзыв составлен «18» мая 2022 г.

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской Академии наук» (ЯНЦ СО РАН), Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской Академии наук (ИПНГ СО РАН)

ул. Петровского, 2, г. Якутск, 677980

Телефон/факс: (4112) 390620, (4112) 390627

E-mail: ipog@ipng.ysn.ru; сайт: <http://www.ipng.ysn.ru>

Подпись д.т.н. Рожина Игоря Ивановича заверяю:

ученый секретарь ИПНГ СО РАН,
кандидат технических наук





Будугаева Валентина Афанасьевна