Хабибуллина, Айгуль Ринатовна. Фильтрация с фазовыми переходами при депрессионном воздействии на геотермальные и газогидратные пласты : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.02.05 / Хабибуллина Айгуль Ринатовна; [Место защиты: Башкир. гос. ун-т].- Бирск, 2013.- 106 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-1/759

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ БИРСКИЙ ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (БИРСКИЙ ФИЛИАЛ БАШГУ)

На правах рукописи

04201360699



**Хабибуллинл Айгуль Ринатовна ФИЛЬТРАЦИЯ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ ПРИ ДЕПРЕССИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И ГАЗОГИДРАТНЫЕ ПЛАСТЫ**

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор В.Ш. Шагапов

Научный консультант: кандидат физико-математических наук О.Р. Нурисламов

Бирск -2013

**Оглавление**

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 11

1. Публикации, посвященные исследованиям вскипания жидкости в

каналах и емкостях при понижении давления 11

1.2 Публикации, посвященные исследованиям фильтрации парожидкостных систем с фазовыми переходами 15

1. Анализ литературы, посвященной инжекции воды в горячий пласт.... 16
2. Анализ литературы, посвященной инжекции газа в холодный пласт... 19
3. [Анализ литературы, посвященной вскипанию жидкости в пористой среде при воздействии тепловыми источниками 21](#bookmark2)
4. [Анализ литературы, посвященной вскипанию жидкости в пористой среде при понижении давления 27](#bookmark3)
5. [Общие сведения о газогидратах 29](#bookmark4)
6. [Исследования, посвященные изучению свойств, строения газогидратов и их роли в природных процессах 36](#bookmark6)
7. Исследования, посвященные описанию методов и способов

образования и разложения газогидратов в пористых структурах 38

Выводы по главе 46

ГЛАВА 2. ВСКИПАНИЕ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ДЕПРЕССИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 47

1. [Основные уравнения 48](#bookmark8)
   1. [Постановка задачи и решения 54](#bookmark23)
   2. [Результаты численных расчетов 59](#bookmark26)

Выводы по главе 67

ГЛАВА 3. ОТБОР ГАЗА ИЗ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕГО ПЛАСТА ДЕПРЕССИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ 68

1. Постановка задачи и основные уравнения 68
2. [Упрощение уравнений для ближней и дальней областей 71](#bookmark28)
3. [У прощение уравнений для промежуточной области 71](#bookmark31)
4. Уравнения в автомодельной переменной 74
5. [Аналитические решения 75](#bookmark33)
6. [Численный анализ 75](#bookmark35)

Выводы по главе 92

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ 93

ЛИТЕРАТУРА 95

з

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Течение парожидкостных систем в пористых средах представляет значительный интерес, благодаря различным приложениям в энергетике, химической технологии и сушке материалов. Кроме того, анализ возможных последствий техногенных аварий и природных катаклизм, сопровождающихся воздействием сильных тепловых нагрузок на насыщенные водой пористые среды, требуют рассмотрения и тщательного расчета гидродинамических и температурных полей.

Откачивание разогретого теплоносителя из геотермального источника при помощи депрессионного воздействия также приводит к возникновению в пористой среде парожидкостного фильтрационного течения. Такие технологии в большинстве случаев предполагают предварительную закачку холодной воды в геотермальный пласт, чтобы впоследствии извлечь воду в виде горячей жидкости или пара. Исследование процесса откачки пара из подземного геотермального резервуара позволяет определить оптимальные значения воздействия с целью увеличения эффективности теплового отбора.

В 70-х годах прошлого столетия на северо-востоке Западной Сибири было открыто Мессояхское газовое месторождение, в котором также присутствовали скопления газовых гидратов. По мнению большинства исследователей, это первое такое месторождение в России. Последующие исследования показали, что мировые запасы гидратов колоссальны, а значит, могут служить дополнительным источником углеводородного сырья. Сегодня актуальна проблема разработки экономичных способов извлечения природного газа из газогидратных месторождений. В течение нескольких последних десятилетий проводятся исследования теплофизических и гидродинамических процессов в пористых пластах, насыщенных газовыми гидратами, при тепловом или депрессионном воздействии на них.

Цель **работы.** Исследование математических моделей, расширяющих теоретические представления о теплофизических и гидродинамических особенностях процессов фильтрационных течений с фазовыми переходами при депрессионном воздействии на пористые среды, изначально насыщенные вскипающей жидкостью или гидратом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

* развить и исследовать математические модели фильтрационных течений, сопровождаемых фазовыми переходами при депрессионном воздействии на геотермальные и газогидратные пласты;
* изучить особенности фильтрации в насыщенных вскипающей жидкостью или гидратом пористых средах при депрессионном воздействии.

**Научная новизна** заключается в следующем:

* в автомодельной плоскоодномерной и радиально-симметричной постановках поставлена и решена задача о фильтрации кипящей жидкости для широкого диапазона изменения давления на границе пористой среды, когда образуются три характерные зоны: первая зона, насыщенная водой, вторая зона, насыщенная водой и паром, и зона фильтрации пара. Получено критическое условие для величины минимальной депрессии, при котором реализуется полное выкипание жидкости в пористой среде;
* решены задачи о разложении гидрата при депрессионном воздействии, когда в исходном состоянии газ и гидрат в пористой среде находятся в пересжатом состоянии (давление в пласте выше равновесного значения для исходной температуры пласта). Установлено, что в зависимости от давления на границе пористой среды, а также исходной гидратонасыщешюсти возможны три режима фильтрации: без разложения гидрата, с частичным или полным разложением гидрата в пористой среде. Получены критические условия для параметров, определяющих состояние пористой среды и величину депрессии, различающих эти режимы фильтрации.

**Достоверность** результатов диссертации основана на использовании фундаментальных уравнений теории фильтрации многофазных систем,

корректной теоретической постановкой задач, а также получением решений, непротиворечащих общим гидродинамическим и теплофизическим представлениям и согласующихся в некоторых частных случаях с результатами других исследователей.

**Практическая ценность.** Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке научных основ, связанных с созданием технологий извлечения геотермальных ресурсов посредством депрессионного воздействия на пористые среды, а также технологий добычи газа депрессионным воздействием на пористые среды, частично насыщенные гидратами.

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

* V Международная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии в современном машиностроении» (Пенза, 2009);
* Российская конференция «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», посвященная 70-летию академика Р.И. Нигматулина (Уфа, 2010);
* I Международный симпозиум по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Москва, 2010)
* XI Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (Москва, 2010);
* Мавлютовкие чтения: Российская научно-техническая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения чл.-корр. РЛІІ P.P. Мавлютова (Уфа, 2011);
* VI Международный симпозиум по фундаментальным и прикладным проблемам науки (Москва, 2011);
* XII Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (весенняя сессия) (Москва, 2011);
* XII Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике (осенняя сессия) (Москва, 2011);

б

- Региональная научно-практическая конференция «Новые технологии топливно-энергетического комплекса-2012» (Сургут, 2012).

Кроме того, результаты работы докладывались на семинарах Проблемной лаборатории «Математическое моделирование и механика сплошных сред» под руководством академика ATI РБ В.Ш. Шагапова и профессора С.М. Усманова.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах:

Работы, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Шагапов В.Ш., Нурисламов О.Р., Хабибуллина А.Р. Вскипание жидкости в пористой среде при депрессионном воздействии // Прикладная механика и техническая физика. - 2012. - Т. 53. - №3. - С. 133-143.
2. Шагапов В.Ш., Нурисламов О.Р., Хабибуллина А.Р. Отбор газа из гидратосодержащего пласта депрессионным воздействием // Вестник Томского государственного университета. - 2012. - №4(20). - С. 119-130. Работы, опубликованные в других изданиях и материалах конференций
3. Хабибуллина А.Р. Вскипание жидкости при депрессионном воздействии в пористую среду / Сборник статей V Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении». Пенза: Изд-во «Приволжский дом знаний». - 2009. - С. 104-108.
4. Нурисламов О.Р., Запивахина М.Н., Хабибуллина А.Р. Некоторые автомодельные задачи образования и разложения газогидратов в пористой среде / Тезисы докладов Российской конференции «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», посвященной 70-летию академика Р.И.Нигматулина. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело». - 2010. - С. 113-114.
5. Шагапов В.Ш., Хабибуллина А.Р. Об одном методе разработки геотермального источника / Фундаментальные и прикладные проблемы науки: Труды I Международного симпозиума. Москва: Изд-во РАН. - 2010. - Т.1.-С. 98-106.
6. Хабибуллина А.Р. Моделирование вскипания жидкости в пористой среде при депрессионном воздействии // Обозрение прикладной и промышленной математики. - 2010. - Т. 17. - Выпуск 6. - С. 950-951.
7. Нурисламов О.Р., Хабибуллина А.Р. О режимах отбора газа из гидратного пласта // Обозрение прикладной и промышленной математики. - 2011. - Т. 18. - Выпуск 2. - С. 313.
8. Хабибуллина А.Р. Об извлечении газа из пористого пласта // Обозрение прикладной и промышленной математики. - 2011. - Т.18. - Выпуск 5. - С.815-
9. Нурисламов О.Р., Хабибуллина А.Р. О режимах отбора газа из гидратосодержащего пласта / Фундаментальные и прикладные проблемы науки: Материалы VI Международного симпозиума. Москва: Изд-во РАН. - 2011.-Т.2. -С. 51-59.
10. Нурисламов О.Р., Хабибуллина А.Р. Задача об отборе газа из гидратного пласта при депрессионном воздействии / Сборник статей Российской научно- технической конференции «Мавлютовские чтения». Уфа: Изд-во УГАТУ. - 2011.-Т.4.-С. 158-162.
11. Хабибуллина А.Р., Мацюк Р.А. Об одном методе извлечения пара из геотермального источника / Материалы региональной научно-практической конференции «Новые технологии топливно-энергетического комплекса- 2012». Сургут: Изд-во ТюмГНГУ. - 2012. - С. 89-92.
12. Хабибуллина А.Р., Рухлова О.О. Горючий лед / Материалы региональной научно-практической конференции «Новые технологии топливно- энергетического комплекса-2012». Сургут: Изд-во ТюмГНГУ. - 2012. - С. 104-106.
13. Хабибуллина А.Р., Грученкова А.А. Разложение газогидрата в пористом пласте при депрессионном воздействии / Материалы региональной научно- практической конференции «Новые технологии топливно-энергетического комплекса-2012». Сургут: Изд-во ТюмГНГУ. - 2012. - С. 84-88.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 106 страницах и включает 22 рисунка. Список литературы состоит из 128 наименований.

*Во введении* обоснована актуальность темы исследований, отмечена научная новизна, сформулированы цели и основные задачи исследования, кратко изложена структура диссертации.

*В первой главе* изложен краткий обзор современного состояния теории истечения кипящей жидкости из каналов и емкостей, теории фильтрации парожидкостных систем с фазовыми переходами.

Кратко приведены основные сведения о газогидратах и районах залегания газогидратов во всем мире, выполнен обзор исследований, посвященных исследованию свойств, строения газогидратов и их роли в природных процессах, приведен обзор исследований, посвященных описанию методов и способов образования и разложения газогидратов в пористых структурах.

*Во второй главе* рассмотрена автомодельная задача о вскипании жидкости, полностью насыщающей в исходном состоянии пористую среду при депрессионном воздействии. Построены аналитические решения плоскосимметричной и осесимметричной задач, описывающих распределения основных параметров в пласте. Проанализировано влияние исходного состояния среды, величины депрессии, а также массового расхода отбора пара на процесс фильтрационного кипения. Выявлены режимы кипения и критерий, разделяющий эти режимы.

*В третьей главе* рассмотрена автомодельная задача об отборе газа из пористого пласта, частично насыщенного гидратом при депрессионном воздействии. Построены аналитические решения плоскосимметричной и осесимметричной задач, описывающих распределения основных параметров в пласте. Установлены основные закономерности разложения газогидратов в пористых средах при депрессионном воздействии в зависимости от граничного давления, исходной гидратонасыщенности, а также темпов отбора газа. Показано, что в зависимости от состояния пористой среды и создаваемого при депрессии значения граничного давления отбор газа из гидратосодержащего пласта может происходить в трех режимах, с качественно различающимися структурами образующихся зон. Исследованы критические условия, разделяющие разные режимы разложения газогидрата.

*В заключении* кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе проведено теоретическое исследование вскипания жидкости, а

также разложения газогидрата в пористой среде при депрессионном воздействии для широкого диапазона изменения давления на границе. В зависимости от значений управляемых параметров (величины депрессии на границе пористой среды, массового расхода отбора пара или газа) и исходных параметров системы в пористой среде осуществлен анализ различных режимов фильтрации при вскипании жидкости и фильтрации газа, сопровождающей разложение гидрата. По результатам исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что при депрессионном воздействии на пористую среду, изначально насыщенную перегретой жидкостью, в общем случае возможно образование трех зон фильтрации, отличающихся структурой и фазовым составом.
2. Для плоскоодномерного случая установлено, что:

* в зависимости от величины граничного давления процесс кипения может протекать в двух режимах, отличающихся наличием или отсутствием зоны, где находится один пар. Получено уравнение для определения критического значения давления *Р*(0), которое разделяет эти режимы;
* значения скорости движения границ и протяженности областей нелинейно зависят от величины депрессии. При увеличении депрессии до появления границы полного выкипания прирост скорости границы вскипания происходит более интенсивно, чем в режиме с образованием зоны полного выкипания.

1. В случае радиальной геометрии (при постоянном массовом расходе отбора пара) в пористой среде реализуются все три характерные зоны. Указан временный диапазон, когда полученные автомодельные решения имеют смысл для реальных ситуаций.
2. При депрессионном воздействии на пористую среду, частично насыщенную газогидратами, в общем случае возможно образование трех зон, отличающихся составом насыщающих флюидов.
3. Для плоскоодномерной фильтрации установлено, что:

* в зависимости от величины граничного давления и значения исходной гидратонасыщенности возможны три режима отбора газа, а именно: когда разложение гидрата полностью отсутствует, когда гидрат в пористой срсде разлагается частично и когда гидрат в пористой среде разлагается полностью. Установлены критерии, разделяющие эти режимы;
* с увеличением исходного давления в пласте скорость движения границ начала разложения гидрата и полного разложения уменьшается, хотя отбор газа при этом увеличивается. Это свидетельствует о том, что отбор газа в основном реализуется за счет свободного газа в порах.

1. Для радиальной постановки задачи установлено что:

* возможна реализация только одного режима, при котором образуются все три характерные области. Причем из полученных результатов следует, что полученное автомодельное решение применимо для анализа реальных ситуаций, как и в случае отбора пара, только в ограниченных временных интервалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулич П.В. Тепломассоперенос в капиллярно-пористых материалах, сопровождаемый углублением зоны испарения.// Сб. материалов IV Минского международного форума по тепло- и массообмену. - Минск. - 2000.-Т.9.-С. 175-179.
2. Акулич П.В., Гринчик Н.Н. Моделирование тепломассопереноса в капиллярно-пористых материалах.// ИФЖ. - 1998. - Т.71. - № 2. - С.225-232.
3. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Изв. Всес. теплотехн. ин-та.-1950.-№ 2.
4. Бабенко В.Е., Буевич Ю.А., Шепчук И.М. Квазистационарный режим сушки сферической частицы.// ТОХТ. - 1975. - № 2. - С.247-277.
5. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. - М.: Недра. - 1984. - 211 с.
6. Бармин А.А., Кондратов А.В. Двухфронтовая математическая модель инжекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром.// МЖГ. - 2000. - №3. - С. 105-112.
7. Бармин А.А., Цыпкин Г.Г. О движении фронта фазового перехода при инжекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром // ДАН. - 1996. - Т.350. -№2.-С. 195-197.
8. Бармин А. А., Цыпкин Г.Г. Математическая модель инжекции воды в геотермальный пласт, насыщенный паром // Механика жидкости и газа. - 1996.-№6.-С.92-98.
9. Бартелеми Б., Крюппа Ж. Огнестойкость строительных конструкций. М.: Стройиздат. - 1985. - 216 с.
10. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов.-М.: Недра.- 1993.-416 с.