

На правах рукописи



БЕЛЬСКИХ ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ

**ПРОЦЕСС ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ГИДРАТОНАСЫЩЕННУЮ ЗАЛЕЖЬ
С УЧЕТОМ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА**

Специальность: 1.3.14.

Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена на кафедре фундаментальной математики и механики
Тюменского государственного университета

Научный руководитель: **Мусакаев Наиль Габсалимович,**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рожин Игорь Иванович,**
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Якутский
научный центр Сибирского отделения Российской
академии наук» Институт проблем нефти и газа
СО РАН

Русинов Алексей Александрович,
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры высшей математики и физики Бирского
филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский
государственный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет»

Защита состоится «8» июня 2022 г. в 13-30 на заседании диссертационного
совета 24.2.418.02 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»
по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 410.

Тел.: +7-922-043-68-43

E-mail: denisbelskih@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского
государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

*Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.274.10
д. ф.-м. н.*



С. Ю. Удовиченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время углеводороды являются одним из важнейших источников для энергетики и практически незаменимым сырьем для химической промышленности. В связи с этим ведутся исследования в области поиска и разработки новых, нетрадиционных источников углеводородов, одним из которых являются гидраты природного газа.

Согласно оценкам различных исследователей, запасы природного газа в виде газовых гидратов в 5-100 раз больше традиционных извлекаемых запасов. Даже минимальная оценка заметно превышает запасы топлива на Земле во всех остальных видах вместе взятых. При этом отмечено, что количество метана, которое содержится в природных газовых гидратах, в 3 тысячи раз превосходит его количество в атмосфере. Освобождение этого парникового потенциала имело бы страшные последствия для климата Земли. Такая проблема эмиссии метана в земную атмосферу из-за растепления многолетнемерзлых пород (ММП) в связи с потеплением климата активно обсуждается в обществе. Как заявил на форуме «Арктика-территория диалога» президент Российской академии наук Александр Михайлович Сергеев, глобальное потепление за последнее время привело к тому, что в Арктике из-за таяния вечной мерзлоты и истончения прибрежных льдов в атмосферу выделяется все больше метана, что может привести к катастрофическим последствиям для всей планеты, эти риски требуют серьезного внимания со стороны ученых.

Таким образом, можно выделить два аспекта необходимости изучения разложения газогидрата в пористой среде при тепловом воздействии на пласт: добыча газа из гидратонасыщенных залежей и неконтролируемое выделение метана. При решении таких практических задач стоит отметить важность математического моделирования, так как полученные при изучении результаты могут существенным образом уменьшить объем необходимых экспериментальных и промысловых данных. То есть требуется теоретическая проработка, основывающаяся на адекватных математических моделях и численных методах их реализации, что и определяет **актуальность** проведенных исследований и их значимость для приложений.

Цель работы заключается в развитии и обосновании физико-математической модели неизоэнтальпического фильтрационного течения с учетом диссоциации в пористой среде газового гидрата при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь, а также в выявлении особенностей гидродинамических и тепломассообменных процессов, возникающих при таком течении.

Основные **задачи** диссертационного исследования:

- Развитие физико-математической модели неизоэнтальпической фильтрации газа или газожидкостной смеси с учетом разложения газогидрата в пористом коллекторе при нагреве гидратосодержащих пород.

- Разработка алгоритма численной реализации математической модели, описывающей в одномерном и двумерном приближениях процесс теплового воздействия на область пористой среды, содержащую в начальном состоянии метан и его гидрат.
- Анализ влияния параметров системы «пористый пласт – насыщающий флюид» и температуры на границе пористого резервуара на режим диссоциации газового гидрата и распределение параметров в рассматриваемой области пористого пласта.
- Установление особенностей гидродинамических и тепломассообменных процессов, возникающих при нагнетании в пористый пласт теплого (с температурой выше исходной температуры пласта) газа или при повышении температуры на верхней границе пласта области пористой среды, содержащую в начальном состоянии метан и его гидрат.

Объектом исследования являются процессы, происходящие при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь с учетом диссоциации газового гидрата.

Предметом исследования является исследование режима диссоциации газового гидрата и распределение параметров в рассматриваемой области гидратосодержащего пористого пласта при наличии теплового воздействия.

Научная новизна

- Развита физико-математическая модель процессов, происходящих при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт. В модели произведен учет фильтрации газа и воды, разложения в пористой среде газогидрата, неидеальности газа и неизотермических эффектов при движении газа и воды в пористой среде. Произведена программная реализация предложенной физико-математической модели неизотермической фильтрации газа и воды, позволяющая в одномерном и двумерном приближениях проводить вычислительные эксперименты по расчету параметров процессов, возникающих при таком течении.
- Установлены основные особенности разложения газогидратов в пористых пластах при тепловом воздействии на гидратосодержащую залежь в зависимости от интенсивности теплового воздействия и исходных параметров пористой среды.
- Впервые в двумерном приближении получены решения задачи о тепловом воздействии (повышение температуры на верхней границе пласта) на область пористой среды, содержащую в начальном состоянии метан и его гидрат; причем границы области являются непроницаемыми для продуктов разложения газового гидрата (газа и воды). Расчетным путем показано, что диссоциация газогидратов полностью происходит на фронтальной поверхности, разделяющей зоны пласта, насыщенные метаном и водой, и метаном и его гидратом.

Практическая значимость

Получены фундаментальные знания об особенностях протекания процесса разложения газогидратов в пласте, поры которого насыщены в начальном состоянии газом и его гидратом. Результаты исследований дополняют и уточняют имеющиеся представления о теплофизических процессах, протекающих в системе «пористый пласт — насыщающий флюид» при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь.

Предложенная физико-математическая модель и алгоритм решения могут быть использованы при выборе наиболее эффективной стратегии добычи газа из газогидратных залежей. Используемый численный метод расчета является универсальным и подходит для различных форм задач Стефана с протяженной и фронтальной областью фазовых переходов.

Полученные результаты вычислительных экспериментов позволяют провести оценку параметров теплового воздействия на гидратонасыщенную залежь, уменьшив объем необходимых промышленных и/или экспериментальных данных, и могут быть использованы при решении экологических проблем, связанных с разложением природных газогидратов.

Диссертационная работа выполнена в Тюменском государственном университете и Тюменском филиале Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН в рамках гранта РФФИ 19-31-90043_Аспиранты и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2017-2020 годы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных законов механики многофазных сред и термодинамики, использованием широко апробированных численных методов, многочисленным тестированием программ при различных исходных данных, сопоставлением с расчетами других авторов.

Методы исследования поставленной задачи основываются на фундаментальных законах и положениях механики многофазной среды с использованием современных численных методов решения.

Основные положения, выносимые на защиту:

Развитая физико-математическая модель процессов, происходящих при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт; данная модель учитывает движение в пористой среде газа и воды, фазовые переходы, реальные свойства газа, эффекты Джоуля-Томсона и адиабатического расширения.

Методика расчета нестационарных одномерных и двумерных полей давления, температуры и насыщенностей фаз при закачке в гидратосодержащий пласт теплого газа или при повышении температуры на верхней границе замкнутой гидратонасыщенной области пласта; вычислительные программы для расчета параметров неизотермического фильтрационного течения газа и воды с учетом диссоциации в пористой среде газового гидрата в одномерном и двумерном случаях.

Результаты вычислительных экспериментов по изучению влияния параметров системы «пористый пласт – насыщающий флюид» и температуры на границе гидратонасыщенной залежи на режим диссоциации газового гидрата и на динамику полей давления, температуры и насыщенных фаз в пористой среде.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 67 наименований. Общий объем диссертации составляет 95 страниц, в том числе 20 рисунков.

Личный вклад

В работах, выполненных в соавторстве, автор участвовал во всех этапах исследования от постановки задачи и выбора метода ее решения до получения и анализа результатов. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами. Автору полностью принадлежит численная реализация развитой физико-математической модели (в одно- и двумерной постановке) неизотермической фильтрации газа и воды с учетом разложения газового гидрата.

Апробация работы

Результаты исследований, приведённые в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону», Тюмень, 2018;
- Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации», Тюмень, 2019;
- XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск - Шерегеш, 2020;
- Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2020», Казань, 2020.

Отдельные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах ТюмФ ИТПМ СО РАН под руководством профессора А.А. Губайдуллина.

Публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 16 печатных работ, из которых 6 публикаций входят в издания из международных баз данных и 2 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Hydrate formation or decomposition in a porous medium» № 2017617298.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены актуальность темы, цели и задачи исследования; сформулированы положения и выводы, выносимые на защиту; обоснованы научная новизна, практическая и теоретическая значимость исследования; приведены данные об апробации результатов и публикациях по теме исследования.

В первой главе приводится обзор литературы, связанной с темой диссертации.

В пункте 1.1 приводится обзор источников, связанных с общим понятием о газовых гидратах, их структуре, условиях фазового равновесия, наличии и количестве на нашей планете.

В пункте 1.2 рассматриваются исследования, связанные со способами добычи газа из газовых гидратов [8]. Кроме классических подходов добычи газа с помощью изменения условий для фазового равновесия (уменьшения давления, повышения температуры) также рассмотрены работы по методу замещения газа из газовых гидратов. Выделены их главные преимущества и недостатки.

В пункте 1.3 приведен обзор имеющихся математических моделей и численных экспериментов, связанных с газовыми гидратами, за последние несколько десятилетий. Из данного обзора было отмечено, что процесс разложения газогидратов в основном рассматривается с точки зрения фазового равновесия, и только в некоторых случаях – как кинетический процесс с использованием модели Кима.

Во второй главе происходит развитие физико-математической модели процессов, происходящих при тепловом воздействии на гидратонасыщенный пористый пласт. Модель учитывает движение газа и воды в пористой среде, фазовые переходы, реальные свойства газа, эффекты Джоуля-Томсона и адиабатического расширения [5, 9]. В данной модели используются следующие допущения: гидрат – двухкомпонентная система с постоянной массовой концентрацией газа; пласт имеет непроницаемые границы; в любой точке пласта температура газа, жидкости, гидрата и пористой среды равны (однотемпературная модель); пласт имеет постоянную пористость; скелет пористой среды, газогидрат несжимаемы и неподвижны, вода в общем случае считается просто несжимаемой; капиллярные эффекты не рассматриваются.

Запишем уравнения сохранения масс газа, воды, газогидрата и скелета в общем виде (без учёта постоянства некоторых величин):

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(mS_g\rho_g) + \operatorname{div}(\rho_g\vec{w}_g) &= J_{h\rightarrow g}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(mS_w\rho_w) + \operatorname{div}(\rho_w\vec{w}_w) &= J_{h\rightarrow w}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(mS_h\rho_h) &= J_{g\rightarrow h} + J_{w\rightarrow h}, \\ \frac{\partial}{\partial t}((1-m)\rho_{sk}) &= 0, \\ S_g + S_w + S_h &= 1.\end{aligned}$$

Параметры с нижними индексами g , w , h и sk относятся к газу, воде, гидрату и скелету пористой среды, соответственно; t – время; m – пористость; S_j ($j = g, w, h$) – насыщенности пористой среды j -ым веществом; ρ_j ($j = g, w, h, sk$) – плотность j -го вещества; \vec{w}_g и \vec{w}_w – векторы скорости фильтрации газа и воды, соответственно; $J_{j \rightarrow k}$ ($j, k = g, w, h$) – интенсивности переходов j -го вещества в k -ое.

В качестве закона движения газа и воды примем линейный закон фильтрации Дарси:

$$\vec{w}_g = -\frac{kk_{rg}}{\mu_g}(\text{grad}p - \rho_g \vec{g}), \quad (1)$$

$$\vec{w}_w = -\frac{kk_{rw}}{\mu_w}(\text{grad}p - \rho_w \vec{g}), \quad (2)$$

где k – абсолютная проницаемость пласта; k_{rg} и k_{rw} – относительная фазовая проницаемость для газа и воды, соответственно; μ_g и μ_w – динамическая вязкость газа и воды, соответственно; p – давление; $\vec{g} = (0, 0, -g)$ – вектор ускорения свободного падения, с учётом, что вертикальная ось направлена вверх.

Относительные фазовые проницаемости для газа и воды рассчитываются согласно эмпирической зависимости Чень-Чжун-Сяня:

$$k_{rg} = \begin{cases} 0, 0 \leq S_g \leq 0, 1; \\ \left(\frac{S_g - 0, 1}{0, 9}\right)^{3, 5} (4 - 3S_g), 0, 1 < S_g \leq 1. \end{cases} \quad k_{rw} = \begin{cases} 0, 0 \leq S_w \leq 0, 2; \\ \left(\frac{S_w - 0, 2}{0, 8}\right)^{3, 5}, 0, 2 < S_w \leq 1. \end{cases}$$

Примем следующие уравнения состояния для газа и воды. Для коэффициента сверхсжимаемости газа будем использовать уравнение Латонова – Гуревича, которое подходит как для однокомпонентного газа, так и для газовых смесей, состоящих из углеводородных газов, углекислого газа и азота:

$$p = z_g \rho_g R_g T, \quad \rho_w = \text{const}, \quad (3)$$

$$z_g = \left(0, 4 \cdot \lg\left(\frac{T}{T_c}\right) + 0, 73\right)^{\frac{p}{p_c}} + 0, 1 \frac{p}{p_c}, \quad (4)$$

Здесь z_g – коэффициент сверхсжимаемости газа; R_g – удельная газовая постоянная; T – температура.

После преобразований предыдущих уравнений в итоге получим искомое уравнение для расчета давления и водонасыщенности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} = & \frac{p}{z_g} \frac{\partial z_g}{\partial t} + \frac{p}{T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{p}{S_g} \frac{\partial S_h}{\partial t} \left(1 - \frac{G \rho_h}{\rho_g} - \frac{(1-G) \rho_h}{\rho_w}\right) + \\ & + \frac{z_g R_g T}{m S_g} \text{div} \left(\rho_g \frac{kk_{rg}}{\mu_g} (\text{grad}p - \rho_g \vec{g}) \right) + \frac{z_g \rho_g R_g T}{m S_g \mu_w} \text{div} (kk_{rw} (\text{grad}p - \rho_w \vec{g})). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{1}{m \mu_w} \text{div} (kk_{rw} (\text{grad}p - \rho_w \vec{g})) - \frac{(1-G) \rho_h}{\rho_w} \frac{\partial S_h}{\partial t}. \quad (6)$$

Уравнение притока тепла для расчета температуры запишем в следующем общем виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = m S_g \rho_g c_g \eta_g \frac{\partial p}{\partial t} + m \rho_h L_h \frac{\partial S_h}{\partial t} + \text{div}(\lambda \text{grad} T) - \rho_g c_g \vec{w}_g \cdot \left(\text{grad} T + \varepsilon_g \text{grad} p - \frac{\vec{g}}{c_g} \right) - \rho_w c_w \vec{w}_w \cdot \left(\text{grad} T + \varepsilon_w \text{grad} p - \frac{\vec{g}}{c_w} \right). \quad (7)$$

$$\varepsilon_g = - \frac{1}{\rho_g c_g} \frac{T}{z_g} \frac{\partial z_g}{\partial T} \Big|_p, \quad \eta_g = \frac{1}{\rho_g c_g} - \varepsilon_g, \quad \varepsilon_w = \frac{1}{\rho_w c_w}.$$

$$\rho c = (1 - m) \rho_{sk} c_{sk} + m \sum_{j=g,w,h} S_j \rho_j c_j, \quad \lambda = (1 - m) \lambda_{sk} + m \sum_{j=g,w,h} S_j \lambda_j.$$

Здесь ε_i ($i = g, w$) – коэффициент Джоуля-Томпсона i -ой фазы, η_g – коэффициент адиабатического охлаждения газа; L_h – теплота разложения газового гидрата; ρ_{sk} – плотность скелета пористой среды; c_i и λ_i ($i = sk, g, w, h$) – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности i -ой фазы.

Система уравнений (1)-(7) с необходимыми начальными и граничными условиями описывает процесс неизотермической фильтрации газа и воды с учетом образования или разложения газового гидрата.

Физико-математическая модель в дальнейшем рассматривается в двух частных случаях: одномерный радиальный случай закачки теплого газа в гидратонасыщенную залежь и двумерный плоскопараллельный случай нагрева верхней границы данной залежи.

В диссертации рассмотрен одномерный плоскорадиальный случай неизотермической фильтрации газа с учетом фазового перехода «гидрат метана \leftrightarrow метан + вода», когда через скважину, вскрывшую пласт на всю толщину, в некоторый момент времени начинается закачка теплого (с температурой выше исходной температуры пласта) газа с постоянным массовым расходом Q_e (на единицу высоты скважины) (рис. 1) [1]. Так как рассматривается случай относительно небольшой (до 0,3) исходной гидратонасыщенности (соответственно и водонасыщенности), то вода является неподвижной фазой.

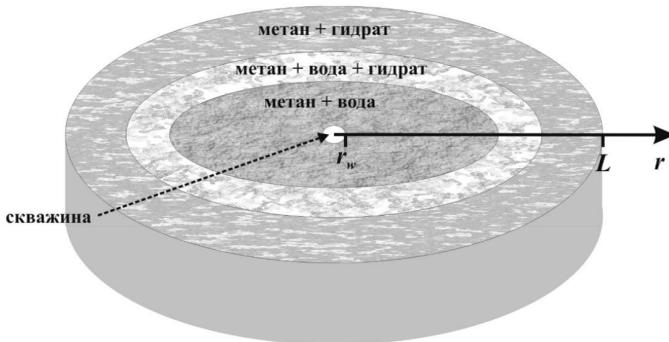


Рисунок 1. Схема задачи для одномерного плоскорадиального случая, r_w – радиус скважины.

Данный пласт в исходном состоянии заполнен газом (одноименный закачиваемому) и его гидратом, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют термодинамическим условиям их существования в свободном состоянии. Температура нагнетаемого в пласт газа T_e является постоянной величиной и $T_e > T_0$.

Обозначим начальное и граничные условия:

$$t = 0, r_w \leq r \leq L: p = p_0, T = T_0, S_h = S_{h0}, S_g = 1 - S_{h0}, S_w = 0,$$

$$t > 0: \begin{cases} r = r_w: Q = Q_e = \text{const}, T = T_e = \text{const}, \\ r = L: \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Здесь L – протяженность (радиус) пласта, p_0, T_0 – начальные давление и температура в пласте, S_{h0} – начальная гидратонасыщенность.

Также в работе рассмотрен случай неизотермического газожидкостного течения с учетом фазовых переходов в двумерном плоскопараллельном приближении (рис. 2) [5, 6]. В данной модели исследуется пласт длиной L и глубиной H , соответствующими для них координатами являются x и y . Как и в предыдущей модели, данный пласт в исходном состоянии заполнен газом и его гидратом, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют термодинамическим условиям их существования в свободном состоянии. На верхней границе пласта происходит нагрев при температуре T_e , которая является постоянной величиной и $T_e > T_0$.

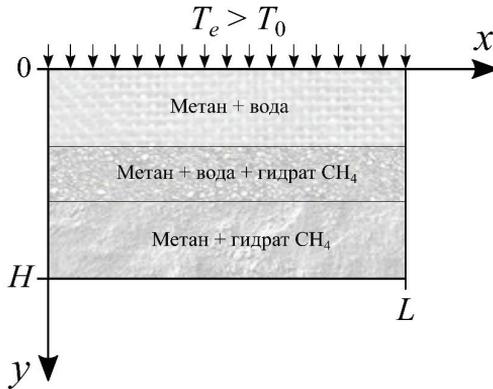


Рисунок 2. Схема задачи для двумерного плоскопараллельного случая.

Зададим начальные и граничные условия для задачи, при которой на верхней границе пласта, изначально содержащего газ и его гидрат, температура T_e будет выше температуры фазового равновесия для гидрата:

$$t = 0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H: p = p_0, T = T_0, S_h = S_{h0}, S_w = 0, S_g = 1 - S_{h0};$$

$$t > 0: \begin{cases} x = 0: w_{ix} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0; x = L: w_{ix} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \\ y = 0: w_{iy} = 0, T = T_e; y = H: w_{iy} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \end{cases}$$

Здесь L – длина пласта, H – глубина пласта, T_e – внешняя температура на верхней границе условного пласта.

Значения равновесной температуры и давления фазового перехода вычисляются с помощью следующей корреляции:

$$\left\{ p_h = \exp \left(A_0 + \frac{A_1}{T_{ij}^{k+1}/T^*} + \frac{A_2}{(T_{ij}^{k+1}/T^*)^2} \right) \cdot 10^6; T_h = \frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 + 4 \cdot A_2 \cdot (\ln(p_{ij}^{k+1}/p^*) - A_0)}}{2 \cdot (\ln(p_{ij}^{k+1}/p^*) - A_0)} \right\}, \quad (8)$$

где размерность давления – Па; размерность температуры – К; $p^* = 1$ МПа; $T^* = 1$ К; T_h, p_h – равновесные температура и давление; A_0, A_1, A_2 – эмпирические коэффициенты, имеющие следующие значения для диапазонов температур, когда одной из фаз является либо лед, либо вода:

$$180 \leq T \leq 273: A_0 = \ln(2.6) - A_1/273 - A_2/273^2; A_1 = -2768; A_2 = 69900;$$

$$273 < T \leq 302: A_0 = \ln(2.6) - A_1/273 - A_2/273^2; A_1 = -61987; A_2 = 7526200.$$

В третьей главе представлен алгоритм решения представленной задачи с использованием полученных дискретных аналогов уравнений (5)-(7). Для расчета параметров с помощью данного алгоритма используются неявная разностная схема, алгоритм Томаса и метод последовательных приближений [5, 7, 9].

Для расчета гидратонасыщенности с использованием корреляции (8) вычисляются значения температуры и давления фазового равновесия:

Рассчитываем возможное изменения гидратонасыщенности из-за изменений условия фазового равновесия:

$$\Delta S_h = \min \left\{ \Delta S_h^T = \frac{(\rho c)_{ij}^{k+1}}{m \rho_h L_h} |T_{ij}^{k+1} - T_h|; \Delta S_h^p = \frac{(S_g)_{ij}^{iter} (\rho_g)_{ij}^{k+1}}{G \rho_h p_{ij}^{k+1}} |p_h - p_{ij}^{k+1}|; \Delta S_h^w = \frac{\rho_w (S_w)_{ij}^{iter}}{\rho_h (1 - G)} \right\}.$$

где iter – итерационное значение параметра.

Если значение температуры на новом шаге по времени больше температуры фазового перехода и гидрат присутствует в пласте, то термодинамические условия допускают разложение гидрата и его количество, которое может разложиться:

$$\Delta S_h = -\min\{\Delta S_h^T, \Delta S_h^p, (S_h)_{ij}^{iter}\}.$$

Если значение температуры на новом шаге по времени меньше температуры фазового перехода и гидратообразователи присутствует в пласте, то данные условия допускают образование гидрата и максимальное количество гидрата, которое может образоваться:

$$\Delta S_h = +\min\{\Delta S_h^T, \Delta S_h^p, \Delta S_h^w\}.$$

Далее с учетом рассчитанного изменения находим гидратонасыщенность на новом шаге по времени:

$$(S_h)_{i,j}^{k+1} = (S_h)_{i,j}^{\text{iter}} + \Delta S_h.$$

На основе изложенного алгоритма решения были разработаны программные продукты для расчета в одномерном [4, 17] и двумерном [5] случаях параметров неизотермического фильтрационного течения газа и воды с учетом разложения в пористой среде газового гидрата.

В четвертой главе представлены численные решения рассматриваемых в данной работе задач: закачки теплого газа в гидратонасыщенную залежь и нагрева верхней границы пористого пласта с газогидратом.

В пункте 4.1 при проведении расчетов для задачи о закачке теплого газа в гидратонасыщенную залежь в одномерном радиальном случае были приняты следующие общие значения используемых параметров: $Q_e = 0.02$ кг/(м·сек); $T_e = 293$ К; $L = 100$ м; $T_0 = 281$ К; $p_0 = 6$ МПа. $S_{h0} = 0.2$; $k = 10^{-15}$ м²; $m = 0.1$; $G = 0.12$. Все остальные необходимые значения совпадают со значениями в указанных публикациях автора [1, 3, 4, 7].

В диссертации для тестирования программных продуктов и алгоритма было проведено сравнение результатов расчетов с автомодельными решениями из диссертационной работы М.К. Хасанова (рис. 3). В физико-математической модели настоящей работы, в отличие от упомянутой работы, учитываются неидеальность газа и неизотермические эффекты при его фильтрации. Чтобы оценить вклад указанных факторов, на рис. 3 также приведены распределения параметров, рассчитанные по предложенной модели.

На рис. 3 видно хорошее согласие результатов численного и автомодельного решений для случая идеального газа. Кроме того, из сравнения результатов расчетов следует, что учет свойств реального газа и неизотермических эффектов оказывает достаточно существенное влияние на результаты расчетов полей давления, температуры и гидратонасыщенности в пористой среде. Таким образом, при расчетах необходимо учитывать вклад этих факторов.

Были проведены вычислительные эксперименты для выявления исходных параметров пласта, а также значений параметров нагнетаемого газа, при которых может возникнуть протяженная (объемная) зона разложения газового гидрата, где три фазы (газ, вода и газогидрат) находятся одновременно в состоянии термодинамического равновесия.

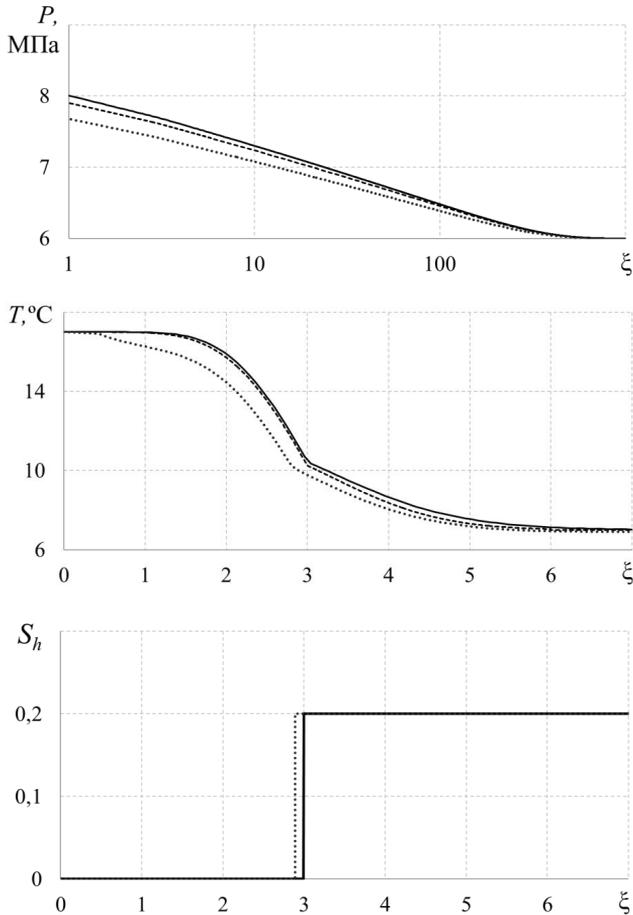


Рисунок 3. Распределения давления, температуры и гидратонасыщенности по автомодельной координате ξ . Сплошная и штриховая линия – численное и автомодельное решения для случая идеального газа; пунктирная – численное решение с учетом неизотермических эффектов и неидеальности газа.

На рис. 4 представлены распределения параметров в различные моменты времени после начала закачки теплого ($T_e > T_0$) газа в гидратонасыщенный пласт [1]. Можно видеть, рост со временем протяженности ближней области пласта, насыщенной только газом и водой, однако стоит отметить падение темпов увеличения зоны с уже разложившимся газогидратом. В любой момент времени температура в одной зоне пласта (без газогидрата) выше равновесной температуры $T_s(p)$, а в другой (содержащей газогидрат) – ниже. Данный процесс разложения гидрата адекватно описывается фронтальной схемой.

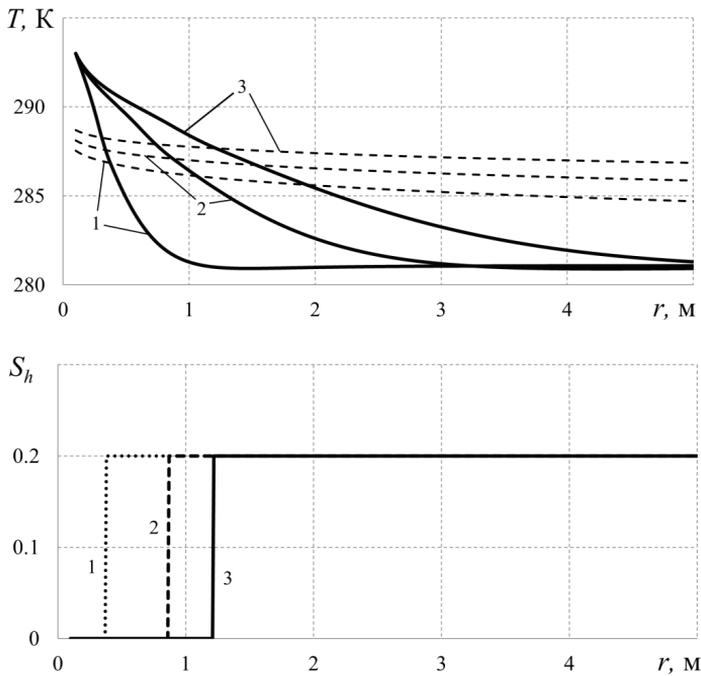


Рисунок 4. Распределение по координате r температуры и гидратонасыщенности в моменты времени $t = 1, 10$ и 30 сут (линии 1, 2 и 3 соответственно) после начала закачки газа. Здесь и далее на рисунке с распределением температуры сплошные линии соответствуют текущей температуре в пласте, штриховые – равновесной температуре разложения газового гидрата $T_s(p)$.

При различной температуре закачиваемого метана в пласт, изначально насыщенный метаном и его гидратом, вычислительные эксперименты показали, что диссоциация газового гидрата также происходит на фронтальной поверхности при любом из рассмотренных значений T_e (рис. 5) [1]. Расчеты с еще более высокими значениями T_e не выявили таких температур, при которых в пласте возникла бы протяженная зона фазового перехода (содержащая все три фазы).

Данное поведение объясняется тем, что для реальных пластов значение коэффициента пьезопроводности $\chi^{(p)} = kk_{rg}p/\mu_g m$ на несколько порядков превышает значение коэффициента температуропроводности $\chi^{(T)} = \lambda/\rho c$. Т.е. температура от границы диссоциации гидрата к внешней границе пласта убывает быстрее, чем давление, а значит и связанная с ним равновесная температура разложения газогидрата. Однако для возникновения протяженной зоны диссоциации газогидрата равновесная температура разложения гидрата должна быть ниже текущей температуры пласта, что не выполняется в любой точке дальней области пласта и предотвращает диссоциацию газогидрата.

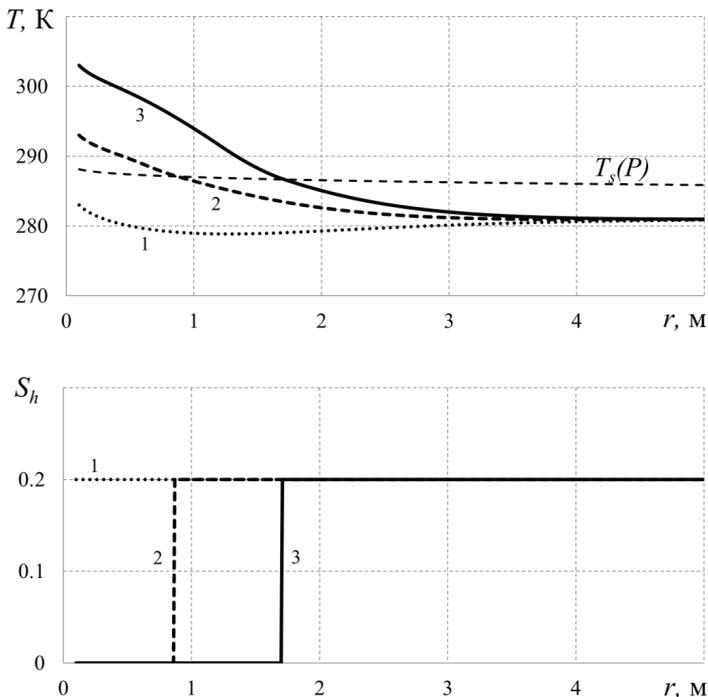


Рисунок 5. Распределение по координате r температуры и гидратонасыщенности при различной температуре $T_e = 283, 293$ и 303 К (линии 1, 2 и 3 соответственно) закачиваемого в пласт газа. Время нагнетания газа $t = 10$ сут.

Можно заметить из рис. 5, что при температуре закачиваемого газа $T_e = 283$ К (когда не происходит разложения гидрата метана) температура в пласте на некотором участке становится меньше исходной температуры пласта. Это обусловлено учтенным в физико-математической модели действием эффекта Джоуля-Томсона.

Распределения параметров при различных массовых расходах Q_e спустя 10 суток после начала закачки газа представлены на рис. 6 [1]. Из результатов на данном рисунке видно, что вновь имеет место фронтальная схема разложения газового гидрата. Увеличение массового расхода газа Q_e , закачиваемого в пласт, не приводит к увеличению скорости разложения газогидрата, что связано с повышением давления в пласте при большей величине Q_e , а значит и повышением равновесной температуры разложения гидрата. При этом граница фазового перехода смещается ближе к левой границе пласта.

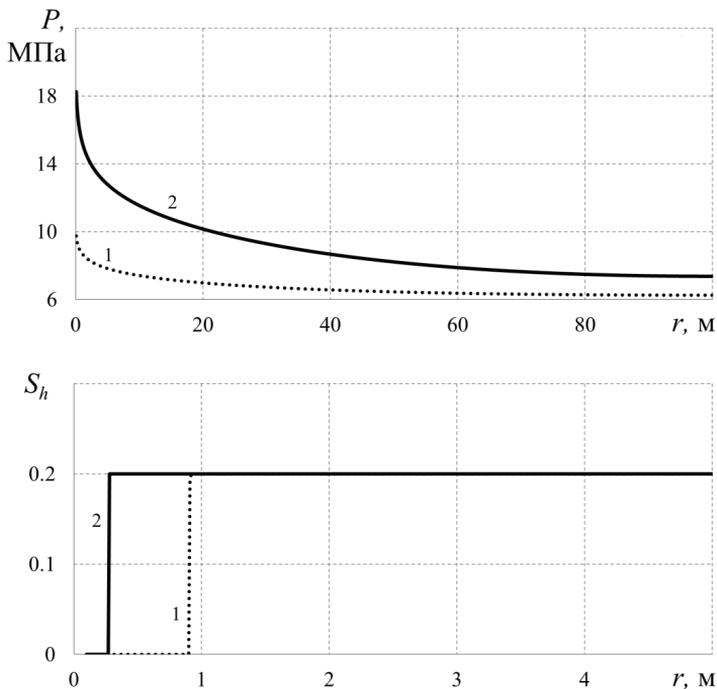


Рисунок 6. Распределение по координате r давления и гидратонасыщенности при различных массовых расходах $Q_{es} = 0.01$ и 0.05 кг/(м·сек) (линии 1 и 2 соответственно) на скважине.

Рассмотрим также случай различных значений исходной гидратонасыщенности пласта S_{h0} (рис. 7) [1]. Можно заметить, что при увеличении значения S_{h0} протяженность зоны пласта без гидрата уменьшается. При всех рассмотренных значениях начальной гидратонасыщенности для разложения газогидрата характерна фронтальная схема. Меньшее значение температуры пласта при большем значении S_{h0} обусловлено большей степенью поглощения тепла при диссоциации гидрата.

В пункте 4.2 были проведены вычислительные эксперименты по изучению влияния параметров системы «пористый пласт – насыщающий флюид» и температуры на верхней границе пористого резервуара на распределение параметров в рассматриваемой области пористого пласта. При проведении расчетов были приняты следующие значения используемых параметров: $T_e = 276$ К; $L = 100$ м; $H = 10$ м; $T_0 = 273$ К; $p_0 = 3$ МПа; $S_{h0} = 0.6$; $k = 10^{-15}$ м²; $m = 0.1$; $G = 0.12$ [5, 6].

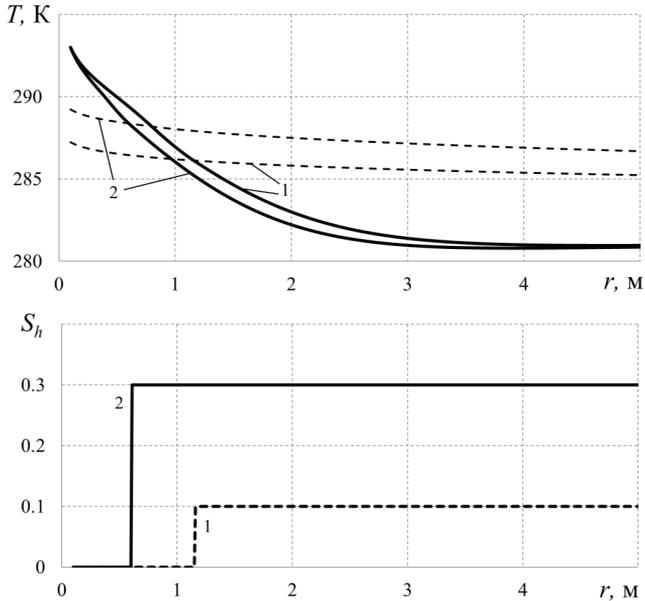


Рисунок 7. Распределения температуры и гидратонасыщенности при различных значениях начальной гидратонасыщенности $S_{h0} = 0.1$ и 0.3 (линии 1 и 2 соответственно).

На рис. 8 представлены распределения параметров системы через 1 сутки после повышения температуры на верхней границе гидратосодержащей залежи [6]. Видно, что при принятых значениях исходных параметров разложение гидрата метана происходит лишь на небольшом участке, примыкающем к верхней границе. Также стоит отметить фронтальный режим диссоциации газогидрата, т.е. отсутствует трехфазная зона, содержащая в порах метан, воду и гидрат CH_4 . Фазовый переход полностью происходит на поверхности, разделяющей первую зону пласта, насыщенную метаном и водой, и вторую, не затронутую процессом повышения температуры на верхней границе пласта. Этот факт подтверждают предыдущие выводы, где для одномерного случая показано, что при тепловом воздействии на гидратонасыщенную залежь, коэффициент пьезопроводности которой превышает коэффициент температуропроводности, решений с протяженной областью фазовых переходов не существует [2].

На рис. 9 приведены распределения параметров системы с учетом повышения температуры T_e , при этом на участке длиной 20 метров на верхней границе гидратосодержащей залежи реализуется повышение температуры до значения T больше T_e ; середина участка совпадает с серединой рассматриваемой в задаче замкнутой области пористой среды [6]. Из данных, представленных на

данном рисунке, видно, что распределения параметров (особенно давления) имеют двумерный характер, который нельзя получить в рамках одномерной постановки задачи.

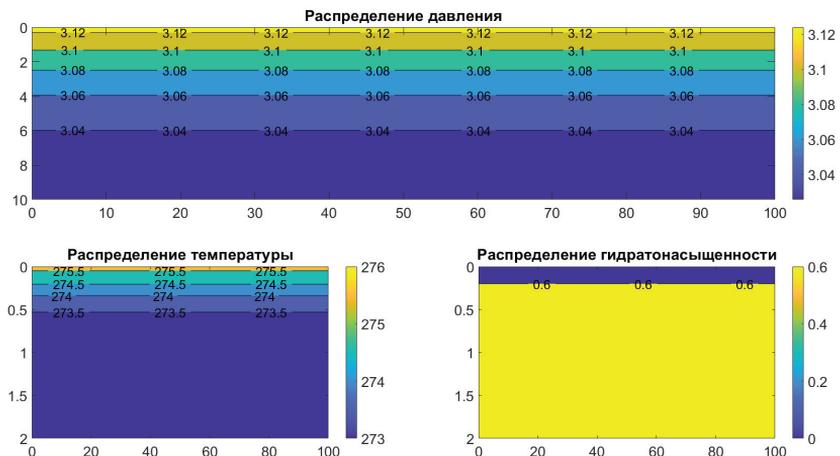


Рисунок 8. Распределение параметров системы «пористая среда – насыщающий флюид» по пространству на момент времени $t = 1$ сут. Размерность давления – МПа, температуры – К. Размерность пространства – в метрах.

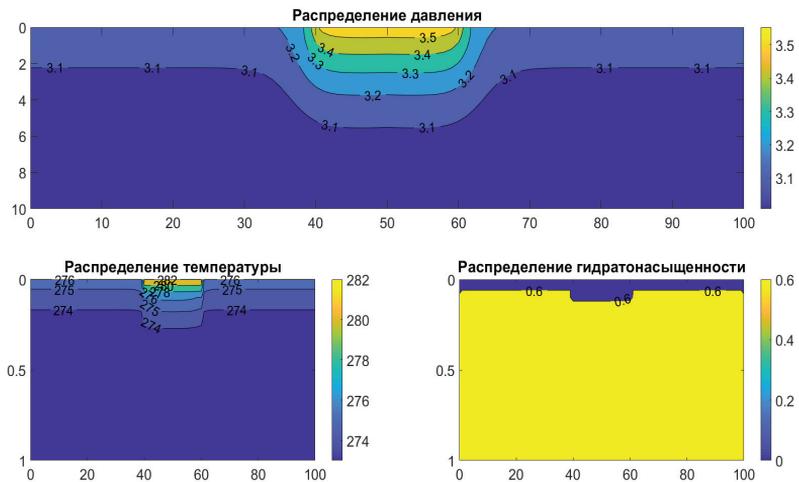


Рисунок 9. Распределение параметров системы «пористая среда – насыщающий флюид» по пространству на момент времени $t = 6$ часов.

На рис. 10 проиллюстрировано влияние времени t теплового воздействия на замкнутую область пористой среды, температуры на ее верхней границе T_e , начальной гидратонасыщенности S_{h0} и проницаемости пласта k на положение фронтальной поверхности фазовых переходов $y_{(s)}$ [6]. Значения $y_{(s)}$ приведены для середины пласта ($x = 50$ м) на момент времени $t = 7$ сут после повышения температуры на всей верхней границе гидратосодержащей залежи. Из данных, представленных на рис. 10, видно, что при росте значений t , T_e , k_0 и уменьшении S_{h0} протяженность первой зоны, примыкающей к верхней границе пласта, увеличивается, но размер участка, в котором газогидрат уже разложился, остается небольшим. Как показали расчеты, даже при очень больших значениях T_e (~ 50 °С), или t (порядка полугода), или k ($\sim 10^{-11}$ м²) газогидрат разлагается на расстоянии от верхней границы пласта, не превышающем одного метра. Такой стабильный характер «жизни» газогидратов в пористой среде вызван тем, что разложение газового гидрата имеет своим следствием значительное увеличение давления и соответствующее повышение равновесной температуры фазового перехода $T_s(p)$, что и не допускает диссоциацию гидрата метана в области, удаленной от верхней границы.

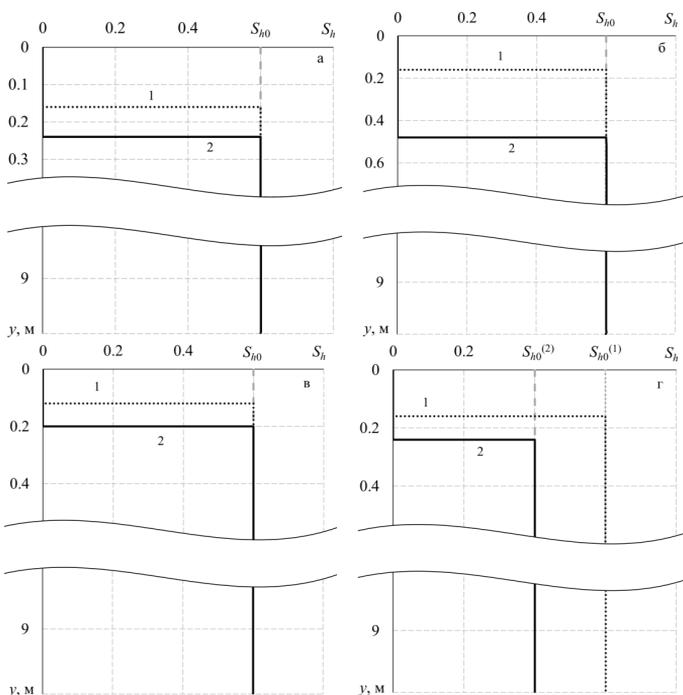


Рисунок 10. Изменение глубины $y_{(s)}$ зоны пласта, в которой гидрат метана уже разложился, при различных параметрах t , T_e , k и S_{h0} . Линии 1 и 2 соответствуют: а – $t = 7$ и 30 сут; б – $T_e = 276$ и 282 К; в – $k_0 = 10^{-16}$ и 10^{-14} м²; г – $S_{h0} = 0.6$ и 0.4.

На рис. 11 и 12 представлены распределения температуры и гидратонасыщенности через 7 суток после повышения температуры для двух значений T_e и для случая кусочно-постоянной функции температуры на верхней границе пласта (аналогично рис. 9) [6]. Можно видеть, что при большем значении T_e имеет место большая протяженность зоны без газогидрата. При этом, как и следовало ожидать, наибольшая глубина диссоциации гидрата метана достигается в середине «пятна» ($x = 50$ м). Также стоит отметить, что глубина разложения газогидрата на участках пласта, примыкающих к его левой и правой границам, несколько больше, чем для участков, соседствующих с «пятном». На наш взгляд, это связано с тем, что давление и соответствующая ему температура фазового равновесия при разложении газогидрата имеет меньшие значения в зонах у левой и правой границ пласта, чем в зоне рядом с «пятном». При этом температура пласта в указанных участках имеет практически одинаковые значения.

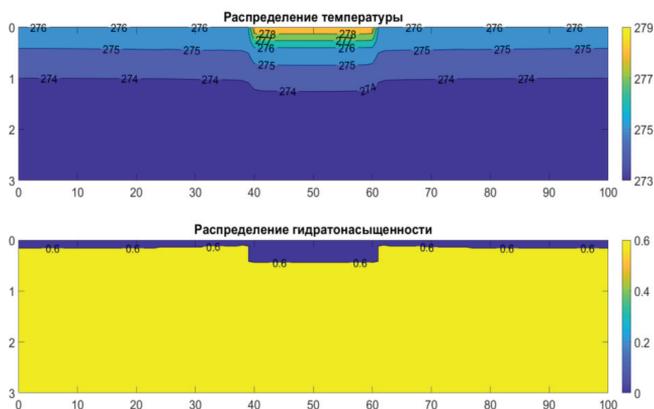


Рисунок 11. Распределения температуры и гидратонасыщенности при температуре на «пятне» $T_e = 279$ К на момент времени $t = 7$ сут.

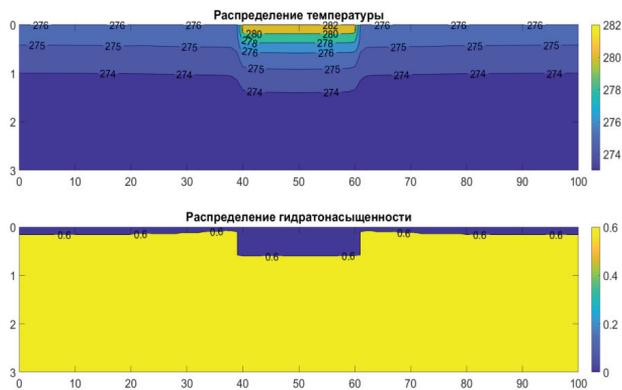


Рисунок 12. Распределения температуры и гидратонасыщенности при температуре на «пятне» $T_e = 282$ К на момент времени $t = 7$ сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено исследование неизотермической фильтрации флюидов (газа и воды) в пористом гидратосодержащем пласте с учетом разложения газового гидрата. Основные результаты и выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Для случая теплового воздействия на гидратосодержащую залежь развита физико-математическая модель тепло- и массопереноса при неизотермической фильтрации с учетом дополнительных факторов: движения в пористой среде газа и воды, фазовых переходов, реальных свойств газа, эффекта Джоуля-Томсона и эффекта адиабатического расширения. Данная модель позволяет адекватно описывать процесс теплового воздействия на пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии метаном и его гидратом.

2. Разработаны алгоритм и программные продукты, которые позволяют проводить численные эксперименты по установлению особенностей неизотермического фильтрационного течения при изменении параметров теплового воздействия и различных исходных характеристиках пласта.

3. Представлена оригинальная методика расчета насыщенностей фаз для процесса разложения газового гидрата в пористой среде при тепловом воздействии на гидратосодержащую залежь; в основе данной методики лежит допущение о равновесности фазового перехода.

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

5. При численном исследовании закачки теплого (с температурой выше исходной температуры пласта) газа в гидратосодержащий пласт показано, что с повышением температуры закачиваемого газа растет протяженность зоны, насыщенной продуктами разложения гидрата метана, но этот рост не является значительным. Установлено, что большее значение исходной гидратонасыщенности пласта приводит к меньшей протяженности зоны пористой среды, в которой газовый гидрат уже разложился. Показано, что увеличение массового расхода закачиваемого теплого газа в пласт не приводит к увеличению зоны разложения газового гидрата в гидратонасыщенной залежи.

6. Численное исследование теплового воздействия (повышение температуры на верхней границе пласта) на гидратосодержащий пласт с непроницаемыми границами показало, что с ростом температуры на верхней границе пористого резервуара, снижением начальной гидратонасыщенности и увеличением исходной проницаемости пласта протяженность зоны, насыщенной продуктами разложения гидрата метана, увеличивается. Показан стабильный характер «жизни» газогидратов в пористой среде, т.е. протяженность зоны, в которой газогидрат уже разложился, остается относительно небольшой ($\sim 0,1-1$ м) на протяжении значительного интервала времени при варьировании в достаточно широком диапазоне параметров теплового воздействия и исходных параметров пористой среды.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, входящих в международные базы данных:

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

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

2. Musakaev N. G. The problem of heat exposure to a closed hydrate-saturated area of a porous stratum / N. G. Musakaev, S. L. Borodin, D. S. Belskikh // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2125. 020021.

3. Musakaev N. G. Numerical research of the gas extraction methods from a deposit saturated with methane its hydrate / N. G. Musakaev, S. L. Borodin, D. S. Belskikh // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2125. 030114.

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

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

6. Musakaev N. G. Numerical study of the process of gas hydrate decomposition under the thermal impact on the hydrate-containing region of a porous formation / N. G. Musakaev, D. S. Belskikh // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2021. Vol. 163. No 2. Pp. 153-166.

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

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

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

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

В других изданиях:

9. Мусакаев Н. Г. Математическая модель и алгоритм решения задачи неизотермической фильтрации газа в пласте с учетом разложения гидрата / Н. Г. Муса-

каев, С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2017. Том 9. № 2. С. 22-29.

10. Бельских Д. С. Обзор современного состояния исследования исследований, связанных с извлечением метана из гидратосодержащей пористой среды путем замещения диоксидом углерода / Д. С. Бельских, С. Л. Бородин // материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону», ТИУ, Тюмень. 2018. С. 147-149.

11. Мусакаев Н. Г. Математическое моделирование процесса нагнетания теплого газа в насыщенный метаном и его гидратом пласт / Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 4. С. 68-74.

12. Мусакаев Н. Г. Теоретическое исследование двухфазного течения в пористом коллекторе с учетом разложения газового гидрата / Н. Г. Мусакаев, Д. С. Бельских // Материалы Национальной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации», ТИУ, Тюмень. 2019. С. 81-83.

13. Бельских Д. С. Математическое моделирование двухфазного течения в пористом коллекторе с учетом разложения газового гидрата / Д. С. Бельских, Н. Г. Мусакаев // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск. 2020. С. 21-22.

14. Бородин С. Л. Математическое моделирование и численная реализация задачи фильтрации в пористой среде, изначально насыщенной метаном и его гидратом, метана и углекислого газа, с учетом образования или разложения гидратов этих газов / С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск. 2020. С. 27-28.

15. Бородин С. Л. Численные эксперименты по фильтрации в пористой среде, изначально насыщенной метаном и его гидратом, метана и углекислого газа, с учетом образования или разложения гидратов этих газов / С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск. 2020. С. 29-30.

16. Мусакаев Н. Г. Численное исследование неизотермического газожидкостного течения в пористой среде при наличии фазовых переходов / Н. Г. Мусакаев, Д. С. Бельских // Материалы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды – 2020», Казань. 2020. С. 302-305.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

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

Подписано в печать 24.03.2022. Тираж 120 экз
Объём 1.0 уч. изд. л. Формат 60×84/16. Заказ 112.

Издательство Тюменского государственного университета
625002, г. Тюмень, ул. Осипенко, 81
Тел.: (3452) 59-74-81, 59-75-93
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru