

На правах рукописи

Циберкин Кирилл Борисович

**ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОМАССООБМЕН В МНОГОФАЗНЫХ
ЖИДКОСТЯХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель:

Любимова Татьяна Петровна, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Иванова Алевтина Алексеевна, доктор физико-математических наук, профессор, Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Ведущий научный сотрудник лаборатории вибрационной гидромеханики

Шарифулин Альберт Нургалиевич, кандидат физико-математических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Доцент кафедры прикладной физики

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится «__» _____ 201_ г. в 15¹⁵ на заседании диссертационного совета Д.212.189.06 при Пермском государственном национальном исследовательском университете по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного национального исследовательского университета и на сайте <http://www.psu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.ф.-м.н., доцент

В.Г. Гилев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Актуальность исследований течений и тепломассообмена в многофазных жидкостях и пористых средах обусловлена тем, что процессы в природных и промышленных гидродинамических системах, включающих многофазные жидкости, играют важную роль в формировании локальной и глобальной экологической обстановки. Эти исследования требуют разработки специализированных подходов, и потому важны также с фундаментальной точки зрения.

В природе и технике широко встречаются фильтрационные течения, сопровождающиеся фазовыми переходами. Описание таких течений требует либо учёта формы и движения фронта фазового перехода, либо введения кинетических уравнений (при фазовом переходе в объёме среды). Дополнительные трудности вызывает учёт движения жидкости или газа. Неравновесные процессы в пористых средах с фазовыми превращениями остаются малоисследованными, а аналитические решения задач об этих явлениях доступны только в простейших случаях.

Задача о взаимодействии потока однородной жидкости с фильтрационным течением имеет практические приложения, в частности, для описания процессов кристаллизации металлов и сплавов, анализа влияния наземной и донной растительности на течение и перенос загрязнений в атмосфере и гидросфере. Однако по сей день остаётся открытым вопрос о граничных условиях, наиболее адекватно описывающих взаимодействие смежных потоков, и об областях применимости различных моделей. Кроме того, взаимодействие потоков расширяет возможности для возбуждения гидродинамической неустойчивости и управления её возникновением и развитием.

Задачи о гидродинамических процессах, происходящих в крупных хранилищах жидких отходов, и об их влиянии на окружающие грунтовые воды и поверхностные водные объекты, имеют непосредственные приложения в сфере рационального природопользования. В то же время, особенности этих процессов, вызванные сложным характером взаимодействия отдельных компонент, по-прежнему остаются слабоизученными.

Исследования, вошедшие в диссертацию, проводились в рамках работ по грантам Российского научного фонда (№ 14-21-00090), Российского фонда фундаментальных исследований (№№ 09-01-00618, 09-01-92505, 12-01-00795, 13-01-96040), Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF RUP1-2945-PE-09), программы поддержки Ведущих научных школ (НШ-4022.2014.1), Научно-образовательного центра Пермского государственного университета «Неравновесные переходы в сплошных средах» (№№ 09-15н-09с, 10-16н-11с).

Целью работы является установление закономерностей течения и тепломассообмена в многофазных жидкостях и пористых средах, в том числе при наличии фазовых превращений смеси газа и воды в гидрат и обратно, взаимодействии фильтрационного течения со смежным с ним потоком однородной жидкости, переносе растворимой и нерастворимой примеси в жидкости и пористой среде.

Научная новизна результатов

1. Получены оценки параметров, при которых происходит дестабилизация пласта гидрата метана при наличии в нём локализованных включений газа и воды; изучены особенности динамики таких включений в массиве гидрата.
2. Для специальных начальных условий получено автомодельное решение задачи о сходящемся движении сферического фронта фазового перехода, применимое в частности к динамике локализованных включений в гидрате метана.
3. Обнаружено значительное уменьшение критического числа Рейнольдса и изменение формы нейтральных кривых для стационарного плоскопараллельного течения жидкости над насыщенной пористой средой при описании последней моделью Дарси с условиями Биверса–Джозефа на границе раздела потоков по сравнению с результатами, полученными при использовании модели Бринкмана с граничными условиями Ошоа–Тапия–Уитейкера.
4. Изучено влияние нелинейной силы сопротивления Форхгеймера на устойчивость течения над насыщенной пористой средой при описании последней моделями Дарси и Бринкмана.

5. Исследовано влияние тяжёлой примеси на течение жидкости над насыщенной пористой средой и его устойчивость. Найдено, что наличие примеси приводит к появлению коротковолнового минимума, связанного с подавлением возмущений с определёнными длинами волн в пределах диффузионных пограничных слоёв.

6. Показано, что разогрев донных отложений солнечным излучением может привести к возникновению интенсивного конвективного течения, эффективно перемешивающего осадок.

Автор защищает

1. Результаты аналитического и численного исследования динамики протяжённых пластов гидратов метана при локальных нарушениях их однородности.

2. Аналитическое решение сферически-симметричной задачи Стефана для специального случая начального распределения температуры в системе.

3. Результаты исследования диссоциации отдельного зерна гидрата метана в породе при наличии объёмного фазового перехода.

4. Результаты численного решения линейной задачи устойчивости стационарного течения жидкости над слоем пористой среды, описываемым моделью Дарси с условиями Биверса–Джозефа на границе насыщенной пористой среды и однородной жидкости.

5. Данные о влиянии силы Форхгеймера на устойчивость течения над пористой средой при описании последней моделями Дарси и Бринкмана с соответствующими граничными условиями.

6. Результаты численного решения линейной задачи устойчивости течения над пористой средой, содержащей растворимую примесь.

7. Результаты аналитического и численного исследования возникновения конвекции в водоёме вследствие прогрева донных отложений солнечным излучением.

8. Результаты исследования инфильтрации жидких отходов из крупного промышленного хранилища в поверхностные водоёмы.

Достоверность результатов подтверждается результатами тестирования используемых численных алгоритмов на задачах, исследованных ранее, в том числе другими авторами; совпадением результатов, полученных с применением различных методов и

подходов; соответствием аналитических и численных результатов в случаях, где такое сопоставление возможно.

Практическая значимость работы Полученные результаты могут быть использованы для оценки экологических рисков разработки месторождений гидратов метана и водорастворимых полезных ископаемых, и выработки методов мониторинга экологической обстановки в прилегающих районах. На основе полученных результатов возможно прогнозирование распространения загрязнений в руслах рек и влияния внешних факторов на технологические процессы в крупных промышленных водных объектах.

Апробация работы Основные результаты, приведённые в диссертации, представлены на следующих научных семинарах и конференциях: Всероссийская конференция молодых учёных «Неравновесные процессы в сплошных средах», Пермь, 2009, 2010, 2012; International Summer School “Advanced Problems in Mechanics”, St. Petersburg, 2010; 17-ая Зимняя школа по механике сплошных сред ИМСС УрО РАН, Пермь, 2011; American Geosciences Union Fall Meeting, San Francisco, California, USA, 2011; Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКФС-19, Архангельск, 2013; European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2013, 2014; International Conference on Numerical and Mathematical Modeling of Flow and Transport in Porous Media, Dubrovnik, Croatia, 2014; Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные задачи механики сплошных сред», Пермь, 2014; 5-я международная научная школа молодых учёных «Волны и вихри в сложных средах», Москва, 2014; 2-я международная конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 2014; 19-я Зимняя школа по механике сплошных сред ИМСС УрО РАН, Пермь, 2015; Семинар института гидродинамики и теплопереноса Венского технического университета (Вена, Австрия), 2013; Пермский городской гидродинамический семинар им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого, 2014, 2015.

Публикации Материалы диссертации опубликованы в 21 печатной работе, в том числе в 3 статьях в ведущих рецензируемых научных

журналах из списка ВАК [1–3], 4 трудах конференций [4–7] и 14 тезисах докладов на конференциях [8–21].

Личный вклад Автор непосредственно участвовал в планировании исследований и постановке конкретных задач, описанных во всех опубликованных работах [1–21], выбирал методы исследования, выполнял численное моделирование и получал аналитические решения, принимал непосредственное участие в подготовке публикаций.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, включающего обзор литературы, трёх глав, заключения и списка литературы, включающего 155 наименований. В работе имеется 38 рисунков и 3 таблицы. Общий объем диссертации равен 159 страницам.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен обзор литературы по теме диссертации и дана общая характеристика работы.

В первой главе исследуется динамика многофазных фильтрационных течений, сопровождающихся фазовыми переходами, применительно к проблеме устойчивости природных гидратов метана, а также вопросам разработки их месторождений.

Получены автомодельные решения задач о движении плоского, цилиндрически-симметричного и сферически-симметричного фронтов диссоциации гидрата метана при подведении тепла в начале координат, и изучены их свойства. Все варианты симметрии задачи допускают корневой закон движения фронта $x(t) \sim V_b t^{1/2}$, где V_b – характеристика его скорости, но физический смысл имеет только решение для плоского фронта.

В пренебрежении конвективным теплопереносом для специального случая начальных условий получено аналитическое решение сферически симметричной задачи Стефана о сходящемся фронте фазового перехода, которое реализуется при заполнении гидратом сферического «пузыря», содержащего газ и воду. Оно отвечает устойчиво происходящему фазовому переходу и термодинамически равновесным значениям температуры и давления внутри пузыря. Найдено радиальное распределение температуры вокруг пузыря. Полученное решение подтверждено

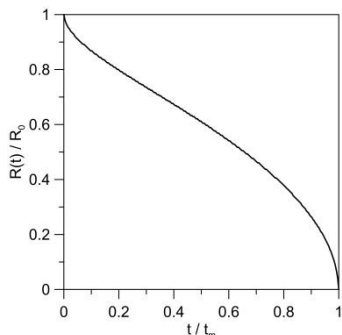


Рис. 1. Зависимость радиуса сферического пузыря в слое устойчивого гидрата метана от времени. Результат прямого численного моделирования

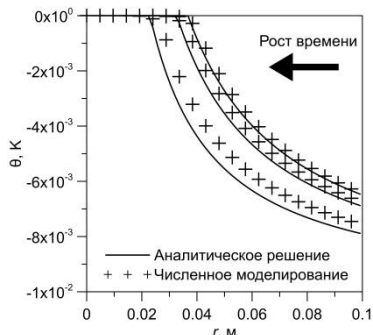


Рис. 2. Профиль температуры в сферически симметричной задаче Стефана, найденный численно (крестики) и аналитически (сплошные линии)

прямым численным моделированием промерзания сферического пузыря в гидрате, которое произведено на основе полной гидродинамической модели, учитывающей конвективный теплоперенос (рис. 1, 2).

Проведено численное моделирование динамики локализованных областей, насыщенных газом и водой, и нарушающих однородность структуры протяжённых слоёв природного гидрата метана, в различных условиях. Показано, что в случае свободного канала, пронизывающего слой устойчивого гидрата, при большом размере канала и проницаемости пористой среды, превышающей некоторое значение, возникает интенсивный поток разогретого газа из нижележащих слоёв породы, который вызывает повышение температуры в канале и разрушение гидрата метана на его стенках. В частности, при радиусе канала порядка 1 м критическая проницаемость составляет 10^{-12} м^2 . Полученные аналитические оценки согласуются с результатами численного моделирования.

Для случая сферического включения, находящегося в пласте гидрата и первоначально содержащего газ и воду, получена зависимость времени заполнения пузыря гидратом $t_m \sim R^2 \delta P^{-\sigma}$, где R – начальный радиус, δP – отклонение начального давления внутри пузыря от равновесного значения, а $\sigma = -0.44 \dots -0.28$ и зависит от интенсивности конвективного течения вблизи пузыря.

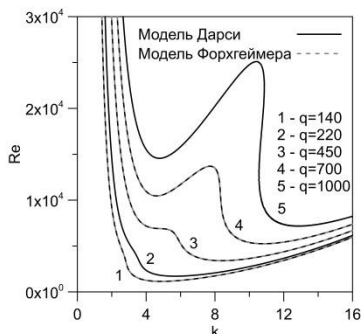


Рис. 3. Нейтральные кривые для стационарного течения в модели Дарси при различных значениях проницаемости среды ($q=Da^{-1/2}$)

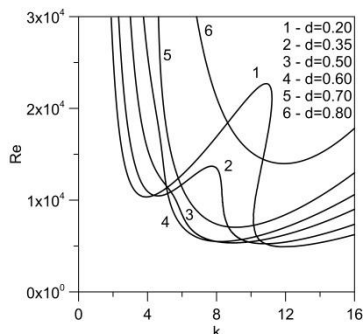


Рис. 4. Нейтральные кривые для стационарного течения в модели Дарси при различных значениях толщины пористого слоя d

На основании сопоставления данных экологического мониторинга и результатов численного исследования диссоциации единичного зерна гидрата в пористой матрице произведена оценка времени существования зерна, а также оценка возможной концентрации зёрен в районах вечной мерзлоты.

Во второй главе в рамках модели фильтрации Дарси с граничными условиями Биверса–Джозефа¹, которые определяют скачок касательной скорости на границе раздела потоков, изучается устойчивость стационарного плоскопараллельного потока однородной жидкости, стекающего по наклонному слою пористой среды, насыщенной той же жидкостью.

Получены зависимости формы нейтральных кривых и значений критического числа Рейнольдса от проницаемости пористой среды (рис. 3), относительной толщины пористого слоя (рис. 4) и других параметров задачи.

Результаты сопоставлены с данными работ^{2,3}, где пористая среда описывалась моделью Бринкмана с условиями Ошоа–Тапия–Уитейкера¹, а также единой моделью с переменными пористостью

¹ Nield DA Bejan A *Convection in porous media* 4th ed Springer 2013

² Tilton N Cortelezzi L Linear stability analysis of pressure-driven flows in channels with porous walls *J Fluid Mech* 2008 **604**

³ Lyubimova TP Baydina DT Lyubimov DV Stability and nonlinear regimes of flow over a saturated porous medium *Nonlinear Proc Geoph* 2013 **20**

и проницаемостью, в широком интервале значений параметров системы.

Показано, что различие структуры профилей скорости стационарного течения приводит к изменению формы нейтральных кривых и значительному понижению критического числа Рейнольдса для модели Дарси по сравнению с моделью Бринкмана.

Найдено, что для модели Дарси наиболее опасны коротковолновые возмущения, локализованные вблизи границ раздела потоков и

связанные с разрывом профиля скорости на границе раздела, а для модели Бринкмана наиболее опасны длинноволновые возмущения, связанные с точкой перегиба в профиле течения (рис. 5).

В рамках обеих моделей рассмотрено влияние на устойчивость течения нелинейной силы сопротивления Форхгеймера. Показано, что для модели Бринкмана происходит некоторая стабилизация течения благодаря усилению затухания возмущений в пределах пористого слоя. В то же время для модели Дарси сила Форхгеймера не приводит к изменению критических чисел Рейнольдса.

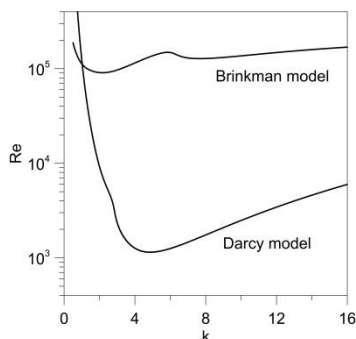


Рис. 5. Сравнение нейтральных кривых для модели Бринкмана и модели Дарси при одинаковых геометрических и физических параметрах систем

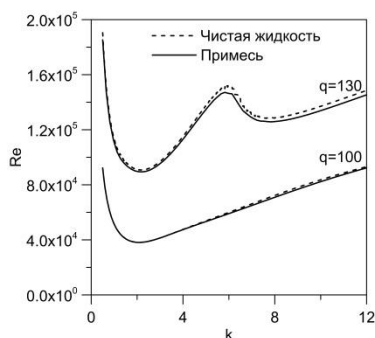


Рис. 6. Сравнение нейтральных кривых в системах с пассивной (штриховые линии) и тяжёлой (сплошные линии) примесью

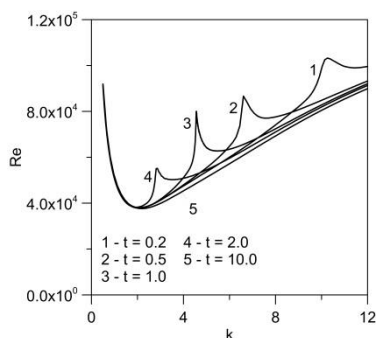


Рис. 7. Нейтральные кривые для течения с тяжёлой примесью в различные моменты безразмерного времени

В рамках модели Бринкмана изучено влияние на устойчивость течения тяжёлой растворимой примеси, вымываемой из пористой среды, в приближении квазистационарного профиля концентрации. Найдено, что при распространении примеси происходит некоторая дестабилизация течения (рис. 6). В пределах диффузионных пограничных слоёв, образующихся у границы раздела, наблюдается подавление коротковолновых возмущений с определёнными длинами волн, что вызывает появление дополнительного минимума нейтральной кривой, который смещается со временем в сторону больших длин волн (рис. 7).

В третьей главе рассматриваются две задачи, связанные с эксплуатацией крупных хранилищ жидких отходов.

Первая задача посвящена моделированию конвективных явлений в прудах-отстойниках, вызванных разогревом донных осадков солнечным излучением. Для описания используется однофазная модель конвекции жидкости со взвешенными частицами⁴, дополненная слагаемым, описывающим разогрев осадка и жидкости при поглощении внешнего излучения.

Получена оценка периода автоколебательного конвективного режима, который может существовать благодаря циклическому разогреву осадка, перемешиванию жидкости и оседанию частиц. Период составляет около 3 ч, что согласуется с результатами наблюдений, выполненных на шламохранилищах ПАО «Уралкалий» (г. Березники, Пермский край) сотрудниками Горного института УрО РАН.

Прямое численное моделирование конвекции в данной системе показало, что развивающиеся течения эффективно увлекают за собой осадок и перераспределяют его по объёму жидкости (рис. 8). Течение медленно затухает, но существует в течение длительного времени и сопровождается кратковременными всплесками интенсивности, связанными с формированием скоплений взвешенного в толще жидкости осадка и их разогревом (рис. 9).

В рамках исследования второй задачи проведена оценка интенсивности инфильтрации жидкости из шламохранилища,

⁴ Lyubimov DV Lyubimova TP Straube AV Capture of particles of dust by convective flow *Phys Fluids* 2005 **17**

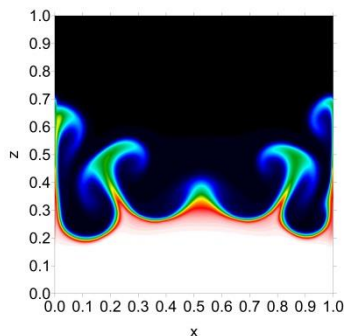


Рис. 8. Возникновение конвекции в водоёме при разогреве слоя осадка на дне солнечным излучением. Показано распределение увлекаемых течением частиц осадка в объёме жидкости в момент начала перемешивания

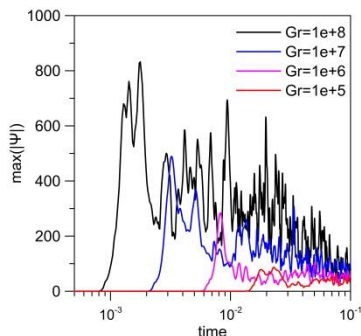


Рис. 9. Эволюция максимума модуля функции тока в заилённом водоёме при различных значениях теплового числа Грасгофа, что в настоящей работе отвечает различной толщине слоя жидкости

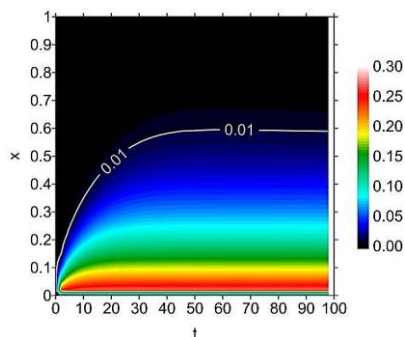
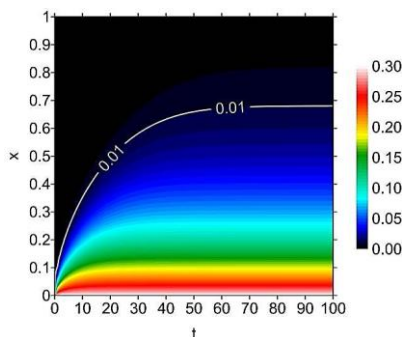


Рис. 10. Эволюция пространственного распределения концентрации примеси в одномерной задаче о переносе примеси в пористой среде без учёта (слева) и с учётом (справа) слабой адсорбции примеси. Выделена изолиния объёмной концентрации $C=0.01$

расположенного на ПАО «Уралкалий», в окружающий грунт и близлежащие поверхностные водоёмы.

Расчёт производился на основе аналитического решения одномерного уравнения конвекции-диффузии для примеси, с учётом и без учёта возможной слабой адсорбции примеси в порах. Временная эволюция пространственного распределения концентрации примеси показана на рис. 10. Получены оценки времени продвижения загрязнений до ближайшего водоёма

(30÷150 суток до р. Северная Лёнва) и значения концентрации примеси в точке поступления жидкости в поверхностный водоём (2 мг/л).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследована неизотермическая фильтрация воды и сжимаемого газа при наличии фазового перехода, сопровождающегося образованием или диссоциацией гидрата метана. Получены автомодельные решения для семейства модифицированных задач Стефана о движении фронта фазового перехода в системе, содержащей гидрат, газ и воду.
2. Исследован процесс распада зерна гидрата метана при параметрах, соответствующих неустойчивости гидрата. Найдена скорость распада и интенсивность выделения газа. Получена оценка для плотности содержания зёрен гидрата в породе в условиях вечной мерзлоты.
3. Изучены течения и тепломассообмен в сквозном канале, пронизывающем слой устойчивого гидрата. Получены оценки для значений проницаемости пористой среды и размера канала, при превышении которых гидрат на стенках канала начинает разрушаться.
4. В рамках модели Дарси с условиями Биверса–Джозефа на границе раздела потоков исследована устойчивость стационарного плоскопараллельного течения над насыщенной пористой средой. Проведено сопоставление полученных результатов с известными результатами для модели Бринкмана с условиями Ошоа–Тапия–Уитейкера. Показано, что критическое число Рейнольдса для модели Дарси существенно ниже, чем для модели Бринкмана, из-за наличия разрыва в профиле скорости стационарного течения. В случае модели Дарси наиболее опасны связанные с упомянутым разрывом коротковолновые возмущения, тогда как для модели Бринкмана наиболее опасны длинноволновые возмущения, связанные с наличием точки перегиба на профиле скорости.
5. Исследовано влияние квадратичной силы сопротивления Форхгеймера на устойчивость стационарного плоскопараллельного

течения над насыщенной пористой средой. Показано, что для модели Бринкмана учёт этой силы приводит к некоторой стабилизации течения, тогда как для модели Дарси критическое число Рейнольдса не изменяется.

6. Изучено влияние растворённой в жидкости тяжёлой примеси на стационарное течение над насыщенной пористой средой и его устойчивость. Найдено, что наличие примеси приводит к появлению коротковолнового минимума, связанного с подавлением возмущений с определёнными длинами волн в пределах диффузионных пограничных слоёв.

7. Изучено возникновение конвекции жидкости в хранилище жидких отходов при разогреве донного осадка солнечным излучением. Получены оценки периода конвективных автоколебаний в такой системе, связанных с перемешиванием жидкости и оседанием частиц. Проведено прямое численное моделирование двумерных ламинарных режимов конвекции жидкости с нерастворимыми частицами. Показано, что частицы увлекаются потоком и перераспределяются по объёму. В жидкости наблюдается медленно затухающее конвективное течение.

8. Исследована задача об инфильтрации жидкости с растворённой примесью из шламохранилища в прилегающие подземные воды и поверхностные водоёмы. Получены оценки времени продвижения примеси до ближайшего водоёма и значения концентрации в точке поступления примеси в водоём без учёта и с учётом слабой адсорбции загрязнений в грунте.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Любимова Т.П., Циберкин К.Б. Моделирование диссоциации зерна гидрата метана в пористой матрице // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. № 1. С. 119–124.
2. Tsiberkin K., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Zikanov O. Evolution of a spherical hydrate-free inclusion in a porous matrix filled with methane hydrate // *Physical Review E*. 2014. Vol. 89, 023008.
3. Циберкин К.Б. Устойчивость течения над насыщенной пористой средой, содержащей растворенную примесь // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2015. Т. 25. Вып. 1. С. 107–116.

4. Любимов Д.В., Циберкин К.Б. Моделирование поведения газожидкостных включений в гидратонасыщенной пористой среде // Матер. всерос. конф. «Неравновесные процессы в сплошных средах». Пермь. 2009. С. 161–164.
5. Любимов Д.В., Циберкин К.Б., Любимова Т.П., Иванцов А.О. Моделирование динамики сквозного вертикального канала в слое газового гидрата // Матер. всерос. конф. «Неравновесные процессы в сплошных средах». Пермь. 2010. С. 154–157.
6. Tsiberkin K.B., Lyubimova T.P. A solar radiation-induced convection in stagnant natural and industrial water reservoirs // Матер. 5-й межд. научной школы «Волны и вихри в сложных средах». Москва. 2014. С. 88–90.
7. Любимова Т.П., Циберкин К.Б. Влияние нелинейной силы сопротивления на устойчивость течения над пористой средой // Матер. конф. «Пермские гидродинамические научные чтения» (на CD). Пермь. 2014. С. 56–57.
8. Любимов Д.В., Циберкин К.Б. Моделирование поведения газожидкостных включений в гидратонасыщенной пористой среде // Тез. докл. всерос. конф. «Неравновесные процессы в сплошных средах». Пермь. 2009. С. 56.
9. Любимов Д.В., Циберкин К.Б., Любимова Т.П., Иванцов А.О. Моделирование динамики сквозного вертикального канала в слое газового гидрата // Тез. докл. всерос. конф. «Неравновесные процессы в сплошных средах». Пермь. 2010. С. 94.
10. Lyubimov D., Lyubimova T., Tsiberkin K., Ivantsov A. Numerical modeling of gas release process from methane hydrates // Abstr. Int. Summer School “Advanced Problems in Mechanics”. St.Petersburg. 2010. P. 65.
11. Lyubimova T.P., Lyubimov D.V., Ivantsov A.O., Tsiberkin K.B., Zikanov O. Hydrodynamic models of the dynamics of methane release by natural hydrates // Abstr. American Geosciences Union Fall Meeting, San-Francisco, California, USA. 2011, #C41C-0427.
12. Любимова Т.П., Любимов Д.В., Циберкин К.Б., Иванцов А.О. Поведение газовых включений в пористой матрице, заполненной гидратом // Тез. докл. XVII Зимней школы по механике сплошных сред, Пермь. 2011. С. 207.
13. Любимова Т.П., Циберкин К.Б. Распад зерна гидрата метана в пористой матрице // Тез. докл. всерос. конф. «Неравновесные процессы в сплошных средах». Пермь. 2012. С. 79.
14. Циберкин К.Б. Разложение зерна гидрата метана в пористой матрице // Тез. докл. всерос. конф. ВНКСФ–19. Архангельск. 2013. С. 426–427.
15. Tsiberkin K., Lyubimov D., Lyubimova T., Zikanov O. Evolution of a gas bubble in porous matrix filled by methane hydrate // Geophysical Research

Abstr. 2013. Vol. 15. P. 10770 / Abstr. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria. 2013.

16. Tsiberkin K., Lyubimova T. Convective instability of sludge storage under evaporation and solar radiation // Geophysical Research Abstr. 2014. Vol. 16. P. 481 / Abstr. European Geosciences Union General Assembly. Vienna, Austria. 2014.

17. Lyubimova T., Lepikhin A., Tsiberkin K., Parshakova Y. Self-oscillations in large storages of highly mineralized brines // Geophysical Research Abstr. Vienna, Austria. 2014. Vol. 16. P. 10785 / Abstr. European Geosciences Union General Assembly. Vienna, Austria. 2014.

18. Tsiberkin K., Lyubimova T. Natural methane hydrate instability with respect to its inhomogeneities // Abstr. Int. Conf. on Numerical and Mathematical Modeling of Flow and Transport in Porous Media. Dubrovnik, Croatia. 2014. P. 54.

19. Циберкин К.Б., Любимова Т.П. Возникновение конвекции в заиленном водоёме под воздействием солнечной радиации // Тез. докл. всерос. конф. «Актуальные задачи механики сплошных сред». Пермь. 2014. С. 46.

20. Циберкин К.Б., Любимова Т.П. Устойчивость течения жидкости над насыщенной пористой средой при квазистационарном вымывании примеси // Тез. докл. XIX Зимней школы по механике сплошных сред. Пермь. 2015. С. 341.

21. Циберкин К.Б., Любимова Т.П., Лепихин А.П. Моделирование фильтрации насыщенного рассола хлорида калия из промышленного резервуара в поверхностные водоёмы // Тез. докл. XIX Зимней школы по механике сплошных сред. Пермь. 2015. С. 342.

Подписано в печать 29.04.2015

Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Пермского государственного национального
исследовательского университета.
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.