

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИССОЦИИИ ГАЗОГИДРАТОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ В ОДНОМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Ю.А. Повещенко^{1,2}, В.О. Подрыга^{1,3}, И.В. Попов^{1,2},
С.Б. Попов¹, П.И. Рагимли¹, Г.И. Казакевич⁴

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
г. Москва, 125047, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
г. Москва, 115409, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет, г. Москва, 125319, Россия

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, 117997, Россия

Аннотация

В работе рассмотрены некоторые характерные задачи диссоциации газовых гидратов в пористой среде, которые в первом приближении можно свести к одномерным. К таким задачам относятся исследование взаимного влияния изменения климата и состояния подземных газовых гидратов, а также ряд важных технологических и экологических задач о течении флюидов в окрестности скважины или тектонического разлома при наличии гидратосодержащих пластов. Для данного класса задач разработаны новые консервативные разностные схемы. Они базируются на расщеплении газогидродинамических процессов. Преимуществом данных схем является поэтапное решение параболических и гиперболических уравнений. Такой подход существенно упрощает процедуру решения и одновременно повышает его устойчивость. Подчеркнем, что в рамках подхода предложен алгоритм совместного решения систем уравнений, описывающих процессы в различных областях, характеризующихся собственным набором сосуществующих фаз. Согласование вычислительных схем для них не является тривиальным и автоматическим процессом. Проведены численные расчеты, использующие единую математическую модель для совместного описания газогидратной зоны и зоны с отсутствием газовых гидратов. Результаты расчетов показали применимость разработанных методов к решению подобных задач.

Ключевые слова: газовые гидраты, фильтрация, математическое моделирование

Введение

Газовые гидраты – это твердые, похожие на лед вещества, представляющие собой клатратные соединения газа и воды, образующиеся в условиях низких температур при повышенном давлении. При определенных условиях происходит диссоциация (разложение) газогидрата на газ и воду. Это фазовый переход, происходящий с поглощением большого количества теплоты и сопровождающийся совокупностью сложных физико-химических явлений, причем переход газа в газообразное состояние происходит почти мгновенно, минуя жидкую фазу, с выделением огромного объема газа: один объем «ледяного газа» превращается в 160–180 объемов газа. Разложение гидрата в замкнутом объеме либо в пористой среде (естественные условия) приводит к значительному повышению давления. Диссоциация газового гидрата

может быть обусловлена повышением температуры, снижением давления, закачкой ингибиторов, воздействием высокочастотным электромагнитным излучением и другими механизмами.

Преобладающими природными газовыми гидратами являются гидраты метана и диоксида углерода. Как показали исследования [1], такие соединения широко представлены в природе. Зона стабильности гидратов метана, наиболее распространенного в земной коре углеводородного газа, покрывает до 20% суши (в районах распространения криолитозоны) и до 90% дна океанов и морей. В пластах горных пород гидраты могут как быть распределенными в виде микроскопических включений, так и образовывать крупные залежи, вплоть до протяженных пластов многометровой толщины. Объемы природных залежей газовых гидратов крайне велики [1–5]: в пересчете на традиционные виды топлива запасы газогидратов более чем вдвое превышают количество нефти, угля и газа вместе взятых. Область существования гидратов приурочена к морским донным осадкам и к областям многолетней мерзлоты. Условия для образования газогидратов имеются в арктических широтах [6], что делает изучение процессов, связанных с гидратами, особенно актуальным для России.

Имеется обширный список вопросов, требующих глубокого изучения гидратов. Сюда входит разработка соответствующих технологий по извлечению углеводородов из газогидратных залежей, исследование перспектив хранения газа в виде гидратов в подземных хранилищах в условиях вечной мерзлоты [7], изучение ряда технологических проблем, связанных с гидратами. Например, при добыче и транспортировке газа в определенных условиях могут образовываться гидраты в стволах скважин, промышленных коммуникациях и магистральных газопроводах. Отлагаясь на стенках труб, гидраты резко уменьшают их пропускную способность. Для борьбы с этим явлением в настоящий момент разработан и используется ряд мер (ввод в скважины и трубопроводы различных ингибиторов, подогрев газа, теплоизоляция трубопроводов, газоосушка – очистка газа от паров воды в газопроводах).

Весьма актуальным является изучение газовых гидратов в пористой подземной среде, представляющее значительный интерес как в целях исследования потенциальных альтернативных источников углеводородов, так и в связи с анализом и предотвращением возможных экологических и технологических катастроф. Например, одной из опасностей, возникающих при освоении и разработке месторождений углеводородов в северных районах, является возможный внезапный выброс газа [1, 8]. Подобного рода выбросы могут быть связаны с разложением газовых гидратов в результате теплового воздействия при бурении и эксплуатации скважин и приводить к авариям, а также, особенно в случае морских месторождений, к тяжелым экологическим последствиям. Как показывают аналитические оценки [8], при недостаточной теплоизоляции скважины, проходящей в гидратосодержащей зоне, вокруг нее может происходить диссоциация газовых гидратов, сопровождающаяся повышением давления, способным приводить к разрушению скважины и выбросам газа [8, 9].

Заметим, что экологические проблемы, связанные с гидратами, заметно обострились за последнее время в связи с наблюдаемым глобальным потеплением климата, которое особенно интенсивно происходит в арктических широтах. При этом имеет место процесс взаимного влияния изменений климата и состояния газовых гидратов в зоне вечной мерзлоты и на шельфе арктических морей [2]. Отметим, в частности, проблему высвобождения метана из метангидратов и его выбросов в атмосферу из-за таяния вечной мерзлоты на Крайнем Севере. В ряде работ именно со взрывообразным выделением газа из подземных газогидратов связывают образование на Ямале и в Красноярском крае гигантских воронок-кратеров [6].

Еще один класс задач, где востребованы подобного рода исследования, – это проблемы, связанные с выходом газа на поверхность. В настоящее время наблюдаются значительные газовыделения на шельфе арктических морей, особенно в зонах разломов, проявляющиеся, в частности, в виде газовых факелов (фонтанов пузырьков газа) с диаметрами, достигающими до 1000 м, что многие авторы объясняют разложением газовых гидратов [10]. Все эти процессы могут существенно влиять на экологию в северных регионах и создавать опасные ситуации в процессе человеческой деятельности. Повышение температуры окружающей среды в районе тектонических разломов также может приводить к диссоциации подземных газогидратов, так как температурные изменения на поверхности Земли передаются вглубь путем теплопередачи и переноса тепла мигрирующими подземными флюидами, причем значительная доля такой миграции связана с разломами земной коры. В результате происходит истечение газов из разломов в атмосферу, что, как известно, приводит к парниковому эффекту [10], ускоряющему процесс глобального потепления климата.

Отмеченные природные и технологические проблемы требуют детальных исследований процессов образования/диссоциации гидратов, которые в настоящее время изучены недостаточно для уверенных заключений. Заметим, например, что возможным фактором, снижающим экологические опасности, может служить явление самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах, связанное с образованием водяного льда. Кроме того, есть гипотетическая возможность формирования непроницаемого слоя при диссоциации гидратов в пористой среде [11], которая может значительно замедлить распад газогидратов. Поведение гидратов в пористых средах связано с процессами фильтрации воды и газа с учетом образования/диссоциации газовых гидратов. В основе комплексного анализа этих процессов лежит математическое моделирование газогидродинамических процессов, происходящих при диссоциации газовых гидратов в пористой среде, расчет полей давления, водо- и гидратонасыщенности, определение условий, при которых могут происходить нежелательные явления. Полное исследование должно включать в себя совместное изучение теплопередачи, флюидодинамики и напряженно-деформированного состояния пород в изучаемой области. Для понимания степени влияния каждого из этих факторов на общее протекание процесса, необходимо изучить каждый из них в отдельности.

Математическое моделирование подземных газовых гидратов имеет давнюю историю и осуществляется в разных направлениях. Укажем одно из направлений по конструированию математических моделей рассматриваемых явлений – кинетические модели диссоциации гидрата, – на основе уравнения Кима и Бишной [12], связывающего количество выделившегося газа из гидратов с изменением термодинамических параметров – давления и температуры. Задача о разложении гидрата в этом случае сводится к классической системе уравнений фильтрации с дополнительными источниками массы в правой части [13]. Так как численные методы решения такой системы хорошо известны [14], эта модель получила широкое распространение [15–17].

В настоящей работе моделирование процессов диссоциации гидратов в пористой среде осуществляется на основе классических уравнений механики сплошной среды, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии флюидов (вода и газ) в поровом пространстве с учетом фазового перехода при диссоциации гидратов [18]. При этом предполагается, что рассматриваемые времена значительно превышают характерное время разложения гидратов и справедливо приближение о равновесном характере процесса диссоциации газовых гидратов. Равновесный характер диссоциации отвечает зоне стабильности гидратов, в которой давление и температура связаны хорошо изученными зависимостями, $T = T_{\text{dis}}(P)$,

для которых имеются аппроксимации [19]. Заметим, что существуют также зоны метастабильного состояния, свойства гидратов в которых отличаются от свойств в зоне стабильности. Для исследования метастабильного состояния необходимо принимать во внимание эффект самоконсервации газовых гидратов и ряд других особенностей [20, 21], например образование водяного льда при диссоциации газового гидрата в области низких температур вследствие замерзания выделившейся воды. В зоне реликтовых метастабильных гидратов вопрос об определении зависимости температуры от давления привлекает внимание специалистов [22].

Для сравнения различных флюидодинамических моделей с газогидратными включениями на базе The National Energy Technology Laboratory и The U.S. Geological Survey (США) проводятся международные исследования [23]. Постоянно возникают новые методы и вычислительные симуляторы, например, в Германии – SUGAR на основе PetroMod [24], в Норвегии – RetrasoCodeBright (RCB) [25]. Заметим, что в опубликованных работах отсутствует подробное описание методики совместного решения уравнений в наиболее интересном и важном случае трансфазности, когда имеются соседствующие подобласти с различными фазовыми состояниями (например, в одной подобласти – талая зона без гидрата, а в соседней имеется гидрат), причем согласование вычислительных схем для таких подобластей не выполняется автоматически. В связи с этим разработка отечественного математического и программного обеспечения для решения подобных задач является актуальной задачей.

Расчет сложных процессов, связанных с разложением газовых гидратов в пористой среде, вообще говоря, подразумевает двух- и трехмерное моделирование. Для этого можно использовать, например, метод опорных операторов, применение которого к задачам фильтрации было начато в работе [26]. Этот численный метод, основанный на применении нерегулярных сеток, позволяет аппроксимировать регионы сложного геологического и литологического строения, учитывать в рамках одной разностной схемы разномасштабность неоднородностей – от приквальной зоны до размеров пласта и даже региона. Проведено его расширение на случай фильтрационных процессов, включающих газогидраты в равновесном состоянии [27]. В соответствии с предлагаемым алгоритмом расщепления системы уравнений по физическим процессам как в талой зоне, так и в среде с газогидратными включениями, построено совместное семейство двухслойных полностью консервативных разностных схем метода опорных операторов с профилированными по пространству временными весами.

1. Одномерные постановки

Заметим, что построение многомерных моделей требует очень большой геологической и геофизической информации, получение которой, особенно в труднодоступных северных регионах или шельфовой зоне, является сложным, затратным, а порой и невозможным делом. Конструируемая модель получается, как правило, неточной, со значительными погрешностями. Получаемые на ее основе результаты расчетов труднообозримы, за деталями сложно увидеть основные, определяющие характеристики процесса. При этом для выяснения степени влияния отдельных параметров модели и возможной оптимизации по управляющим технологическим параметрам (последнее – для технологических задач), требуется большое число расчетов. В результате получение итоговых выводов трудоемко, неточно и может потребовать значительного времени и вычислительных ресурсов.

Таким образом, в ряде случаев будет более предпочтительным исследование интересных процессов на одномерных моделях, которые требуют значительно

меньшего объема исходной информации, а их реализация осуществляется намного легче и быстрее. Кроме того, существует ряд задач, одномерных по существу. Например, понижение размерности модели уместно, если один из пространственных масштабов значительно больше других (например, случай тонкого пласта). Одномерные постановки полезны не только сами по себе, но и как первое приближение для более сложных, многомерных постановок. На их основе можно исследовать влияние изменений температуры или давления на состояние гидрата, оценить интенсивность возникающих при разложении гидрата выделений газа, выяснить влияние различных механизмов и явлений на этот процесс. Математическое моделирование одномерных задач может быть также полезным для анализа результатов экспериментов.

Для исследования некоторых одномерных задач, связанных с разложением газовых гидратов в пористой среде, в ряде работ используют приведение к автомодельному виду [28, 29] путем введения упрощающих предположений. В результате выбора соответствующих переменных система уравнений в частных производных преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений и исследуется аналитически и численно. Подобный подход используется в [9, 28, 30–39] для решения ряда задач; в некоторых работах задача разложения гидрата рассматривается аналогично классической задаче Стефана с резким фронтом разложения [31, 32]. В [33] показано, что для термодинамически непротиворечивой постановки задачи от предположения, что диссоциация гидрата происходит в узкой зоне подвижной границы, следует перейти к рассмотрению области объемных фазовых переходов; задача разложения гидратов в пористой среде изучалась на основе совместного решения уравнения фильтрации газа и теплопереноса, однако не учитывались движение воды и влияние газа на изменение температуры. В [37] исследуется инъекция жидкой углекислоты в истощенное месторождение природного газа с образованием гидрата CO_2 и вытеснением метана, найдено асимптотическое решение задачи в одномерном приближении. В [9, 38, 39] автомодельные решения используются для исследования влияния теплового воздействия скважины на газогидратную область, причем в [9] процесс изучен без учета фильтрации. Аналогичного подхода (без достаточного учета движения флюидов и влияния газа на изменение температуры) в исследованиях декомпозиции гидрата в пористой среде придерживаются и зарубежные авторы [40–42].

Автомодельные решения позволяют подробно и глубоко изучить некоторые модельные задачи, которые во многих случаях имеют и прямое практическое значение, например, для анализа работы скважин, однако при этом сильно сужается круг задач, так как пренебрегается многими важными факторами. Поэтому для расчета более сложных постановок задач (в том числе одномерных), учитывающих основные факторы, необходимо применение численных методов. Такие расчеты проводились в ряде работ ([7, 43] и др.). При этом автомодельные решения можно использовать для тестирования численных методов.

Ниже перечислен ряд важных характерных задач, связанных с диссоциацией гидратов в поровой среде, которые сводятся практически к одномерным задачам. Это задачи, касающиеся тектонических разломов либо скважин в зонах с гидратами.

1.1. Задачи с исследованием выхода газа на поверхность. Интерес к таким задачам вызван тем, что в настоящее время наблюдаются значительные газовыделения на шельфе арктических морей, особенно в зонах разломов, проявляющиеся, в частности, в виде газовых факелов (фонтанов пузырьков газа) с диаметрами, достигающими до 1000 м [10], что многие авторы объясняют разложением газовых гидратов.

1.1.1. Оценка интенсивности выбросов газа при диссоциации подземных гидратов из-за постепенного потепления. Задача состоит в исследовании выбросов газа, связанных с диссоциацией подземных гидратов в крупномасштабном процессе, например, при постепенном прогревании большой суши или моря. Предполагается, что температура меняется только по глубине, локальными неоднородностями пренебрегаем. Интенсивность локальных выбросов газа усредняется по площади. Для оценки можно использовать следующую 1D-постановку: плоскостная модель подземной среды с горизонтальными границами слоев и свойствами, меняющимися только по вертикали. В результате имеем одномерную вертикальную задачу о диссоциации газового гидрата в пористой среде. Выделяющийся газ будет двигаться вверх и давить на вышележащие пласты. В зависимости от их свойств и возникающих давлений он может постепенно просачиваться по трещинам в атмосферу, может пробивать плохо проницаемые участки чисто гидродинамическим способом, аналогично тому, как это происходит при автоколебательных режимах образования месторождений углеводородов [19, 44], а также может прорывать вышележащие толщи, вызывая катастрофические выбросы.

1.1.2. Изучение выделений газа из гидратов в окрестности разломов. Рассматривается однородный горизонтальный пласт, содержащий гидраты и ограниченный с одной стороны вертикальным разломом, по которому может осуществляться миграция флюидов. С потоком флюидов переносится тепло, поэтому значения температуры и давления внутри разлома отличаются от пластовых значений. В результате могут возникнуть условия для диссоциации гидрата в окрестности разлома, а выделяющийся при этом газ по разлому будет двигаться вверх. Задача в рамках пласта сводится к одномерной горизонтальной с граничным условием, отвечающим разлому на одной из границ одномерной области. Задачи подобного рода могут отвечать, например, структуре наблюдающихся областей дегазации в ряде морей. Как показано в работе [46], значительные области выделения газа на морском дне, содержащие большое количество газовых факелов, соответствуют линеаментам – протяженным геотектоническим зонам различного масштаба, а также их сочленениям.

В настоящей задаче можно рассмотреть два варианта: когда на разломе задано повышенное значение температуры и когда задано пониженное по сравнению с пластовым значение давления (задача с депрессией). Ниже рассмотрено численное решение для последнего случая.

Путем сравнения решений задач 1.1.1 и 1.1.2 при типичных значениях параметров можно оценить, какой вклад в общую диссоциацию газовых гидратов вносит теплопередача через разлом, а какой – через толщу вышележащих пород. При этом следует учесть анизотропию проницаемости, связанную с жильным строением гидратосодержащих пластов, в которых гидратосодержащие и вообще высокопроницаемые пропластки обычно направлены горизонтально, что делает горизонтальную проницаемость значительно выше вертикальной.

1.2. Задачи, связанные со скважинами. Работа скважин, проходящих в зоне, содержащей гидраты, может вызывать разложение (или образование) гидратов в прискважинной области, что чревато нарушением работы скважин, вплоть до их разрушения. В первом приближении задачу о воздействии скважины на газовый гидрат можно рассматривать как одномерную осесимметричную (в радиальной геометрии с центром на оси скважины), соответствующую недеформируемой пористой среде, без учета вертикальных перетоков, с соблюдением закона Дарси [14].

1.2.1. Тепловое воздействие скважины на пласт с газовым гидратом. Рассмотрим скважину, проходящую через зону, содержащую газы гидраты в равновесных условиях. Как уже говорилось выше, при недостаточной теплоизоляции скважины вокруг нее может происходить диссоциация газовых гидратов, способная вызвать повышение пластового давления, выбросы газа и разрушение скважины [8–9, 39]. При рассмотрении одномерной постановки в качестве граничных условий на стенке ствола скважины могут выбираться как условия непроницаемости для флюидов, так и условия с возможностью протекания сквозь нее [8].

1.2.2. Диссоциация гидратов в прискважинной зоне добывающей скважины. При работе добывающей скважины давление в ее стволе меньше пластового, и могут возникнуть условия для диссоциации гидратов. Данная задача в первом приближении может быть рассмотрена в одномерной постановке в радиальной геометрии аналогично задаче 1.1.2 в декартовых координатах с заданным пониженным значением давления на разломе.

1.2.3. Образование гидратов при инжекции. При нагнетании холодной жидкой углекислоты в истощенное месторождение природного газа может образовываться гидрат углекислого газа. Как уже отмечалось выше, в [37] получено асимптотическое решение такой задачи в одномерной постановке. Более полное исследование возможно только в рамках численного расчета, причем в первом приближении может быть рассмотрена одномерная модель в радиальной геометрии.

2. Математическая формулировка

В настоящей работе, как уже указывалось выше, математическое моделирование подземной флюидодинамики проводится на основе системы уравнений [47–49], в которой учтены основные законы сохранения и физические особенности процесса квазиравновесной многофазной фильтрации при наличии газогидратных включений. Использование предположения о термодинамически равновесном характере процесса соответствует масштабу времен, типичному для разработки месторождений.

Область фильтрации естественным образом делится на две зоны: трехфазную, в которой присутствуют газ, вода и гидрат, и двухфазную (талую) – с отсутствием газогидратов. Системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение флюидов, в каждой зоне свои, и для единого описания всей области фильтрации необходимо произвести спивку решений систем уравнений газогидратной флюидодинамики для всех зон фазовой плоскости (P, T) в рамках единой вычислительной схемы.

В предлагаемом подходе в трехфазной зоне исходная система уравнений путем расщепления по физическим процессам преобразуется в двухблочную систему [50], описывающую многокомпонентное течение в пористой среде с учетом диссоциации газовых гидратов. Модель включает в себя блок с системой гиперболических уравнений относительно водо- и гидратонасыщенности (растепленности) на фоне фиксированного поля давлений, и блок, содержащий уравнение пьезопроводности для давления в пласте с газогидратными включениями на фоне фиксированных насыщенныхностей. Аналогичное расщепление используется и в талой зоне, в которой имеем блок гиперболического уравнения для водонасыщенности и диссипативный блок параболического уравнения для давления на фоне фиксированной температуры и водонасыщенности. По температуре здесь имеем уравнение смешанного типа: гиперболическая часть, связанная с конвективным переносом, и параболическая, отвечающая теплопроводности.

Линия фазового равновесия (1) приведена на рис. 1 (справа). Она разбивает всю интересующую нас область на две двухфазные и трехфазную зоны:

I – гидратная зона, – двухфазная зона, в которой находятся метан – гидрат в воде и газ (зона «Метангидрат в воде»), здесь наблюдается максимальная гидратонасыщенность, $\nu = \nu_{\max}$;

II – безгидратная («талая») зона, – двухфазная зона, в которой находятся метан – газ и жидкая вода (зона «Метан-газ в воде»), здесь гидратонасыщенность отсутствует, $\nu = 0$;

III – граница зон I и II, являющаяся линией термодинамического равновесия, $T = T_{\text{dis}}(P)$, – трехфазная зона (газ, вода и гидрат), здесь $0 < \nu < \nu_{\max}$.

Математическая модель включает в себя законы сохранения массы, импульса и энергии компонент с учетом различных механизмов и явлений: диффузионный и конвективный теплоперенос, растепление газового гидрата, многофазную фильтрацию его компонентов, скачки удельного объема, массы и внутренней энергии при фазовом превращении и др. В результате имеем следующие уравнения.

Уравнения баланса массы воды и газа с учетом гидрата (уравнения переноса флюидов с источниками массы) и уравнение сохранения энергии записываются в следующем единообразном виде:

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + \text{div}(\rho_w \mathbf{V}_w) + q_w = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial F_g}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \mathbf{V}_g) + q_g = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \text{div}[\rho_w \varepsilon_w \mathbf{V}_w + \rho_g \varepsilon_g \mathbf{V}_g + P(\mathbf{V}_w + \mathbf{V}_g)] + \text{div} \mathbf{W} + q_\varepsilon = 0, \quad (4)$$

где F_w , F_g , E – массы рассматриваемых компонент (воды и газа) и полная тепловая энергия системы флюидов и порового скелета, зависящие от давления, температуры, водонасыщенности и растепленности, \mathbf{W} – диффузионный поток тепла. В трехфазной зоне III имеем

$$\begin{aligned} F_w &= F_w(P, T = T_{\text{dis}}(P), S_w, S_\nu) = m[S_\nu S_w \rho_w + (1 - S_\nu) \rho_w \beta_w], \\ F_g &= F_g(P, T = T_{\text{dis}}(P), S_w, S_\nu) = \\ &= m[S_\nu(1 - S_w) \rho_g + (1 - S_\nu) \rho_w(1 - \beta_w)], \\ E &= E(P, T = T_{\text{dis}}(P), S_w, S_\nu) = \\ &= m[S_\nu(S_w \rho_w \varepsilon_w + (1 - S_w) \rho_g \varepsilon_g) + (1 - S_\nu) \rho_w \varepsilon_w] + (1 - m) \rho_s \varepsilon_s, \\ \mathbf{W} &= \mathbf{W}(P, T = T_{\text{dis}}(P), S_w, S_\nu) = \\ &= -\{m[S_\nu(S_w \lambda_w + (1 - S_w) \lambda_g) + (1 - S_\nu) \lambda_w] + (1 - m) \lambda_s\} \nabla T. \end{aligned} \quad (5)$$

В двухфазной (талой) зоне II:

$$\begin{aligned} F_w &= F_w(P, T, S_w, S_\nu = 1) = m S_w \rho_w, \\ F_g &= F_g(P, T, S_w, S_\nu = 1) = m(1 - S_w) \rho_g, \\ E &= E(P, T, S_w, S_\nu = 1) = \\ &= m[S_w \rho_w \varepsilon_w + (1 - S_w) \rho_g \varepsilon_g] + (1 - m) \rho_s \varepsilon_s = \\ &= T\{m[S_w \rho_w c_w + (1 - S_w) \rho_g c_g] + (1 - m) \rho_s c_s\}, \\ \mathbf{W} &= \mathbf{W}(P, T, S_w, S_\nu = 1) = -\{m[S_w \lambda_w + (1 - S_w) \lambda_g] + (1 - m) \lambda_s\} \nabla T. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь индексы g, w, ν, s относятся к газу, воде, гидрату, скелету пористой среды соответственно; P – давление, T – температура, t – время, $m = m(r, P)$ – пористость, r – радиус-вектор, S_w – водонасыщенность, $S_g = 1 - S_w$ – газонасыщенность, ν – гидратонасыщенность, $S_\nu = 1 - \nu$ – растеplенность, β_w – массовая доля воды в гидрате, $\rho_l = \rho_l(P, T)$, $\varepsilon_l = \varepsilon_l(P, T)$, $\lambda_l = \lambda_l(P, T)$ – плотности, внутренние энергии, коэффициенты теплопроводности компонент ($l = g, w, \nu, s$); \mathbf{V}_α – скорости фильтрации, q_α – плотности источников массы жидкой и газовой фазы ($\alpha = w, g$). Анализ формул (6) показывает, что уравнение энергии в зоне II содержит конвективный и диффузионный переносы температуры. Последний связан с теплопроводностью. Аналогично выписываются выражения для зоны I.

Для скорости фильтрации жидкой и газовой фаз в пористой среде используется известный закон Дарси [14], являющийся традиционным для подобного класса задач поровой подземной гидродинамики. Согласно этому закону скорости фильтрации воды и газа равны (с учетом гравитации, но без учета капиллярных сил вода – газ):

$$\mathbf{V}_\alpha = -\frac{k \cdot k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (\nabla P - \mathbf{g}\rho_\alpha), \quad \alpha = w, g,$$

где \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения, $k = k(r, S_\nu, P)$ – абсолютная проницаемость, $k_{r\alpha} = k_{r\alpha}(S_w)$ – относительные фазовые проницаемости, $\mu_\alpha = \mu_\alpha(P, T)$ – вязкости воды и газа.

Уравнение состояния для газа имеет вид

$$\rho_g = \rho_g(P, T) = \frac{PM}{z(P, T)RT},$$

где M – молярная масса газа, R – универсальная газовая постоянная, $z(P, T)$ – коэффициент сверхсжимаемости газа (Z -фактор газа).

Внутренние энергии воды, газа и твердого порового скелета будем определять через их теплоемкости при постоянном объеме (c_l):

$$\varepsilon_l = c_l T, \quad l \in \{w, g, s\}.$$

Энтальпия гидрата выражается через энтальпии составляющих его газа и воды и скрытой теплоты фазового перехода единицы массы гидрата h_{dis} по формуле

$$\beta_w i_w + (1 - \beta_w) i_g = i_\nu + h_{dis},$$

где $i_l = \varepsilon_l + P/\rho_l$ – энтальпия компоненты $l \in \{w, g, \nu\}$.

С точки зрения решения уравнений (2)–(4), в зонах I и II основными неизвестными будут P, T, S_w при постоянных значениях растеplенности ($S_\nu = S_{\nu 0} = 1 - \nu_{\max}$ в гидратной зоне и $S_\nu = 1$ в безгидратной). На линии термодинамического равновесия основными неизвестными будут P, S_w, S_ν при температуре, являющейся функцией давления, $T = T_{dis}(P)$.

Прежде чем производить разностную аппроксимацию, следует исследовать рассматриваемую систему уравнений в частных производных (2)–(4) с точки зрения гиперболических и параболических свойств относительно основных неизвестных.

Система уравнений функционально состоит из блока (2), (3), имеющего при фиксированных давлении и температуре гиперболический характер относительно водонасыщенности (и гидратонасыщенности/растеplенности в зоне III) и отвечающего за перенос насыщенностей по характеристикам. В трехфазной зоне III имеем две насыщенности (S_w, S_ν), причем, как можно показать, их перенос происходит по-разному: перенос водонасыщенности (S_w) происходит со сносом вверх по потоку, а снос растеplенности (S_ν) – со сносом вниз. В зонах I и II присутствует

конвективный перенос водонасыщенности и температуры, происходящий со сносом вверх по потоку.

Путем эквивалентных преобразований из системы консервативных уравнений (2)–(4) в зоне III можно получить параболическое (с «примесью» гиперболичности) уравнение относительно давления на фоне фиксированных насыщенных (см. [25, 52]). Это так называемое уравнение пьезопроводности, содержащее конвективный перенос масс и внутренних энергий воды и газа, работу сил давления, а также диссипацию тепловой энергии. Данное уравнение содержит в явном виде также скачки объема и внутренней энергии при фазовом переходе в процессе диссоциации гидрата.

В зонах I и II при фиксированных температуре и водонасыщенности из системы исходных уравнений можно получить аналогичное параболическое уравнение пьезопроводности для давления.

При фиксированных давлении и водонасыщенности в зонах I и II получается уравнение для температуры, имеющее смешанные гиперболические и параболические свойства, причем последние связаны с наличием теплопроводности. Заметим, что в приближении нулевой теплопроводности, которая обычно пренебрежимо мала по сравнению с конвективным теплопереносом, соответствующее уравнение для температуры будет гиперболическим.

Свойство параболичности по переменной приводит к необходимости использовать неявные по этой переменной схемы. Следовательно, по давлению и температуре (при учете теплопроводности) необходимо использовать неявные разностные схемы.

Направление характеристик гиперболических уравнений и характер переноса вдоль характеристик по соответствующим переменным следует учитывать при разностной аппроксимации потоковых членов и задании граничных условий: граничные условия для переменной, имеющей характеристику, влияют на процесс и должны задаваться только в том случае, если характеристика направлена из данной границы вовнутрь области. Отметим также, что с гиперболичностью связаны ограничения на шаги разностной схемы по времени, диктуемые условием Куранта.

В настоящей работе ограничимся рассмотрением совместного решения в зонах II и III. При этом основными неизвестными являются три независимые переменные, набор которых зависит от зоны, в которой находимся: (P, T, S_w) для зоны II и (P, S_w, S_v) для зоны III.

3. Численные расчеты

Рассматривается модельная задача 1.2 о взаимодействии горизонтального пласта, содержащего газовый гидрат, с вертикальным разломом, на котором задано пониженное значение давления. Эта задача в первом приближении может быть рассмотрена в виде одномерной горизонтальной задачи в декартовых координатах в области $(0, L)$, L – длина расчетной области. Нас интересует ближайшая окрестность разлома, $(0, L_1)$, где L_1 порядка нескольких метров. Процесс рассматривается до момента времени, пока возникающая талая зона не распространится на ближайшую окрестность разлома. Заметим, что в связи с параболическим характером задачи по давлению длина расчетной области должна выбираться достаточно большой, чтобы граничные условия на удаленной границе практически не влияли на решение в окрестности разлома, $L \gg L_1$ на рассматриваемом интервале времени.

Поставленная начально-краевая задача решается при помощи метода конечных разностей. Для этого строится неравномерная разностная сетка по пространству,

состоящая из множества ячеек с центрами:

$$\omega_h = \{x_i, i = 0, 1, \dots, N, x_0 = 0, x_N = L\}.$$

Шаги сетки по времени, τ_n , где n – номер шага, вообще говоря, выбираются автоматически в ходе счета, исходя из скорости сходимости итерационного процесса решения на текущем шаге.

Исходные уравнения, граничные и начальные условия заменяются их сеточными аналогами (см. [25, 52]). При построении схемы для потоковых членов используется аппроксимация против потока для водонасыщенности (и температуры) и аппроксимация по потоку для растепленности. Данный способ следует из анализа гиперболичности системы уравнений [50]. Полученная разностная схема представляет собой систему нелинейных уравнений. На каждом временном слое эта система решается с помощью итерационного метода Ньютона. В результате на каждой s -й итерации имеем трехточечное линейное уравнение относительно приращений тех неизвестных, по которым схема неявна. Например, если пренебречь теплопроводностью, имеем схему, неявную только по давлению. Такая схема на каждой итерации сводится к трехточечному уравнению относительно приращений сеточных значений давления на итерациях $\delta P_i = P_i^{s+1} - P_i^s$; для решения уравнения используется известный метод прогонки. При учете теплопроводности следует использовать схему, неявную не только по давлению, но и по температуре. Такая схема на каждой итерации сводится к трехточечному уравнению для вектора приращений $Y_i = (\delta P_i, \delta S_i)^T$, где в трехфазной зоне под S понимается S_ν , а в талой зоне – T . Такое уравнение решается с помощью матричной трехточечной прогонки с матрицами 2×2 .

В численных расчетах использовалась методика построения единого алгоритма расчета течения флюидов во всей рассматриваемой области фильтрации в двух- и трехфазных зонах, разработанная в [25]. Это методы «двойной каркасности» и «перегретого растепления».

Для расчетов были выбраны следующие значения параметров, характерные для Мессояжского газогидратного месторождения:

плотности, кг/м³: $\rho_w = 1000$, $\rho_\nu = 910$, $\rho_s = 2800$;
 вязкости флюидов, 10⁻³ Па·с: $\mu_w = 1$, $\mu_g = 0.014$;
 коэффициенты теплоемкости при постоянном объеме, Дж/(кг·К): $c_w = 4165$,
 $c_g = 2500$, $c_s = 873$;
 коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К): $\lambda_w = 0.55$ (воды при $T = 273$ К и $P = 1$ бар), $\lambda_g = 0.03$ (метана при $T = 280$ К и $P = 30$ бар), $\lambda_\nu = 0.442$ (гидрата метана), $\lambda_s = 1.7$ (породы – известняка).

Другие параметры и константы были равны:

$$M = M_{CH_4} = 16 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, \quad R = 8.31441 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}, \quad h_{\text{dis}} = 514810 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$A = 7.28 \text{ К}, \quad B = 169.7 \text{ К}, \quad \beta_w = 0.9, \quad m = 0.35,$$

$$k(S_\nu) = k_0 S_\nu^3, \quad k_0 = 10 \text{ мД} = 10^{-14} \text{ м}^2,$$

$$k_{rw}(S_w) = \begin{cases} 0, & S_w < S_{w,\min}, \\ k_w(S_w), & S_{w,\min} < S_w < S_{w,\max}, \\ k_w(S_{w,\max}), & S_w > S_{w,\max}, \end{cases}$$

$$k_{rg}(S_w) = \begin{cases} k_g(S_{w,\min}), & S_w < S_{w,\min}, \\ k_g(S_w), & S_{w,\min} < S_w < S_{w,\max}, \\ 0, & S_w > S_{w,\max}, \end{cases}$$

$$k_w(S) = 1.477S^5 - 1.587S^6 + 1.11S^7 - 0.0473,$$

$$k_g(S) = 1.044 - 1.7S + 0.6S^2, \quad S_{w,\min} = 0.55, \quad S_{w,\max} = 0.9.$$

Гравитация, в силу горизонтальной геометрии, очевидно, не влияет.

В расчетной области $(0, L)$, $L = 317$ м, строится следующая сетка по пространству. На расстоянии до 1 м от разлома (разлом соответствует левой границе расчетной области) она равномерна с шагом $h = 0.01$ м, а далее шаги увеличиваются в геометрической прогрессии с показателем $q = 1.05$. Общее число узлов сетки по пространству равно $N = 250$. Шаги по времени постоянны, $\tau = 10$ с.

В начальный момент времени задаем однородное гидратное трехфазное состояние с давлением, отвечающим глубине 300 м, на которой в районах криолитозоны возможно существование термодинамически равновесных метан-гидратов:

$$S_w(x, t = 0) = S_w^* = 0.6, \quad S_\nu(x, t = 0) = S_\nu^* = 0.75,$$

$$P(x, t = 0) = P_0 = 30 \text{ бар}, \quad T(x, t = 0) = T_0 = T_{\text{dis}}(P_0).$$

На левой границе области (на разломе) ставится давление, равное атмосферному, и условие отсутствия гидратов

$$P(x = 0, t) = P_1 = 1 \text{ бар}, \quad S_\nu(x = 0, t) = 1.$$

На правой (удаленной) границе ставятся невозмущенные краевые условия – значения переменных совпадают с их начальными значениями

$$S_w(x = L, t) = S_w^*, \quad S_\nu(x = L, t) = S_\nu^*, \quad P(x = L, t) = P_0, \quad T(x = L, t) = T_0.$$

Заметим, что в рассматриваемом случае на левой границе $\Delta P = P_0 - P_1 > 0$, поэтому течение флюидов на этой границе будет направлено наружу области, характеристики, отвечающие водонасыщенности и температуре также направлены наружу. Отсюда следует, что значение водонасыщенности на этой границе не будет влиять на решение внутри области.

Ниже представлены результаты численных расчетов рассматриваемой задачи с учетом теплопроводности. На рис. 2–6 приведены графики распределения растепленности, водонасыщенности, давления и температуры на разные моменты времени: $t = 1$ ч, 0.1 сут, 0.5 сут, 1 сут, 10 сут, 50 сут. Результаты показаны только для ближайшей окрестности разлома, $0 < x < 3$ м.

На графиках для растепленности наблюдается распространение положения границы между талой двухфазной и гидратной трехфазной зонами в виде фронта волны возмущения,двигающегося от левой границы (разлома). Этот фронт обусловлен переходом от изначально трехфазной зоны, содержащей гидрат, газ и воду, к образующейся двухфазной талой зоне, содержащей только газ и воду. Диссоциация гидрата, начинающаяся вблизи границы с пониженным давлением, постепенно распространяется от разлома, приводя к полному исчезновению гидрата и образованию талой зоны в окрестности разлома, в которой растепленность становится равной единице, что соответствует полному разложению газового гидрата на газ и воду.

На рис. 3 видно, что водонасыщенность на ранних и средних этапах процесса изменяется немонотонно, но на поздних временах постепенно переходит к монотонному медленно меняющемуся распределению. При этом граница между трехфазной и талой зонами на графиках для S_w наблюдается в виде небольшого скачка. Наиболее отчетливо это видно на графике для $t = 10$ сут.

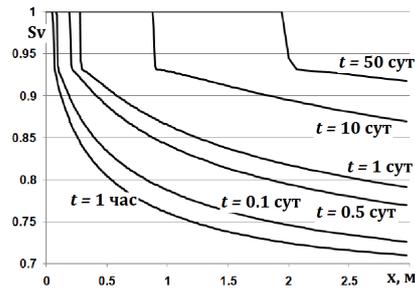
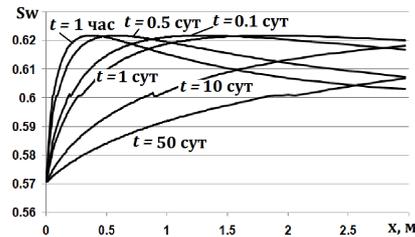
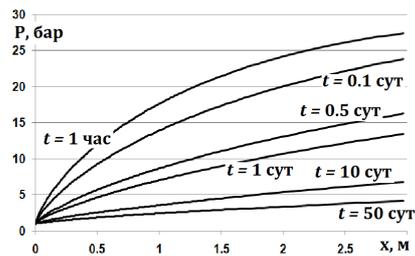
Рис. 2. Растепленность S_v для различных моментов времениРис. 3. Водонасыщенность S_w для различных моментов времени

Рис. 4. Давление для различных моментов времени

На графиках для давления (рис. 4) видно, что наличие границы перехода от трехфазной к талой зоне слабо влияет на характер распределения давления, изменяющегося почти как в однофазном случае, графики для которого (в задаче теплопроводности, аналогичной задаче однофазного упругого режима фильтрации) приведены в [53]. Градиент давления в окрестности разлома, значительный в начале, с течением времени уменьшается, скорости фильтрации газа и воды и значения соответствующих конвективных членов уравнений снижаются.

На графиках распределения температуры (рис. 5) переход от трехфазной зоны к двухфазной наблюдается в виде излома, связанного с переходом от системы уравнений (2)–(4), (5) с температурой, являющейся функцией давления, к системе (2)–(4), (6), в которой температура является независимой переменной. Более отчетливо это можно видеть на рис. 6, где представлен график разности $T - T_{\text{dis}}(P)$.

Из графиков для T видно, что в процессе диссоциации гидрата и фильтрационного движения флюидов значения температуры во всей талой зоне приближаются к константе, не меняющейся со временем, причем отрицательной по Цельсию. В таком случае модель, вообще говоря, должна усложняться изменением коэффициентов в формуле (1) для отрицательных температур с учетом образования

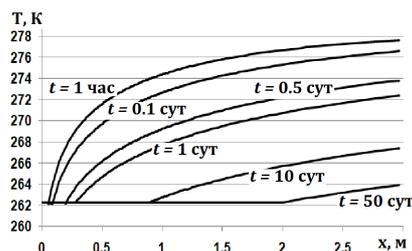


Рис. 5. Температура для различных моментов времени

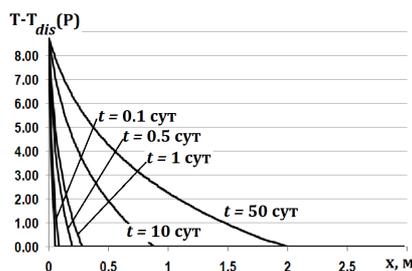


Рис. 6. Величина $T - T_{dis}(P)$ для различных моментов времени

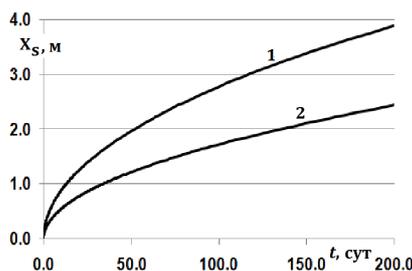


Рис. 7. Зависимость X_S от времени для двух вариантов: с учетом теплопроводности (1) и без учета (2)

водяного льда и эффекта самоконсервации газового гидрата [19, 20]. Однако, поскольку расчеты носят методический характер, здесь эти эффекты не учитывались. Заметим, что в случае меньшей депрессии на разломе (меньших значений разности $\Delta P = P_0 - P_1$) характер процесса не изменится, но замедлится, температура около разлома будет претерпевать меньшее снижение и может не уйти в область отрицательных значений.

С ростом времени в рассматриваемой задаче в окрестности разлома заметно ослабевают фильтрационные течения и связанный с ними конвективный перенос, и динамика температуры в большей степени начинает определяться диффузионным переносом, связанным с теплопроводностью.

Для выяснения влияния диффузионного переноса тепла были проведены расчеты с нулевой теплопроводностью. На рис. 7 представлен график зависимости от времени положения границы X_S между двух- и трехфазными зонами для вариантов с и без теплопроводности. Видно, что учет теплопроводности приводит к значительному увеличению скорости распространения межфазной границы. Следовательно, в рассматриваемой задаче нельзя пренебрегать теплопроводностью.

Исследование полученных численно зависимостей $X_S(t)$ показало, что в обоих вариантах они хорошо аппроксимируются соотношениями вида $X_S(t) = \text{const} \sqrt{t}$, где в варианте с теплопроводностью $\text{const} = 0.27237$, а без теплопроводности $\text{const} = 0.17186$ (если время измерять в сутках). Заметим, что такое поведение решения характерно для автомодельных задач с типом автомодельности $f(x, t) = f(\xi)$, $\xi = x/\sqrt{t}$.

Заключение

В работе показано, что при изучении многих задач подземной флюидодинамики, связанных с разложением газовых гидратов в пористой среде в ряде случаев может быть применено численное моделирование в рамках одномерных постановок, например, при исследовании воздействия изменений климата или хозяйственной деятельности на состояние подземных газовых гидратов, определении влияния тектонических разломов или скважин на пласты, содержащие газогидраты. Такое моделирование имеет важное природно-хозяйственное значение. Оно не только зачастую оказывается достаточно точным для оценки и выяснения роли различных механизмов и явлений на процесс диссоциации гидратов, но и может служить в качестве первого приближения для более сложных многомерных расчетов.

Результаты численных расчетов, проведенных по построенной авторами разностной схеме, демонстрируют в модельной постановке влияние депрессии (пониженного значения давления) на тектоническом разломе на пласт, содержащий изначально гидрат, газ и воду. На представленных графиках видно, что в результате депрессии в пласте происходит диссоциация гидрата, начинающаяся вблизи границы с пониженным давлением (на разломе) и появляется двухфазная талая зона, в которой газовый гидрат полностью разложился на газ и воду. Графики показывают динамику взаимодействия двух- и трехфазной зон. Граница между первоначально трехфазной и образующейся двухфазной зонами постепенно распространяется от разлома, приводя к полному исчезновению гидрата и образованию талой зоны в окрестности разлома. С течением времени изначально однородное состояние переходит в неоднородное, слабо меняющееся по времени. При этом во всей талой зоне устанавливается практически постоянное значение температуры, не меняющееся со временем.

Полученные результаты соответствуют физике процесса разложения гидратов в поровой среде и показывают возможность применения разработанных авторами методов и алгоритмов к реальным задачам, связанным с газовыми гидратами.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-15081-офи_м, 18-07-00841-а, 18-51-18004-Болг_а).

Литература

1. *Истомин В.А., Якушев В.С.* Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
2. *Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А.* Субмаринные газовые гидраты. – СПб.: ВНИИОкеанология, 1994. – 200 с.
3. *Englezos P.* Clathrate hydrates // *Ind. Eng. Chem. Res. J.* 1993. – V. 32, No 7. – P. 1251–1274. – doi: 10.1021/ie00019a001.

4. Гудзенко В.Т., Вареничев А.А., Громова М.П. Газогидраты. Информационно-аналитический обзор // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 39–68.
5. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
6. Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Тумской В.Е., Хименков А.Н., Власов А.Н., Мерзляков В.П., Станиловская Ю.В. Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 2. – С. 35–44.
7. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 64–74.
8. Максимов А.М., Якушев В.С., Чувилин Е.М. Оценка возможности выбросов газа при разложении газовых гидратов в пласте // Докл. РАН. – 1997. – Т. 352, № 4. – С. 532–534.
9. Васильева З.А., Ефимов С.И., Якушев В.С. Прогнозирование теплового взаимодействия нефтегазодобывающих скважин и многолетнемерзлых пород, содержащих метастабильные газогидраты // Криосфера Земли. – 2016. – № 1. – С. 65–69.
10. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Романовский Н.Н., Космач Д.А., Никольский Д.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Ананьев Р.А., Росляков А.Г., Салюк А.Н., Карнауш В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Юсупов В.И., Куриленко А.В., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы» // Докл. РАН. – 2012. – Т. 446, № 3. – С. 330–335.
11. Цыпкин Г.Г. Формирование непроницаемого слоя при диссоциации гидрата метана в пористой среде // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2017. – № 5. – С. 65–73.
12. Kim H.C., Bishnoi P.R., Heidemann R.A., Rizvi S.S.H. Kinetics of methane hydrate decomposition // Chem. Eng. Sci. – 1987. – V. 42, No 7. – P. 1645–1653.
13. Yousif M.H., Abass H.H., Selim M.S., Sloan E.D. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media // SPE Reservoir Eng. – 1991. – V. 6, No 1. – P. 69–76. – doi: 10.2118/18320-PA.
14. Aziz K., Settari A. Petroleum Reservoir Simulation. – London; N. Y.: Elsevier, 1979. – 476 p.
15. Goel N., Wiggins M., Shah S. Analytical modeling of gas recovery from in situ hydrates dissociation // J. Pet. Sci. Eng. – 2001. – V. 29, No 2. – P. 115–127. – doi: 10.1016/S0920-4105(01)00094-8.
16. Khataniar S., Kamath V.A., Omenihu S.D., Patil S.L., Dandekar A.Y. Modeling and economic analysis of gas production from hydrates by depressurization method // Can. J. Chem. Eng. – 2002. – V. 80, No 1. – P. 135–143.
17. Jeannin L., Bayi A., Renard G., Bonnefoy O., Herri J.M. Formation and dissociation of methane hydrates in sediments. Part II: Numerical modeling // Proc. 4th Int. Conf. on Gas Hydrates, Yokohama, Japan, May 19–23, 2002. – 2002. – V. 2. – P. 802–806.
18. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
19. Истомин В.А., Квон В.Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 506 с.
20. Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А., Квон В.Г., Чувилин Е.М. Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовая промышленность. – 2006. – Спецвып.: Газовые гидраты. – С. 36–46.

21. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. – М.: ВНИИГАЗ, 2009. – 192 с.
22. Чувиллин Е.М., Буханов Б.А. Изменение теплопроводности газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании-оттаивании. Часть 2. Результаты исследований // Криосфера Земли. – 2014. – № 2. – С. 57–65.
23. Wilder J.W., Moridis G.J., Wilson S.J., Kurihara M., White M.D., Masuda Y., Anderson B.J., Collett T.S., Hunter R.B., Narita H., Pooladi-Darvish M., Rose K., Boswell R. An international effort to compare gas hydrate reservoir simulators // Proc. 6th Int. Conf. on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, Canada, July 6–10, 2008. – 2008. – 12 p.
24. Pinero E., Hensen C., Haeckel M., Rottke W., Fuchs T., Wallmann K. 3-D numerical modelling of methane hydrate accumulations using PetroMod // Mar. Pet. Geol. – 2016. – V. 71. – P. 288–295. – doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.12.019.
25. Qorbani K., Kvamme B. Non-equilibrium simulation of CH₄ production from gas hydrate reservoirs through the depressurization method // J. Nat. Gas Sci. Eng. – 2016. – V. 35, Pt. B. – P. 1544–1554. – doi: 10.1016/j.jngse.2016.03.102.
26. Дмитриевский А.Н., Лобковский Л.И., Казакевич Г.И., Повещенко Ю.А., Баланюк И.Е., Илюхин Л.Н. Численное моделирование движения флюидов в процессе формирования залежей углеводородов на примере Предверхожанского прогиба // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1995. – № 7. – С. 2–6.
27. Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Подрыга В.О., Рагимли О.Р., Попов С.Б. Моделирование процессов совместной фильтрации в талой зоне и пьезопрободной среде с газогидратными включениями // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2018. – № 40. – 32 с.
28. Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. – М.: Физматлит, 2009. – 230 с.
29. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. Фронтной режим теплопереноса в газогидратном пласте в условиях отрицательных температур // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2018. – № 4. – С. 75–89.
30. Черский Н.В., Бондарев Е.А. О тепловом методе разработки газогидратных залежей // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 203, № 3. – С. 550–552.
31. Веригин Н.Н., Хабибуллин И.Л., Халиков Г.А. Линейная задача о разложении гидратов газа в пористой среде // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1980. – № 1. – С. 174–177.
32. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Axisymmetric problem of heat and mass transfer in saturated porous medium // J. Eng. Phys. – 1980. – V. 38, No 5. – P. 581–585.
33. Бондарев Е.А., Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. К математическому моделированию диссоциаций газовых гидратов // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 308, № 3. – С. 575–578.
34. Нугматуллин Р.И., Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // Прикл. матем и теорет. физика. – 1998. – Т. 39, № 3. – С. 111–118.
35. Щебетов А.В. Создание методов прогнозирования эффективности технологий разработки газогидратных залежей: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007. – 126 с.
36. Khasanov M.K., Musakaev N.G. Gas hydrate formation in porous ice rich methane reservoirs upon injection of carbon dioxide: forward modeling // Earth's Cryosphere. – 2016. – V. 20, No 3. – P. 59–65.

37. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. Математическое моделирование процесса образования гидрата в пласте насыщенного снегом при нагнетании холодного газа // Вычисл. механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 2. – С. 173–181.
38. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. – М.: Наука, 2016. – 238 с.
39. Джафаров Д.С. Математическое моделирование диссоциации газогидратов в приложении к интерпретации исследований скважин газогидратных месторождений на нестационарных режимах фильтрации: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015. – 120 с.
40. Ahmadi G., Ji C., Smith D.H. A simple model for natural gas production from hydrate decomposition // Anna. New York Acad. Sci. – 2000. – V. 912, No 1. – P. 420–427. – doi: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06796.x.
41. Kamath V.A., Godbole S.P. An analytic model for analyzing the effects of dissociation of hydrates on the thermal recovery of heavy oils // SPE RE. – 1988. – V. 3, No 2. – Art. 14224-PA. – doi: 10.2118/14224-PA.
42. Kamath V.A., Mutalik P.N., Sira J.H. Experimental study of brine injection and depressurization methods for dissociation of gas hydrates // SPE Formation Evaluation. – 1991. – V. 6, No 4. – P. 477–484.
43. Vasil'ev V.I., Popov V.V., Tsyupkin G.G. Numerical investigation of the decomposition of gas hydrates coexisting with gas in natural reservoirs // Fluid Dynamics. – 2006. – V. 41, No 4. – P. 599–605.
44. Казакевич Г.И., Минервина Е.А., Повещенко Ю.А. Миграция углеводородов в процессе формирования месторождений: численное моделирование нелинейных эффектов // Докл. РАН. – 2002. – Т. 383, № 1. – С. 103–105.
45. Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Повещенко Ю.А., Казакевич Г.И. Автоколебательный характер флюидодинамического режима осадочного бассейна в зоне месторождений Прикаспия // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 1. – С. 45–49.
46. Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Саломатин А.С., Макаров М.М. Новые данные о линеamentном контроле современных очагов метановой дегазации морей Восточной Азии // Докл. РАН. – 2017. – Т. 477, № 3. – С. 327–330.
47. Повещенко О.Ю., Гасилова И.В., Галигузова И.И., Дорофеева Е.Ю., Ольховская О.Г., Казакевич Г.И. Об одной модели флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты // Матем. моделирование. – 2013. – Т. 25, № 10. – С. 32–42.
48. Казакевич Г.И., Клочкова Л.В., Повещенко Ю.А., Тишкин В.Ф. Математическое исследование системы уравнений газогидратных процессов в пористой среде // Журн. Средневожского матем. о-ва. – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 7–11.
49. Гасилов В.А., Гасилова И.В., Клочкова Л.В., Повещенко Ю.А., Тишкин В.Ф. Разностные схемы на основе метода опорных операторов для задач динамики флюидов в коллекторе, содержащих газогидраты // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. – 2015. – Т. 55, № 8. – С. 1341–1355.
50. Повещенко Ю.А., Казакевич Г.И. Математическое моделирование газогидратных процессов // Матем. машины и системы. – 2011. – Т. 3. – С. 105–110.
51. Дегтярев Б.В., Бухгалтер Э.Б. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах. – М.: Недра, 1976. – 195 с.
52. Рагимли П.И., Шарова Ю.С., Рагимли О.Р., Подрыга В.О., Гасилова И.В., Попов С.Б., Повещенко Ю.А. Математическое моделирование в некоторых задачах флюидодинамики в пористых средах с газогидратами на основе расщепления по

физическим процессам // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2018. – № 39. – 27 с.

53. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

Поступила в редакцию
10.05.19

Повещенко Юрий Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник; профессор

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Миусская пл., д. 4, г. Москва, 125047, Россия
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Каширское ш., д. 31, г. Москва, 115409, Россия
E-mail: *hecon@mail.ru*

Подрыга Виктория Олеговна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник; профессор

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Миусская пл., д. 4, г. Москва, 125047, Россия
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
Ленинградский пр-т, д. 64, г. Москва, 125319, Россия
E-mail: *pvictoria@list.ru*

Попов Игорь Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник; доцент

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Миусская пл., д. 4, г. Москва, 125047, Россия
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Каширское ш., д. 31, г. Москва, 115409, Россия
E-mail: *piv2964@mail.ru*

Попов Сергей Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Миусская пл., д. 4, г. Москва, 125047, Россия
E-mail: *popovsb@yandex.ru*

Рагимли Парвин Ильгар кызы, кандидат физико-математических наук, инженер

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Миусская пл., д. 4, г. Москва, 125047, Россия
E-mail: *pervin@rehimli.info*

Казакевич Григорий Ильич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Нахимовский пр-т, д. 36, г. Москва, 117997, Россия
E-mail: *gkazakevich@yandex.ru*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2019, vol. 161, no. 2, pp. 205–229

doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.205-229

**Numerical Simulation in Problems with Dissociation
of Gas Hydrates in a Porous Medium in One-Dimensional Formulation**

Yu.A. Poveshchenko^{a,b}, V.O. Podryga^{a,c**}, I.V. Popov^{a,b***}, S.B. Popov^{a****},
P.I. Rahimly^{a*****}, G.I. Kazakevich^{d*****}*

^a*Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 125047 Russia*

^b*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, 115409 Russia*

^c*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Moscow, 125319 Russia*

^d*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117997 Russia*

E-mail: * *hecon@mail.ru*, ** *pvictoria@list.ru*, *** *piv2964@mail.ru*,
**** *popovsb@yandex.ru*, ***** *pervin@rehimli.info*, ***** *gkazakevich@yandex.ru*

Received May 10, 2019

Abstract

The paper deals with some typical problems of gas hydrates dissociation in a porous medium, which in the first approximation can be reduced to one-dimensional. The research aims to study the mutual effects of underground gas hydrates and climate change, as well as some important technological and ecological problems of the flow in the well or fault area in the presence of hydrate-containing formations. New conservative difference schemes were developed for this class of problems. They are based on the splitting of gas-hydrodynamic processes. The advantage of these schemes is the phased solution of parabolic and hyperbolic equations. This approach greatly simplifies the solution procedure and at the same time increases its stability. Notably, within the framework of the approach, an algorithm was proposed to jointly solve the systems of equations describing the processes in various fields characterized by their own set of coexisting phases. The coordination of computational schemes for them is not a trivial and automatic process. Numerical calculations using mathematical modeling for the joint description of the gas hydrate zone and the zone with no gas hydrates were carried out. The results of calculations showed the applicability of the developed methods for solving the problems under study.

Keywords: gas hydrates, filtering, numerical simulation

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 16-29-15081-ofi_m, 18-07-00841-a, and 18-51-18004-Bolg_a).

Figure Captions

Fig. 1. Characteristic phase diagram of the system water – gas – hydrate (on the left) and the phase (P, T) diagram of the system methane – hydrate (on the right) with indicating phase equilibrium line $T = T_{\text{dis}}(P)$.

Fig. 2. Thawing S_v at different moments in time.

- Fig. 3. Water saturation S_w at different moments in time.
 Fig. 4. Pressure at different moments in time.
 Fig. 5. Temperature at different moments in time.
 Fig. 6. Variable $T - T_{\text{dis}}(P)$ at different moments in time.
 Fig. 7. Dependence of X_S on time for two variants: with (1) and without (2) account of thermal conductivity.

References

1. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Natural Conditions]. Moscow, Nedra, 1992. 236 p. (In Russian)
2. Ginsburg G.D., Solov'ev V.A. *Submarinnye gazovye gidraty* [Submarine Gas Hydrates]. St. Petersburg, VNIIOkeanol., 1994. 200 p. (In Russian)
3. Englezos P. Clathrate hydrates. *Ind. Eng. Chem. Res. J.*, 1993, vol. 32, no. 7, pp. 1251–1274. doi: 10.1021/ie00019a001.
4. Gudzenko V.T., Varenichev A.A., Gromova M.P. Gas hydrates. Informational and analytical review. *Geol., Geofiz., Razrab. Neft. Gazov. Mestorozhd.*, 2016, no. 5, pp. 39–68. (In Russian)
5. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovyye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow, Khimiya, 1980. 296 p. (In Russian)
6. Perlstein G.Z., Sergeev D.O., Tipenko G.S., Tumskoi V.E., Khimenkov A.N., Vlasov A.N., Merzlyakov V.P., Stanilovskaya Yu.V. Hydrocarbon gases and cryolithozone of the Arctic shelf. *Arkt.: Ekol. Ekon.*, 2015, no. 2, pp. 35–44. (In Russian)
7. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Assessment of possibility of natural gas hydrates underground storage in permafrost regions. *Earth's Cryos.*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 58–67.
8. Maksimov A.M., Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Assessment of possible gas outburst during decomposition of gas hydrates in reservoirs. *Dokl. Ross. Akad. Nauk*, 1997, vol. 352, no. 4, pp. 532–534. (In Russian)
9. Vasil'eva Z.A., Efimov S.I., Yakushev V.S. Prediction of thermal interaction between oil/gas wells and intra-permafrost metastable gas hydrates. *Earth's Cryos.*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 60–63.
10. Sergienko V.I., Lobkovskii L.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Dmitrevskii N.N., Shakhova N.E., Romanovskii N.N., Kosmach D.A., Nikol'skii D.N., Nikiforov S.L., Salomatina A.S., Anan'ev R.A., Roslyakov A.G., Salyuk A.N., Karnaukh V.V., Chernykh D.B., Tumskoi V.E., Yusupov V.I., Kurilenko A.V., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of east arctic seas as a potential cause of the "Methane Catastrophe": Some results of integrated studies in 2011. *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137. doi: 10.1134/S1028334X12080144.
11. Tsyppkin G.G. Formation of the impermeable layer in the process of methane hydrate dissociation in porous media. *Fluid Dyn.*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 657–665. doi: 10.1134/S0015462817050076.
12. Kim H.C., Bishnoi P.R., Heidemann R.A., Rizvi S.S.H. Kinetics of methane hydrate decomposition. *Chem. Eng. Sci.*, 1987, vol. 42, no. 7, pp. 1645–1653.
13. Yousif M.H., Abass H.H., Selim M.S., Sloan E.D. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media. *SPE Reservoir Eng.*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 69–76. doi: 10.2118/18320-PA.

14. Aziz K., Settari A. *Petroleum Reservoir Simulation*. London, New York, Elsevier, 1979. 476 p.
15. Goel N., Wiggins M., Shah S. Analytical modeling of gas recovery from in situ hydrates dissociation. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2001, vol. 29, no. 2, pp. 115–127. doi: 10.1016/S0920-4105(01)00094-8.
16. Khataniar S., Kamath V.A., Omenihu S.D., Patil S.L., Dandekar A.Y. Modeling and economic analysis of gas production from hydrates by depressurization method. *Can. J. Chem. Eng.*, 2002, vol. 80, no. 1, pp. 135–143.
17. Jeannin L., Bayi A., Renard G., Bonnefoy O., Herri J.M. Formation and dissociation of methane hydrates in sediments. Part II: Numerical modeling. *Proc. 4th Int. Conf. on Gas Hydrates, Yokohama, Japan, May 19-23, 2002*, 2002, vol. 2, pp. 802–806.
18. Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground Fluid Mechanics]. Moscow, Nedra, 1993. 416 p. (In Russian)
19. Istomin V.A., Kwon V.G. *Preduprezhdenie i likvidatsiya gazovykh gidratov v sistemakh dobychi gaza* [Prevention and Elimination of Gas Hydrates in Gas Production Systems]. Moscow, IRTs Gazprom, 2004. 504 p. (In Russian)
20. Istomin V.A., Yakushev V.S., Kwon V.G., Chuvilin E.M. The effect of self-preservation of gas hydrates. *Gazov. Prom-st.*, 2006, spec. issue, pp. 36–46. (In Russian)
21. Yakushev V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural Gas and Gas Hydrates in the Cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009. 192 p. (In Russian)
22. Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Change of thermal conductivity of gas-saturated rocks during hydrate formation and freeze-thawing. Part 2. Research results. *Krios. Zemli*, 2014, no. 2, pp. 57–65. (In Russian)
23. Wilder J.W., Moridis G.J., Wilson S.J., Kurihara M., White M.D., Masuda Y., Anderson B.J., Collett T.S., Hunter R.B., Narita H., Pooladi-Darvish M., Rose K., Boswell R. An international effort to compare gas hydrate reservoir simulators. *Proc. 6th Int. Conf. on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, Canada, July 6–10, 2008*, 2008. 12 p.
24. Pinero E., Hensen C., Haeckel M., Rottke W., Fuchs T., Wallmann K. 3-D numerical modelling of methane hydrate accumulations using PetroMod. *Mar. Pet. Geol.*, 2016, vol. 71, pp. 288–295. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.12.019.
25. Qorbani K., Kvamme B. Non-equilibrium simulation of CH₄ production from gas hydrate reservoirs through the depressurization method. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, vol. 35, pt. B, pp. 1544–1554. doi: 10.1016/j.jngse.2016.03.102.
26. Dmitrievskii A.N., Lobkovskii L.I., Kazakevich G.I., Poveshchenko Yu.A., Balanyuk I.E., Ilyukhin L.N. Numerical modeling of fluid movement in the process of formation of hydrocarbon deposits based on the Predverhoyanskiy deflection. *Geol., Geofiz., Razrab. Neft. Mestorozhd.*, 1995, no. 7, pp. 2–6. (In Russian)
27. Rahimly P.I., Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Rahimli O.R., Popov S.B. Modeling the processes of joint filtration in melted zone and piezocunductive medium with gas hydrate inclusions. *Prepr. IPM im. M.V. Keldysha*, 2018, no. 40. 32 p. (In Russian)
28. Tsyppkin G.G. *Techeniya s fazovymi perekhodami v poristykh sredakh* [Flows with Phase Transitions in Porous Media]. Moscow, Fizmatlit, 2009. 230 p. (In Russian)
29. Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M. Frontal mode of heat and mass transfer in a gas hydrate reservoir at negative temperatures. *Izv. Ross. Akad.Nauk. Mekh. Zhidk. Gaza*, 2018, no. 4, pp. 75–89. (In Russian)
30. Chersky N.V., Bondarev E.A. On the thermal method of development of gas hydrate deposits. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1972, vol. 203, no. 3, pp. 550–552. (In Russian)

31. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Linear problem of the decomposition of gas hydrates in a porous medium. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Zhidk. Gaza*, 1980, no. 1, pp. 174–177. (In Russian)
32. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Axisymmetric problem of heat and mass transfer in saturated porous medium. *J. Eng. Phys.*, 1980, vol. 38, no. 5, pp. 581–585. doi: 10.1007/BF00861276.
33. Bondarev E.A., Maksimov A.M., Tsyppkin G.G. Mathematical modeling of gas hydrate dissociation. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1989, vol. 308, no. 3, pp. 575–578. (In Russian)
34. Nigmatulin R.I., Shagapov V.Sh., Syrtlanov V.R. Self-similar problem of decomposition of gas hydrates in a porous medium upon depression and heating. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1998, vol. 39, no. 3, pp. 421–427. (In Russian)
35. Shchebetov A.V. Creating methods for predicting the efficiency of development of gas hydrate deposits. *Cand. Tekh. Sci. Diss.* Moscow, 2007. 126 p. (In Russian)
36. Khasanov M.K., Musakaev N.G. Gas hydrate formation in porous ice rich methane reservoirs upon injection of carbon dioxide: Forward modeling. *Earth's Cryos.*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 59–65.
37. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. Mathematical modeling of the formation of hydrate in the reservoir saturated with snow during the injection of cold gas. *Vychisl. Mekh. Sploshnykh Sred*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 173–181. (In Russian)
38. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. *Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gidratov v sistemakh dobychi, transportirovki i khraneniya gaza* [Dynamics of Hydrate Formation and Decomposition in Gas Production, Transportation, and Storage Systems]. Moscow, Nauka, 2016. 238 p. (In Russian)
39. Dzhafarov D.S. Mathematical modeling of the dissociation of gas hydrates in the application to the interpretation of studies of gas hydrate wells in non-stationary filtration modes. *Cand. Tekh. Sci. Diss.* Moscow, 2015. 120 p. (In Russian)
40. Ahmadi G., Ji C., Smith D.H. A simple model for natural gas production from hydrate decomposition. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 2000, vol. 912, no. 1, pp. 420–427. doi: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06796.x.
41. Kamath V.A., Godbole S.P. An analytic model for analyzing the effects of dissociation of hydrates on the thermal recovery of heavy oils. *SPE Reservoir Eng.*, 1988, vol. 3, no. 2, art. 14224-PA. doi: 10.2118/14224-PA.
42. Kamath V.A., Mutalik P.N., Sira J.H. Experimental study of brine injection and depressurization methods for dissociation of gas hydrates. *SPE Form. Eval.*, 1991, vol. 6, no. 4, pp. 477–484.
43. Vasil'ev V.I., Popov V.V., Tsyppkin G.G. Numerical investigation of the decomposition of gas hydrates coexisting with gas in natural reservoirs. *Fluid Dyn.*, 2006, vol. 41, no. 4, pp. 599–605.
44. Kazakevich G., Minervina E., Poveshchenko Y. Hydrocarbon migration in the process of pool formation: Numerical modeling of nonlinear effects. *Dokl. Ross. Akad. Nauk*, 2002, vol. 383, no. 1, pp. 103–105. (In Russian)
45. Dmitriyevskii A., Karakin A., Poveshchenko Y., Kazakevich G. The self-oscillatory nature of the fluid-dynamic regime of the sedimentary basin in the zone of the Caspian deposits. *Geol., Geofiz., Razrab. Neft. Gazov. Mestorozhd.*, 2017, no. 1, pp. 45–49. (In Russian)
46. Shakirov R.B., Obzhairov A.I., Salomatin A.S., Makarov M.M. New data on lineament control of modern centers of methane degassing in east Asian seas. *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 477, no. 1, pp. 1287–1290. (In Russian)

47. Poveshchenko O.Yu., Gasilova I.V., Galiguzova I.I., Dorofeeva E.Yu, Ol'khovskaya O.G., Kazakevich G.I. A fluid dynamics model for a porous media, containing gas hydrate deposits. *Mat. Model.*, 2013, vol. 25, no. 10, pp. 32-42. (In Russian)
48. Kazakevich G.I., Klochkova L.V., Poveshchenko Yu.A., Tishkin V.F. A mathematical study of the system of equations of gas hydrate processes in a porous medium. *Zh. Srednepovolzh. Mat. O-va.*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 7–11. (In Russian)
49. Gasilov V.A., Gasilova I.V., Klochkova L.V., Poveshchenko Yu.A., Tishkin V.F. Difference schemes based on the support operator method for fluids dynamics problems in a collector containing gas hydrates. *Comput. Math. Math. Phys.*, 2015, vol. 55, no. 8, pp. 1310–1323. doi: 10.1134/S0965542515080114.
50. Poveshchenko Yu.A., Kazakevich G.I. Mathematical modeling of gas hydrate processes. *Mat. Mash. Sist.*, 2011, vol. 3, pp. 105–110. (In Russian)
51. Degtyarev B.V., Bukhgalter E.B. *Bor'ba s gidratami pri ekspluatatsii gazovykh skvazhin v severnykh rayonakh* [Fight against Hydrates in the Operation of Gas Wells in the Northern Areas]. Moscow, Nedra, 1976. 195 p. (In Russian)
52. Rahimly P.I., Sharova Yu.S., Rahimly O.R., Podryga V.O., Gasilova I.V., Popov S.B., Poveshchenko Yu.A. Mathematical modeling of some problems of fluid dynamics in porous media with gas hydrates based on splitting by physical processes. *Prepr. IPM im. M.V. Keldysha*, 2018, no. 39. 27 p. (In Russian)
53. Karslow G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Thermal Conductivity of Solids]. Moscow, Nauka, 1964. 488 p. (In Russian)

Для цитирования: Повещенко Ю.А., Подрыга В.О., Попов И.В., Попов С.Б., Рагимлы П.И., Казакевич Г.И. Численное моделирование диссоциации газогидратов в пористой среде в одномерной постановке // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2019. – Т. 161, кн. 2. – С. 205–229. – doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.205-229.

For citation: Poveshchenko Yu.A., Podryga V.O., Popov I.V., Popov S.B., Rahimly P.I., Kazakevich G.I. Numerical simulation in problems with dissociation of gas hydrates in a porous medium in one-dimensional formulation. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2019, vol. 161, no. 2, pp. 205–229. doi: 10.26907/2541-7746.2019.2.205-229. (In Russian)