

На правах рукописи

ХАСАНОВ МАРАТ КАМИЛОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ
ГАЗОГИДРАТОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ
ПРИ ИНЖЕКЦИИ ГАЗА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2007

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и механики
Стерлитамакской государственной педагогической академии

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шагапов Владислав Шайхулагзамович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент
Мусакаев Наиль Габсалямович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Федоров Константин Михайлович;
доктор физико-математических наук, профессор
Калиев Ибрагим Адиетович

Ведущая организация: Башкирский государственный университет

Защита диссертации состоится «_____» октября 2007 г. в _____ час. на
заседании диссертационного совета ДМ 212.274.09 в Тюменском
государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская,
д. 15^А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского
государственного университета по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Семакова,
д. 10.

Автореферат разослан «_____» сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



А.В. Татосов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Настоящий момент характеризуется значительным научным и практическим интересом к процессам образования и разложения газогидратов. За последние десятилетия накоплен большой объем информации по распространению скоплений газа в твердом гидратном состоянии. Имеются сведения о большом количестве (более ста) газогидратных залежей, выявленных как в недрах Земли, так и на дне Мирового океана и распространенных по всему миру. К настоящему времени разведанные запасы углеводородного сырья (в основном метана) в газогидратном виде весьма велики и заметно превышают запасы природного газа в свободном состоянии. В связи с этим в последние десятилетия прошлого века и особенно в настоящее время возрос интерес к исследованиям и разработкам технологий, позволяющих использовать широко распространенные в природе газовые гидраты в виде альтернативного углеводородного сырья. Кроме того, многие технологические процессы в нефтегазовой отрасли сопровождаются образованием и отложением газовых гидратов, как в пласте, так и в системах подземного и наземного оборудования нефтяных и газовых месторождений. В настоящее время в большинстве случаев гидратообразование носит чаще негативный характер, связанный с аварийными остановками из-за «склероза» установок и с последующими затратами на устранение таких осложнений. Однако процессы гидратообразования могут иметь и положительный аспект, например, использованы для увеличения емкости подземных резервуаров для хранения углеводородного газа. Такая возможность обусловлена резким ростом массового содержания газа в газогидратном состоянии в единице объема по сравнению со свободным состоянием при той же температуре и давлении. Также в целях уменьшения объема парниковых газов и их последующего безопасного захоронения рядом исследователей предлагается подземная газогидратная консервация данных газов, которая обеспечивает высокий уровень безопасности хранения и имеет небольшие энергетические затраты.

Для разработки научных основ технологий, позволяющих практически использовать процессы разложения и образования газовых гидратов в пористых средах, необходимо построение адекватных математических моделей для проведения теоретических исследований указанных процессов, что определило **цель настоящей работы:**

– теоретическое изучение процессов, происходящих в пористых структурах, насыщенных газом, водой и гидратом, при закачке в них холодного или теплого газа;

– математическое исследование воздействия на насыщенные газом, водой и гидратом пористые среды посредством инжекции холодного или теплого газа;

– анализ влияния различных параметров, определяющих состояние пористой среды, а также интенсивности воздействия на динамику гидродинамических и температурных полей в пористой структуре.

Научная новизна заключается в следующем:

- решены автомодельные задачи о закачке холодного (с температурой меньшей исходной температуры пласта) газа в пористую среду, насыщенную газом и водой, и о закачке теплого (с температурой большей исходной температуры пласта) газа в пористую среду, насыщенную газом и гидратом; построены аналитические решения данных задач, описывающие распределения основных параметров в пласте.

- установлены основные закономерности разложения и образования газогидратов в пористых пластах при инъекции газа в зависимости от интенсивности закачки и исходных параметров пористой среды.

- показано, что при инъекции холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой, возможны различные режимы образования газогидрата, соответствующие формированию, как фронтальной поверхности, так и объемной области фазовых переходов.

- получены критические условия, разделяющие разные режимы образования газогидрата.

Достоверность результатов диссертации основана на использовании фундаментальных уравнений теории фильтрации многофазных систем, корректной теоретической постановкой задач, а также получением решений, непротиворечащих общим гидродинамическим и термодинамическим представлениям и согласующихся в некоторых частных случаях с результатами других исследователей.

Практическая ценность. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке научных основ технологий хранения и консервации газа, различных методов добычи углеводородного сырья.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях и научных школах:

- научные семинары кафедры прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии под руководством член-корр. АН РБ, д.ф.-м.н. Шагапова В.Ш. (2003–2007 гг.).
- Международная научная конференция «Спектральная теория дифференциальных операторов и родственные проблемы», (Стерлитамак, 2003).
- III, IV и VI Всероссийская научно-практическая конференция «ЭВТ в обучении и моделировании» (Бирск, 2004, 2005, 2007 гг.).
- Всероссийская научная конференция «Современные проблемы физики и математики» (Стерлитамак, 2004).
- Международная научно-техническая конференция «Нефть и газ Западной Сибири» (Тюмень, 2005).
- V Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2005).

- Международная Уфимская зимняя школа-конференция по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2005).
- Всероссийская научно-практическая конференция «Наука и образование» (Нефтекамск, 2005).
- VI Международная конференция «Химия нефти и газа» (Томск, 2006).
- Региональная школа-конференция молодых ученых (Стерлитамак, 2006).
- Российская конференция «Механика и химическая физика сплошных сред» (Бирск, 2007).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 113 страницах и иллюстрирована 22 рисунками. Список литературы состоит из 62 наименований.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в тринадцати работах, список которых приведен в конце автореферата.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отмечена научная новизна, сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных исследованию газовых гидратов и особенностям их образования и разложения в пористой среде. Приведена система уравнений, описывающая образование и разложение газогидратов в пористой среде.

В п. 1.1 кратко приведены основные сведения о газовых гидратах.

В п. 1.2 выполнен обзор исследований, посвященных математическому моделированию процессов образования и разложения газогидратов в пористых средах.

В п. 1.3 приводятся основные допущения и полная система уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса, сопровождающиеся образованием или разложением газогидрата в пористой среде.

Система основных уравнений, представляющая собой законы сохранения масс, энергии и закон Дарси, при допущениях о несжимаемости и неподвижности скелета пористой среды, гидрата и воды, а также пренебрежении баротермическим эффектом имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g m S_g + \rho_h m S_h G) + \operatorname{div}(\rho_g m S_g \vec{v}_g) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m \rho_l S_l + m(1 - G) \rho_h S_h) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + \rho_g c_g m S_g \bar{v}_g \text{grad} T = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \frac{\partial}{\partial t}(m \rho_h S_h L_h),$$

$$m S_g \bar{v}_g = -\frac{k_g}{\mu_g} \text{grad} p,$$

где m – пористость; G – массовая концентрация газа в гидрате; ρ_j и S_j ($j = sk, h, l, g$) – истинные плотности и насыщенности пор j -ой фазы; \bar{v}_g , k_g , c_g и μ_g – соответственно скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы; p – давление; T – температура; L_h – удельная теплота гидратообразования; ρc и λ – удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы; индексы sk, h, l и g относятся к параметрам скелета, гидрата, воды и газа соответственно.

Показано, что для случая, когда исходная водонасыщенность пор менее половины (в работе рассматривается именно такой случай) воду можно считать неподвижной, т.е. заменить двухфазную фильтрацию однофазной фильтрацией газа. Кроме того, показано, что при отмеченных выше допущениях можно пренебречь переменностью удельной объемной теплоемкости ρc и коэффициента теплопроводности системы λ .

Газ принят калорически совершенным:

$$p = \rho_g R_g T.$$

Данная система уравнений дополняется зависимостью коэффициента проницаемости для газа от газонасыщенности, заданной на основе формулы Козени.

При образовании или разложении газогидрата в пористом пласте возникают зоны, в которых газ, вода и гидрат могут находиться в различных состояниях. На поверхностях разрыва между этими зонами, где терпят скачки насыщенности фаз, а также потоки массы и тепла, выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы и тепла:

$$\begin{aligned} [m(S_h \rho_h (1 - G) + S_l \rho_l) \bar{D}_{(s)}] &= 0, \\ [m(\rho_g S_g (\bar{v}_g - \bar{D}_{(s)}) - \rho_h S_h G \bar{D}_{(s)})] &= 0, \\ [\lambda \text{grad} T] &= [m \rho_h L_h S_h \bar{D}_{(s)}]. \end{aligned}$$

Здесь $[\psi]$ – скачок параметра ψ на границе между зонами; $\bar{D}_{(s)}$ – скорость движения этой границы. Температура и давление на этих границах полагаются непрерывными.

В трехфазной области, где одновременно присутствуют газ, вода и гидрат и происходит процесс образования или разложения газогидрата, принимается условие равновесия фаз:

$$T = T_0 + T_* \ln\left(\frac{p}{p_{s0}}\right),$$

где T_0 – исходная температура системы, p_{s0} – равновесное давление, соответствующее исходной температуре, T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Во второй главе в автомодельном приближении решены одномерные задачи об образовании газогидрата при закачке холодного газа в пористый пласт, насыщенный газом и водой. Рассмотрены задачи с фронтальной поверхностью фазовых переходов и объемной областью образования гидрата. Исследовано влияние интенсивности закачки, а также параметров, характеризующих исходное состояние пористой среды, на особенности протекания процесса.

В п. 2.1 рассмотрена задача об образовании газогидрата в диффузионном режиме, при котором скорость гидратообразования лимитируется кинетикой процесса, т.е. диффузией газа через твердую гидратную пленку, разделяющую газ и воду. Получено выражение для характерного времени полного перехода воды в гидратное состояние и сделана оценка для характерных размеров пористого образца, в котором скорость гидратообразования лимитируется кинетикой процесса.

В п. 2.2 решена плоскосимметричная задача о фронтальном образовании газогидрата при инъекции холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой. Полагается, что полубесконечный пористый пласт в начальный момент времени насыщен газом и водой, давление p_0 и температура T_0 которых в исходном состоянии соответствуют термодинамическим условиям существования их в свободном состоянии и изначально одинаковы во всем пласте. Через границу пласта закачивается газ (одноименный исходному), давление p_e и температура T_e которого соответствуют условиям образования газогидрата и поддерживаются на этой границе постоянными. При этом полагается, что в пласте возникает две области: ближняя, насыщенная газом и гидратом и дальняя, заполненная газом и водой, а образование газогидрата происходит на подвижной фронтальной поверхности разделяющей эти две области.

Сформулированная таким образом задача является автомодельной. Автомодельная переменная введена в виде:

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{\aleph^{(T)}t}},$$

где x – координата; $\aleph^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности пласта.

В автомодельных переменных построены аналитические решения, описывающие распределения температуры и давления (с использованием метода линеаризации Лейбензона) в пласте:

$$p_{(1)}^2 = p_{(s)}^2 + \frac{(p_e^2 - p_{(s)}^2) \int_{\xi}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)},$$

$$T_{(1)} = T_{(s)} + \frac{(T_e - T_{(s)}) \int_{\xi}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)}}{2p_0^2} p_{(1)}^2\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)}}{2p_0^2} p_{(1)}^2\right) d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)},$$

$$p_{(2)}^2 = p_0^2 + \frac{(p_{(s)}^2 - p_0^2) \int_{\xi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}, \quad \xi_{(s)} < \xi < \infty,$$

$$T_{(2)} = T_0 + \frac{(T_{(s)} - T_0) \int_{\xi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)}}{2p_0^2} p_{(2)}^2\right) d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)}}{2p_0^2} p_{(2)}^2\right) d\xi}, \quad \xi_{(s)} < \xi < \infty,$$

где $\eta_{(i)} = \frac{\aleph_{(i)}^{(p)}}{\aleph_{(i)}^{(T)}}$, $\aleph_{(i)}^{(p)} = \frac{k_{(i)} p_0}{\mu_g m S_{g(i)}}$, $\text{Pe}_{(i)} = \frac{\rho_{g0} c_g k_{(i)} p_0}{\lambda \mu_g}$.

На основе данных решений и условий баланса массы и тепла на фронтальной границе образования гидрата получена система трансцендентных уравнений, исходя из которой численно определяются автомоделная координата $\xi_{(s)}$ данной границы и значения параметров $p_{(s)}$ и $T_{(s)}$ на ней.

В п. 2.3 в автомоделном приближении получено аналитическое решение осесимметричной задачи о фронтальном образовании газогидрата. Рассмотрен случай, когда в горизонтальном пористом пласте постоянной толщины и неограниченной протяженности пробурена скважина, через которую закачивается газ с постоянным массовым расходом Q_g и при постоянной температуре.

В п. 2.4 проведен анализ решений плоскосимметричной и осесимметричной задач с фронтальной поверхностью образования гидрата. Полученные решения исследованы на условие термодинамической непротиворечивости, которое состоит в том, что локальная температура в первой (ближней) области должна быть ниже локальной температуры образования гидрата, вычисляемой по найденному в процессе решения

распределению давления. Соответственно, температура во второй (дальней) области должна быть выше данной равновесной температуры.

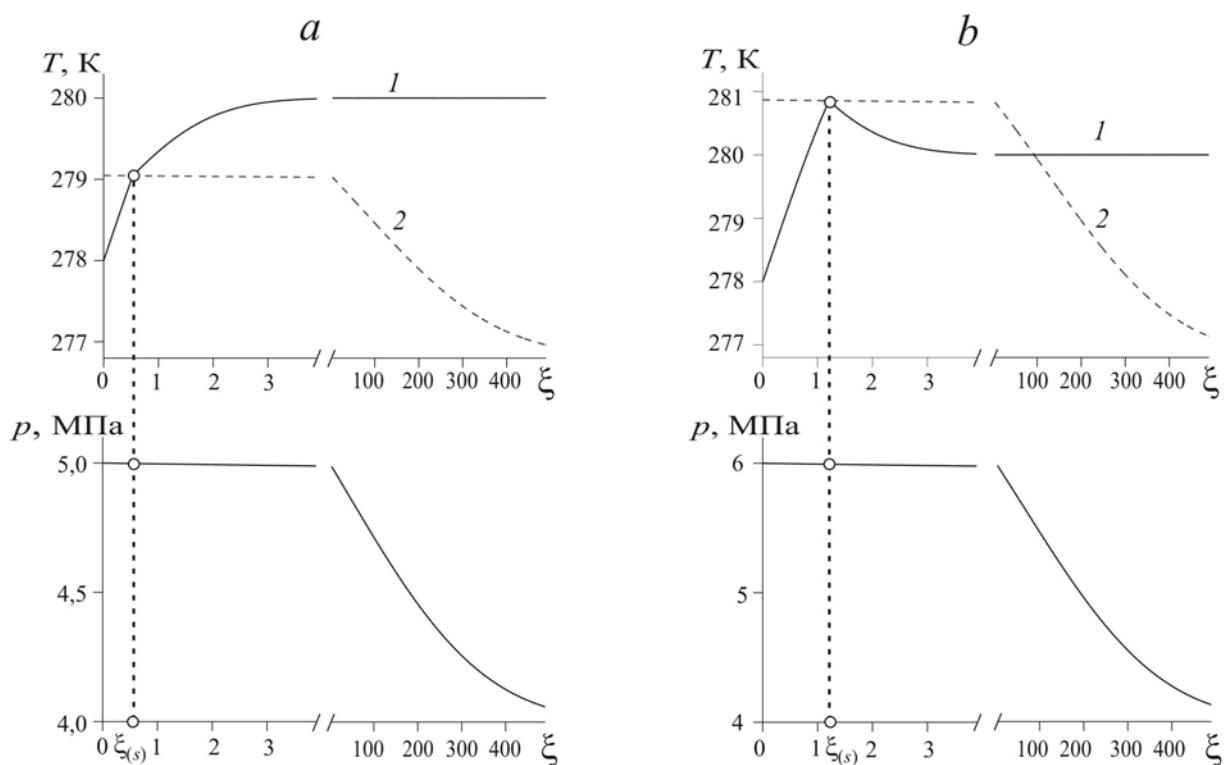


Рис. 1. Распределения температуры пласта (1), равновесной температуры (2) и давления в плоскосимметричном случае.
a – непротиворечивый случай: $p_e = 5$ МПа, $T_e = 278$ К;
b – случай «переохлаждения» воды за фронтом: $p_e = 6$ МПа, $T_e = 278$ К.

На рис. 1 приведены распределения температуры и давления для разных значений давления, под которым метан нагнетается в пласт. Для параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: $m = 0,1$, $G = 0,12$, $S_{i0} = 0,2$, $p_0 = 4$ МПа, $T_0 = 280$ К, $T^* = 10$ К, $p_{s0} = 5,5$ МПа, $k_0 = 10^{-14}$ м², $R_g = 520$ Дж/(К·кг), $\rho_h = 900$ кг/м³, $\rho_l = 1000$ кг/м³, $c_g = 1560$ Дж/(К·кг), $\rho_c = 2,5 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³), $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\mu_g = 10^{-5}$ кг/(м·с), $L_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг. Штриховая линия 2 показывает равновесную температуру, соответствующую вычисленному распределению давления. Рисунок показывает, что при небольшом значении давления нагнетания газа (случай *a*) температура пласта перед фронтом гидратообразования ниже равновесной температуры, а за фронтом – выше этой температуры. Следовательно, в этом случае решение с фронтальной поверхностью образования гидрата является непротиворечивым. При более высоком давлении (случай *b*) температура пласта за фронтом гидратообразования опускается ниже равновесной температуры, что соответствует переохлаждению воды в этой области. Следовательно, в этом

случае модель с фронтальной поверхностью образования гидрата не позволяет построить физически непротиворечивое решение. Для устранения этого противоречия необходимо вводить объемную область образования гидрата.

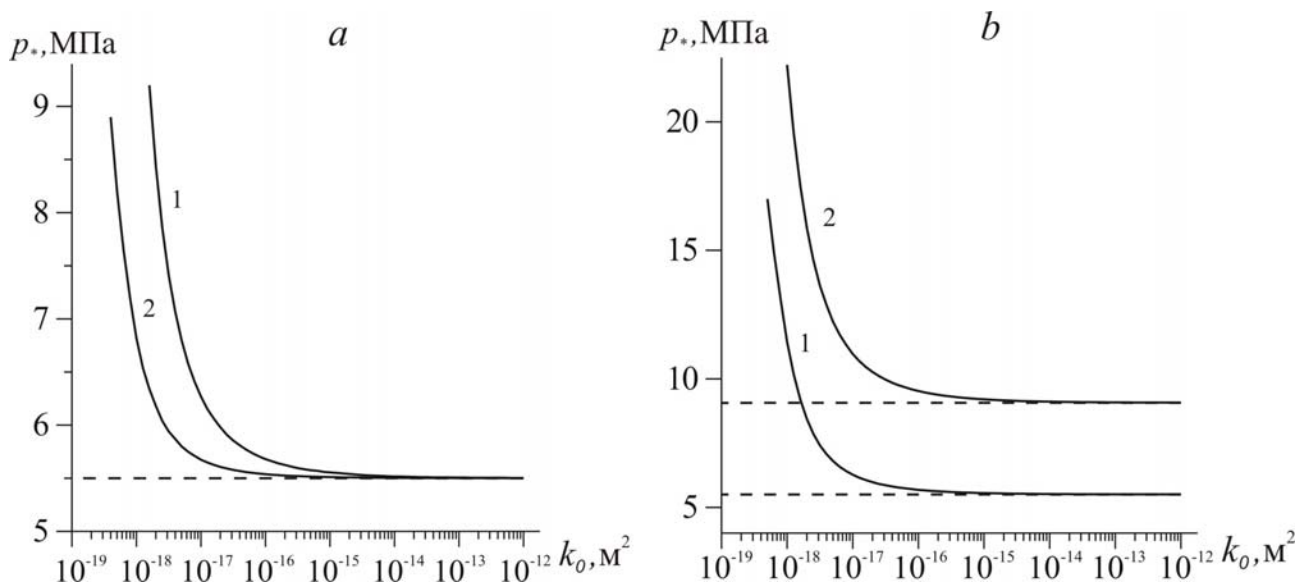


Рис. 2. Зависимость критического давления нагнетания газа от абсолютной проницаемости пласта при разных значениях:

a – начального давления в пласте: 1 – $p_0 = 3$ МПа, 2 – $p_0 = 5$ МПа;

b – начальной температуры пласта: 1 – $T_0 = 280$ К, 2 – $T_0 = 285$ К.

Для определения критического значения давления нагнетания газа p^* , при превышении которого фронтальная поверхность переходит в объемную область образования гидрата, были проведены вычислительные эксперименты в широком диапазоне параметров. В результате было установлено, что основными параметрами, которые влияют на величину данного критического давления, являются проницаемость пласта, а также исходные пластовые давление и температура. На рис. 2 приведены зависимости величины критического давления от абсолютной проницаемости пласта при разных значениях исходной температуры и давления в пласте. Штриховые линии, параллельные оси абсцисс и являющиеся горизонтальными асимптотами сплошных кривых, показывают равновесные давления p_{so} , соответствующие исходным температурам пласта. Графики показывают, что для высокопроницаемой пористой среды значение критического давления практически совпадает со значением равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта. При уменьшении проницаемости величина критического давления возрастает, при чем тем быстрее, чем выше исходная пластовая температура и чем ниже исходное пластовое давление. Таким образом, фронтальный режим реализуется в низкопроницаемых пористых средах, а также в высокотемпературных пластах с низким пластовым давлением, т.е. в пластах, исходное состояние газа и воды, в которых далеко от условий образования газового гидрата.

Таким образом, основываясь проведенными численными расчетами, можно сделать вывод о том, что возможны два принципиально различных вида решения в зависимости от параметров нагнетаемого газа и параметров, характеризующих исходное состояние системы. Для величины давления, под которым нагнетается газ, существует некоторое максимальное значение, зависящее от проницаемости, исходной температуры и начального давления, при превышении которого невозможно в рамках фронтальной модели построить непротиворечивое решение. Для значений проницаемости, характерных для реальных пластов $k = 10^{-12} - 10^{-15} \text{ м}^2$, величина этого предельного давления с высокой степенью точности совпадает с величиной равновесного давления p_{s0} , соответствующего исходной температуре.

В п. 2.5 решена плоскосимметричная задача об образовании газогидрата в объемной области. При рассмотрении задачи с объемным образованием газогидрата выделено три характерные области: ближняя, где поры заполнены газом и гидратом, промежуточная, в которой газ, вода и гидрат находятся в равновесии, и дальняя, которая заполнена газом и водой. В промежуточной зоне происходит образование гидрата. Соответственно рассматриваются две подвижные поверхности: между дальней и промежуточной областями, где начинается переход воды в гидрат, и между ближней и промежуточной областями, на которой заканчивается процесс образования гидрата.

В автомодельных переменных построены аналитические решения, описывающие распределения основных параметров в каждой из трех областей пласта. Показано, что единственно возможным термодинамически непротиворечивым решением для величины гидратонасыщенности на границе, разделяющей промежуточную и дальнюю области, является решение, при котором значение гидратонасыщенности на этой границе непрерывно и равно нулю.

Для распределений давления и гидратонасыщенности в трехфазной области получены следующие решения:

$$p_{(2)}^2 = p_{(m)}^2 + (p_{(s)}^2 - p_{(m)}^2) \frac{\int_{\xi}^{\xi^{(m)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\chi}\right) d\xi}{\int_{\xi^{(s)}}^{\xi^{(m)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\chi}\right) d\xi},$$

$$S_{h(2)} = \frac{T_* (\eta_{(2)} - 1)}{2(\Delta T \eta_{(2)} + \mathfrak{R}_h T_*)} \ln \frac{p_{(2)}^2}{p_{(m)}^2},$$

где $\chi = \frac{\Delta T \eta_{(2)} + \mathfrak{R}_h T_*}{\Delta T + \mathfrak{R}_h T_*}$, $\mathfrak{R}_h = \frac{\rho_h G}{\rho_{g0} (1 - S_{l0})}$, $\Delta T = \frac{m \rho_h L_h}{\rho c}$.

Получена система трансцендентных уравнений, вытекающих из условий баланса массы и тепла на границах между областями, из которой численным путем определяются автомодельные координаты $\xi_{(s)}$, $\xi_{(m)}$ этих границ и значения параметров $p_{(s)}$, $T_{(s)}$, $p_{(m)}$, $T_{(m)}$ на них.

В п. 2.6 в автомодельном приближении получено аналитическое решение осесимметричной задачи об объемном образовании газогидрата.

В п. 2.7 проведен анализ решений плоскосимметричной и осесимметричной задач с объемной областью образования гидрата.

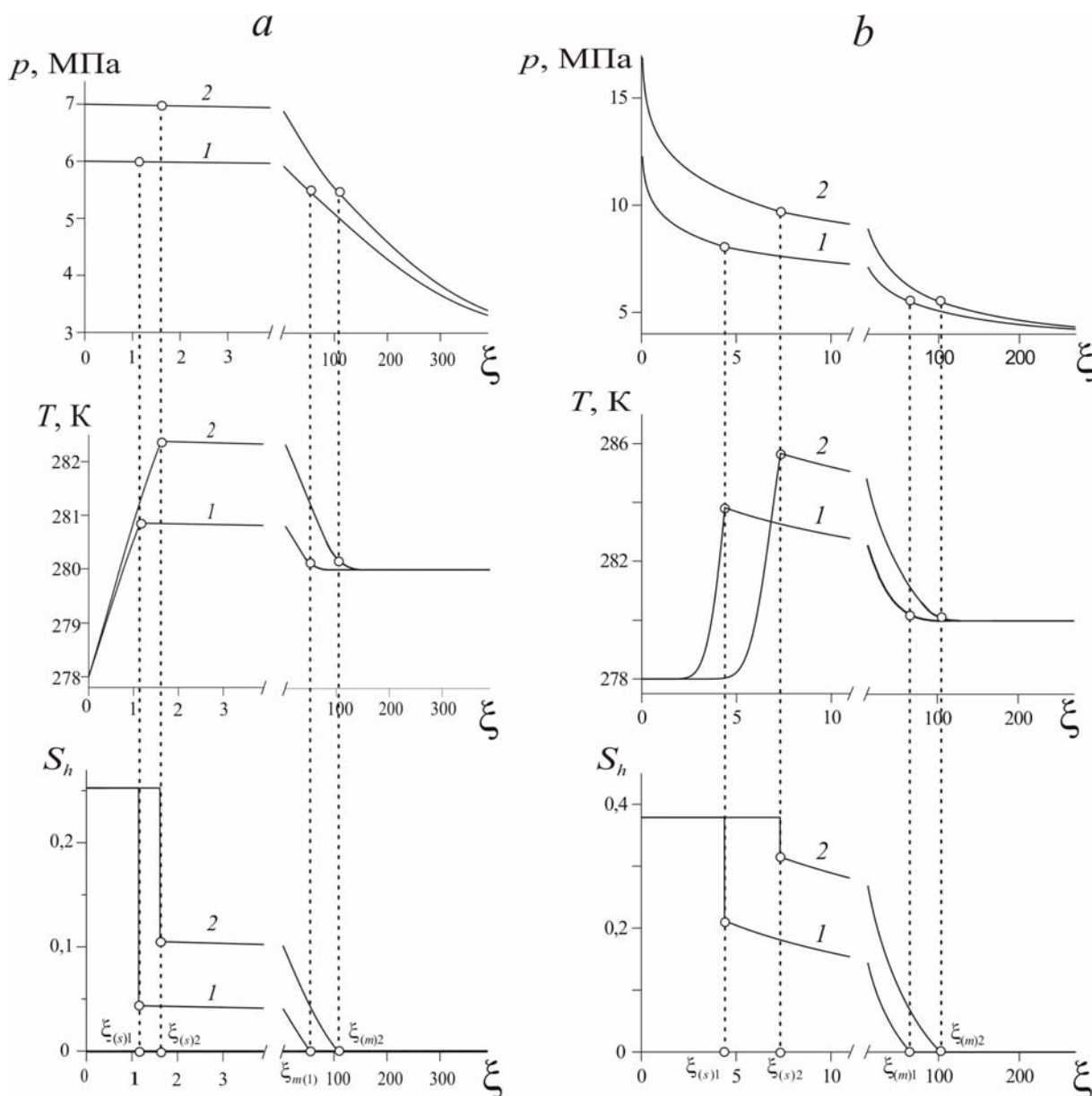


Рис. 3. Распределения давления, температуры и гидратонасыщенности при объемном образовании гидрата.
a – плоскосимметричный случай: $p_e = 6$ МПа (1) и 7 МПа (2);
b – осесимметричный случай: $Q_g = 0,1$ кг/(м·с) (1) и 0,2 кг/(м·с) (2).

На рис. 3 приведены распределения температуры, давления и гидратонасыщенности в случае объемного образования гидрата. Случай *a* соответствует плоскосимметричной задаче и значениям исходных параметров: $p_0 = 3$ МПа, $S_{l0} = 0,2$, $k_0 = 10^{-14}$ м²; случай *b* соответствует осесимметричной задаче и значениям исходных параметров: $p_0 = 4$ МПа, $S_{l0} = 0,3$, $k_0 = 10^{-14}$ м². Из рисунка видно, что температура в трехфазной области поднимается выше исходной температуры пласта, несмотря на то, что в пласт закачивается холодный газ. Это обусловлено высокой интенсивностью фазовых превращений, которые сопровождаются выделением скрытой теплоты гидратообразования. Следовательно, подача в этом случае холодного ($T_e < T_0$) газа в пласт приводит к нагреву пласта, величина которого возрастает с увеличением интенсивности инъекции газа. Кроме того, в соответствии с рисунком, повышение интенсивности закачки газа значительно увеличивает протяженность промежуточной области и долю гидратообразования, приходящегося на эту область (по сравнению с гидратообразованием на фронтальной поверхности, разделяющей ближнюю и промежуточные области). Таким образом, с повышением величины расхода газа, схема процесса все больше отличается от рассмотренной выше схемы с фронтальной поверхностью образования гидрата.

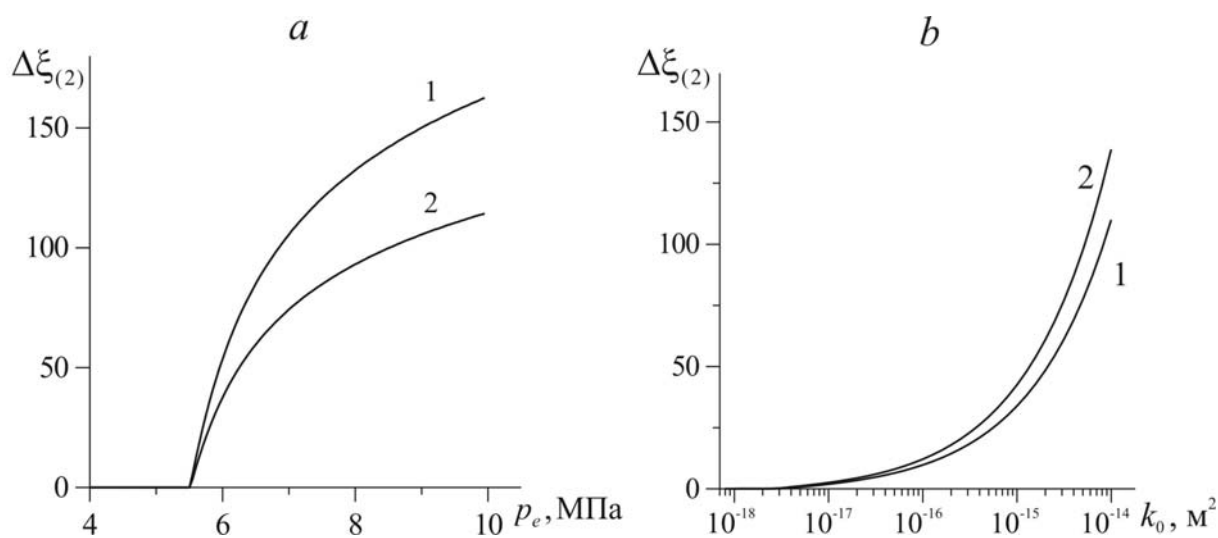


Рис. 4. Зависимость протяженности трехфазной области от:
a - давления, под которым нагнетается газ: 1 - $k_0 = 10^{-14}$ м², 2 - $k_0 = 5 \cdot 10^{-15}$ м²;
b - абсолютной проницаемости пласта: 1 - $p_e = 7$ МПа, 2 - $p_e = 8$ МПа.

На рис. 4 приведены зависимости протяженности объемной области образования гидрата от абсолютной проницаемости пласта k_0 и давления p_e , под которым нагнетается газ (в плоскосимметричном случае). Из рисунка видно, что объемная область возникает только при достижении величиной p_e

определенного значения, близкого к величине равновесного давления p_{s0} ($p_{s0} = 5,5$ МПа), соответствующего исходной температуре пласта ($T_0 = 280$ К). Далее с повышением давления p_e , протяженность объемной области образования гидрата увеличивается, причем тем быстрее, чем выше проницаемость пласта. При этом с уменьшением проницаемости пласта протяженность данной области стремится к нулю, вырождаясь во фронтальную поверхность в случае низкопроницаемой среды. Следует отметить, что такая низкая проницаемость (10^{-18} м²) является аномальной для реальных пород.

В работе доказано, что для существования решения с объемной областью образования гидрата необходимо одновременное выполнение двух условий: во-первых, давление под которым нагнетается газ должно превышать равновесное давление, соответствующее исходной температуре пласта; во-вторых, величина коэффициента пьезопроводности пласта должна быть выше величины его коэффициента температуропроводности. Последнее условие в частности означает, что существует некоторое критическое значение абсолютной проницаемости пласта k_* , ниже которого режим с объемной областью образования гидрата не реализуется ни при каких условиях:

$$k_* = \frac{\mu m \lambda}{p_0 \rho c (1 - S_{l0})^2}.$$

В третьей главе в автомодельном приближении решены одномерные задачи о диссоциации газогидрата при закачке теплого газа в пористый пласт, насыщенный газом и гидратом. Исследовано существование решений с фронтальной поверхностью фазовых переходов и объемной областью разложения гидрата.

В п. 3.1 решены плоскосимметричная и осесимметричная задачи о фронтальном разложении газогидрата. Полагается, что пористый пласт в начальный момент времени насыщен газом и гидратом, давление p_0 и температура T_0 которых в исходном состоянии соответствуют термодинамическим условиям существования гидрата. В результате инъекции теплого газа от границы (скважины) в глубь пласта распространяется фронтальная поверхность диссоциации гидрата, разделяющая пласт на две области. В первой области, находящейся вблизи границы пласта (скважины), поры насыщены газом и водой, а во второй (дальней) области поры заполнены газом и гидратом.

Построено аналитическое решение задач и проведен анализ полученных решений. Условие термодинамической непротиворечивости решения с фронтальной поверхностью фазовых переходов в данном случае заключается в том, что локальная температура в первой (ближней) области должна быть выше локальной температуры разложения гидрата, вычисляемой по найденному в процессе решения распределению давления. Соответственно, температура во второй (дальней) области должна быть ниже данной равновесной температуры.

На рис. 5 приведены распределения температуры и давления для задачи о фронтальном разложении гидрата при инъекции теплого газа. Штриховая линия показывает равновесную температуру диссоциации гидрата, соответствующую вычисленному распределению давления. Графики получены для случая, когда исходные давление и температура пласта $p_0 = 6$ МПа и $T_0 = 280$ К, абсолютная проницаемость пористой среды $k_0 = 10^{-16}$ м², начальная гидратонасыщенность пласта $\nu = 0,2$.

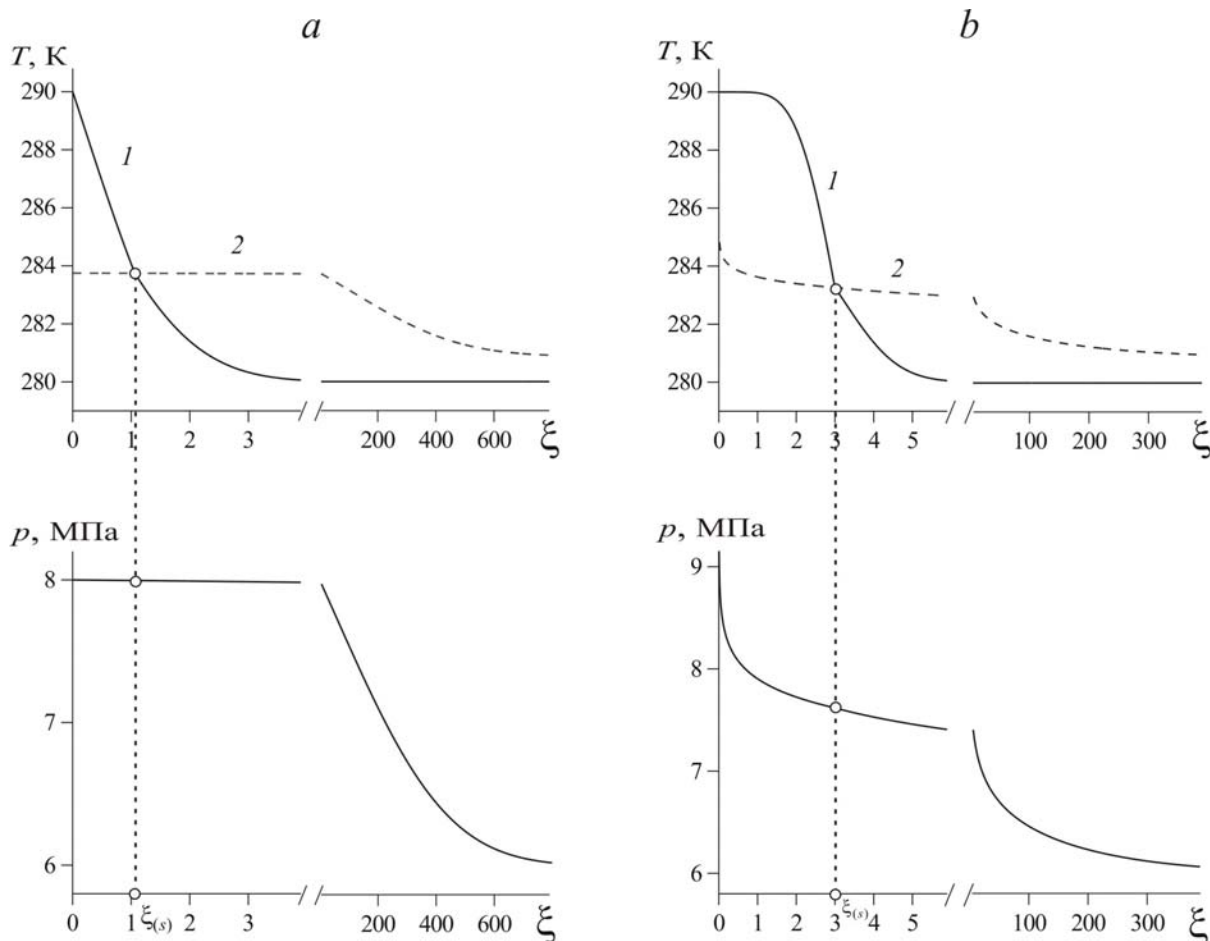


Рис. 5. Распределения температуры пласта (1), равновесной температуры (2) и давления в случае фронтальной диссоциации гидрата.
 а – плоскосимметричная задача: $p_e = 8$ МПа, $T_e = 290$ К;
 б – осесимметричная задача: $Q_g = 0,1$ кг/(м·с), $T_e = 290$ К.

Рисунок показывает, что локальная температура пласта перед фронтом диссоциации гидрата выше локальной равновесной температуры, а за фронтом – ниже этой температуры, т.е. решение с фронтальной поверхностью разложения гидрата является термодинамически непротиворечивым. Вычислительные эксперименты, проведенные в широком диапазоне параметров, для случая $p_e > p_0$ (инжекция газа в пласт) не выявили значений параметров, при которых условия термодинамической непротиворечивости были бы нарушены.

В п. 3.2 рассмотрена задача о разложении газогидрата в объемной области. При рассмотрении данной задачи выделено три характерные области: ближняя, где поры заполнены газом и водой, промежуточная, в которой газ, вода и гидрат находятся в равновесии, и дальняя, которая заполнена газом и гидратом. В промежуточной зоне происходит разложение гидрата. Соответственно рассматриваются две подвижные поверхности: между дальней и промежуточной областями, где начинается разложение гидрата, и между ближней и промежуточной областями, на которой заканчивается процесс разложения гидрата.

В результате анализа полученных аналитических решений для распределения основных параметров в пласте, а также условий на границах между областями, следующих из условий баланса массы и тепла, доказано, что при инъекции теплого газа в пористую среду, насыщенную газом и гидратом, режим с объемной областью диссоциации гидрата не реализуется не при каких условиях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе исследованы особенности образования и разложения газогидрата в пористой среде при инъекции газа. Построены математические модели, описывающие образование и разложение газогидрата в пористой среде при нагнетании холодного или теплого газа. Для автомодельных задач получены аналитические решения, описывающие распределения основных параметров в пласте. Рассмотрено влияние исходных параметров пористой среды, а также интенсивности инъекции газа на динамику процессов образования и разложения гидрата. Основные результаты и выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. При инъекции холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой, образование гидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

2. Режим с фронтальной поверхностью образования гидрата характерен для низкопроницаемых пористых сред с низким пластовым давлением и высокой начальной температурой. В случае нагнетания газа под давлением ниже значения равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта, образование газогидрата может происходить только на фронтальной поверхности.

3. Для возникновения объемной области образования газогидрата необходимо, чтобы величина коэффициента пьезопроводности пласта была выше значения его коэффициента температуропроводности. При этом величина давления, под которым нагнетается газ, должна быть больше равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта.

4. В случае объемного образования гидрата, большая протяженность области гидратообразования реализуется в высокопроницаемых пористых средах с высоким исходным давлением и низкой начальной температурой, а также при большой интенсивности инъекции газа в пласт. Возникновение объемной области образования гидрата сопровождается нагревом пласта выше исходной температуры даже при инъекции холодного газа, при этом величина нагрева увеличивается с повышением интенсивности нагнетания газа.

5. При инъекции теплого газа в пористую среду, насыщенную газом и гидратом, разложение газогидрата может происходить только на фронтальной поверхности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Потанов А.А., Хасанов М.К.* Радиальная задача о закачке теплого газа в газогидратный пласт // Спектральная теория дифференциальных операторов и родственные проблемы: Труды Международной научной конференции. – Уфа: Гилем, 2003. – Т. 3. – С. 160-165.

2. *Хасанов М.К.* Рост газогидратных отложений в пористой среде // ЭВТ в обучении и моделировании: Сборник научных трудов Всероссийской научно-теоретической конференции. – Бирск: БГПИ, 2004. – Ч. 1. – С. 103-107.

3. *Хасанов М.К.* Задача об образовании газогидрата в пористой среде // Современные проблемы физики и математики: Труды Всероссийской научной конференции. – Уфа: Гилем, 2004. – Т. 2. – С. 49-53.

4. *Хасанов М.К.* Образование газогидрата в пористой среде // Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике: Сборник трудов. – Уфа: БашГУ-ИФМК УНЦ РАН, 2004.– Т. II. – С. 190-195.

5. *Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К.* Нагнетание газа в пласт, сопровождающееся образованием газогидрата // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы международной научно-технической конференции. – Тюмень: «Феликс», 2005. – Т. 1. – С. 54.

6. *Хасанов М.К.* Нагнетание газа в пласт, насыщенный газом и водой // V Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых: Тезисы докладов. – Уфа: РИО БашГУ, 2005. – С. 109.

7. *Хасанов М.К.* Численное моделирование образования гидрата при инъекции газа в пласт // ЭВТ в обучении и моделировании: Сборник трудов IV Региональной научно-методической конференции. – Бирск: БГСПА, 2005.– Ч. 1. – С. 40-43.

8. *Хасанов М.К.* Математическая модель нагнетания газа в пласт, насыщенный газом и водой // Международная Уфимская зимняя школа-конференция по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых: Сборник трудов. – Уфа: РИО БашГУ, 2005.– Т. IV. – С. 258-262.

9. Шаганов В.Ш., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 4. – С. 645-656.

10. Хасанов М.К. Нагнетание газа в пласт, насыщенный газом и водой // Наука и образование 2005: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Нефтекамск: РИО БашГУ, 2006. – Ч. III. – С. 98-101.

11. Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К. Численное моделирование образования газовых гидратов при инъекции газа в пласт // Химия нефти и газа: Материалы VI международной конференции. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2006. – Т. 1. – С. 364-367.

12. Хасанов М.К. Образование газогидрата при закачке газа в пласт, частично насыщенный водой // Региональная школа-конференция молодых ученых: Тезисы докладов. – Уфа: Гилем, 2006. – С. 83-85.

13. Хасанов М.К. Математическое моделирование инъекции теплого газа в газогидратный пласт // ЭВТ в обучении и моделировании: Сборник научных трудов VI Всероссийской научно-методической конференции. – Бирск: БГСПА, 2007. – С. 173-175.