

На правах рукописи



Бондарева Любовь Васильевна

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕРАСТВОРЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ В
ЗАТОПЛЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Захаров Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Старченко Александр Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор, Томский государственный университет, г. Томск, декан Механико-математического факультета

Паничкин Алексей Васильевич,
кандидат физико-математических наук,
Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева
СО РАН, г. Омск, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН)

Защита состоится 1 марта 2019 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.141.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук <http://www.ict.nsc.ru/ru/structure/discouncil/bondareva-lv>

Автореферат разослан 21 декабря 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент



Лебедев А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Загрязнение водных ресурсов жидкими промышленными стоками углеперерабатывающих предприятий остается существенной угрозой экологической безопасности Кузбасса. Выбор способа очистки остается крайне важным, он определит не только безвредность очищенных стоков, но и диапазон экономических затрат. Обычно для очистки жидких промышленных стоков углеперерабатывающих предприятий используют традиционные методы (отстаивание, фильтрация, флотация, флокуляция и др.), но в Кемеровской области используется и другой – с помощью отработанных горных выработок закрытых и затопленных угольных шахт. Изучение этого альтернативного способа очистки представляет большой практический интерес. В Кемеровской области в результате закрытия нерентабельных угледобывающих предприятий, заполнены техногенными подземными водами достаточно большие по объему подземные пространства. Часто они находятся вблизи углеперерабатывающих предприятий, поэтому их потенциально можно использовать как очистные сооружения. Суть применения данного способа очистки заключается в следующем: жидкие промышленные стоки углеобогатительной фабрики закачиваются в отработанные выработки закрытой угольной шахты. В затопленном подземном пространстве происходит их естественная очистка за счет отстаивания и разбавления поступающими грунтовыми водами. Осажденные илы при этом остаются в выработанном пространстве, и дополнительные расходы для их складирования не требуются. В настоящее время, такой подход реализуется для очистки шламовых стоков углеобогатительной фабрики «Комсомолец» в отработанных выработках шахты «Кольчугинской».

Но при всей идейной простоте и низкой стоимости применения такого способа очистки остается актуальной и важной проблема исследования и прогнозирования возможного развития протекающих внутри процессов. Наибольшую опасность представляет вероятность «залпового выброса» накопленных примесей, при котором может происходить кратковременное, но резкое увеличение концентрации и объема примесей в откачиваемой жидкости. Для безопасного практического применения такого метода очистки промышленных сточных вод очень важно не допустить «залпового выброса» и своевременно вывести выработку, как очистное сооружение, из эксплуатации.

Обводненная выработка представляет собой «черный ящик», реальные измерения каких-либо параметров возможны лишь на входе и выходе. Проведение каких-либо измерений и наблюдений внутри выработки в настоящее время является почти невозможным из-за ее большой протяженности, непостоянной внутренней структуры выработки (из-за возможных обрушений кровли, оставленного под землей оборудования и других факторов), токсичности очищаемых промышленных стоков и дороговизне таких исследований. В связи с этим, возникает необходимость в

применении математического моделирования и численных экспериментов, как инструментов для прогнозирования развития процессов очистки, проходящих в затопленных горных выработках.

В настоящее время, задача о моделировании очистки жидких промышленных стоков в отработанных горных выработках затопленных и закрытых угольных шахт является мало изученной. В исследованиях других авторов представлена модель очистки жидких промышленных стоков только от растворенных примесей, а вопрос о заилении шахты и распространении нерастворенных примесей почти не освещен. На данный момент в литературе недостаточно освещены математические модели, с помощью которых можно было бы решить эту задачу. Построение и изучение такой модели актуально для многих субъектов, в которых ведется подземная добыча полезных ископаемых, в том числе, и для Кемеровской области.

Цель настоящей работы состоит в построении математической модели, позволяющей описывать процессы очистки жидких промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт, получении оценки эффективности такого способа очистки, и определении времени «безопасной» эксплуатации выработки как очистного сооружения.

Для достижения поставленной цели требуется последовательно решить следующие **задачи**:

1. На основе аналитического обзора выявить основные факторы, влияющие на качество очистки в отработанных горных выработках, которые необходимо отразить в математической модели.
2. Разработать математическую модель процессов очистки жидких промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт, с учетом поступления грунтовых вод, наличия в очищаемых стоках взвешенных оседающих и всплывающих примесей, различающихся по фракционному составу, и изменения области решения из-за слеживания осадка.
3. Разработать алгоритмы и комплекс программ для численной реализации предлагаемой математической модели.
4. Используя численные эксперименты, выявить причины возникновения «залпового выброса», и оценить время «безопасного» использования выработки как очистного сооружения.

Метод исследования. В исследовании применялись методы математического моделирования и механики сплошных сред. Для решения краевых задач используются метод конечных разностей, неявные численные схемы для решения параболических уравнений и итерационные методы для решения эллиптических уравнений. Численная реализация модели выполнена в виде зарегистрированного комплекса программ, написанного на языке C++.

Объектом исследования в данной работе является математическая модель процесса очистки жидких промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт, а также алгоритмы для ее численной реализации.

Предметом исследования было выбрано моделирование заиливания выработки и «залпового выброса» примесей из шахты, оценки времени «безопасной» работы выработки как очистного сооружения.

Основные результаты, выносимые на защиту. В работе присутствуют результаты, соответствующие трем областям исследования паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико – математическим наукам.

Область исследования 1 (разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений):

1. Математическая постановка задачи моделирования процесса очистки жидких промышленных стоков в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт, с учетом поступления грунтовых вод, наличия в очищаемых стоках взвешенных оседающих и всплывающих примесей, различающихся по фракционному составу, и изменения области решения из-за слеживания осадка.

Область исследования 4 (Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента):

2. Комплекс программ, предназначенный для проведения вычислительных экспериментов по исследованию процессов течения и распространения, оседающих и всплывающих, нерастворенных примесей в области, моделирующей закрытый горно-технологический объект, с возможностью изменения области решения. Комплекс позволяет исследовать процесс очистки жидких промышленных стоков в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт.

Область исследования 5 (комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента):

3. Результаты численного моделирования возникновения явления «залпового выброса» для примесей с различным фракционным составом. Оценки времени «безопасного» использования отработанной горной выработки как очистного сооружения.

Научная новизна выносимых на защиту результатов заключается в следующем:

1. Предложена новая математическая модель очистки промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках с

учетом всплытия и оседания примеси, особенностей развивающегося в шахте течения и слеживания осадка.

2. Для численной реализации модели разработан алгоритм изменения области решения из-за слеживания осадка примеси.
3. С помощью разработанного программного комплекса получены результаты численных экспериментов, демонстрирующие заиливание выработанного пространства и явление «залпового выброса». Получены оценки времени «безопасной» эксплуатации отработанной горной выработки как очистного сооружения.

Достоверности обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием выполнения законов сохранения в качестве основы моделирования, хорошим количественным соответствием методических расчетов с реальными измерениями по мутности откачиваемых стоков.

Теоретическая ценность исследований обуславливается созданием математической модели и получением результатов численного моделирования процессов течения и распространения нерастворенных примесей, с учетом поступления грунтовых вод, наличия в очищаемых стоках взвешенных оседающих и всплывающих примесей, различающихся по фракционному составу, и изменения области решения из-за слеживания осадка.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенные математическая модель, алгоритмы и вычислительная программа, могут применяться для исследования процессов очистки не только в шахте Кольчугинской, но и для отработанных горных выработок закрытых и затопленных угольных шахт. Полученные новые численные результаты могут быть использованы для прогнозирования возникновения «залпового выброса» и оценки максимального возможного времени безопасной эксплуатации подобного очистного сооружения. Результаты, представленные в работе, получены в рамках выполнения проектной части государственного задания 1.630.2014/К и базовой части 2014/64.

Представление работы:

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

XV Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование» (Алтайский край, 2016); XVII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию (г. Новосибирск, 2016); V международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2016); International Conference «Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education» (Almaty, Kazakhstan, 2015); International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities

(St. Petersburg, 2015); Международной научно-практической конференции «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления» (г. Красноярск, 2014); Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Тюмень, 2014); Международной научной конференции «Информационно-вычислительные технологии и математическое моделирование (ИВТ & ММ)» (г. Кемерово, 2013); Международной конференции «Математические и информационные технологии, MIT – 2011» (Врнячка Баня, Сербия, 2011); Международной конференции «Геоинформатика: технологии, научные проекты», (г. Барнаул, 2010) и других всероссийских и международных конференциях.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на **семинарах**: кафедры вычислительной математики КемГУ «Математические модели, методы решения», г. Кемерово (под рук.проф. Ю.Н. Захарова); кафедры НИТ КемГУ «Информационные технологии и математическое моделирование», г. Кемерово (под рук. проф. А.М. Гудова); ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии в задачах поддержки принятия решений», г. Новосибирск (под рук.к.ф. – м.н. Д.В. Есипова, Д.Л. Чубарова), ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии», г. Новосибирск (под рук. академика Ю.И. Шокина, профессора В.М. Ковени).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ: 4 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК, 2 статья в журналах, индексируемых SCOPUS и Web of Science, 17 работ в трудах и тезисах международных и всероссийских конференций, в том числе получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) и 1 монография.

Личный вклад автора. Во всех публикациях автору принадлежит участие в формулировке задач, постановке краевых условий, реализации методов решения и проведении расчетов, интерпретации полученных результатов. Основные результаты диссертации получены автором, им разработан программный комплекс и выполнены вычисления для всех рассмотренных в работе задач. Доля личного участия автора составляет: в постановке задач исследования, создании математической модели, и в выборе алгоритма и методов решения – 80%, в разработке программного комплекса, реализующего математическую модель и выбранный алгоритм решения – 80%, в проведении численных экспериментов – 100%, в анализе и обобщении полученных результатов – 80%, во внедрении результатов – 50%. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 189 наименований и приложения на 2 страницах. Общий объем диссертации составляет 187 страниц, включая 78 рисунков и 11 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору Ю.Н. Захарову.

Во **введении** формулируются цели диссертационной работы, обосновывается актуальность решаемых задач, приводится обзор научной литературы по изучаемой тематике, излагается краткое содержание работы.

Первая глава состоит из четырех параграфов и посвящена построению двух математических моделей: модели распространения оседающей примеси и слеживания осадка и модели «самоизлива» жидкости из шахты в виде замкнутых систем дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями.

В **параграфе 1.1.** рассматриваются предмет исследования и физическая постановка задачи, выдвигаются основные предположения о предмете исследования. На практике, промышленные стоки угольной промышленности представлены в основном шахтными и шламовыми водами. Обычно после предварительной очистки их используют в технологических процессах добычи и обогащения, только затем подвергают более глубокой очистке и сбрасывают в близлежащие реки. На рисунке 1 представлена часть схемы транзита и очистки жидких промышленных стоков ш. «Комсомолец» в р. Мереть.



Рисунок 1 – Схема транзита промышленных стоков ш. «Комсомолец» в р. Мереть. На схеме обозначены процессы: (1) – сброс шахтных вод в центральные очистные сооружения; (2) – отбор вод для использования в технологических процессах обогащения; (3) – сброс для отстаивания в шламоотстойниках; (4) – сброс для очистки в отработанных выработках ш. «Кольчугинская»; (5), (6) – сброс в очистные сооружения ш. «Красноярской»; (7) – сброс очищенных стоков в р. Мереть.

Впервые в российской практике для обезвреживания шламовых стоков углеобогадательной фабрики «Комсомолец» (см. рисунок 1, часть транзита 4) используются отработанные выработки шахты «Кольчугинской». Очищенные таким образом стоки сбрасываются в очистные сооружения ш. «Красноярской» для дополнительного обезвреживания (см. рисунок 1, часть транзита 5).

В работе были выбраны основные характерные особенности протекающих в горной выработке физических процессов очистки и сделаны некоторые предположения, принимаемые в описывающей их математической модели.

Во-первых, учитываются характерные размеры и форма главного ствола шахты Кольчугинской, хотя рассматриваемый в диссертационной работе способ моделирования может применяться и для других подобных горных выработок. Для шахты Кольчугинской характерным является наличие почти горизонтального участка в центральной части и двух наклонных на входе и выходе, при этом высота шахтного ствола много меньше общей длины горной выработки.

Во-вторых, для шахты Кольчугинской известно, что основной объем поступающей в шахту жидкости состоит из грунтовых вод, фильтрующихся через верхнюю кровлю. Из данных реальных наблюдений известно, что этот объем примерно в четыре раза больше объема закачиваемых для очистки стоков. Суммарный же объем поступающей жидкости таков, что с учетом общей протяженности шахты, средние скорости течения в выработке малы. Поэтому для такого течения характерен ламинарный режим.

В-третьих, в диссертационной работе рассматривается очистка только от взвешенных примесей. Доля твердой фазы в поступающих в выработку промышленных стоках не превышает 5 %, и состоит в основном из частиц крупностью до 5 мкм. Частицы примеси таких малых размеров, что на их распространение существенно влияют не только гидродинамические факторы, но и действие силы тяжести или подъема, из-за которого они могут оседать или всплывать относительно потока жидкости.

В-четвертых, процесс очистки не стационарен, но взвешенные примеси не оказывают прямого влияния на течение жидкости. Концентрация загрязнений в закачиваемых стоках невелика, а течение развивается при очень малых скоростях, соответственно концентрация примеси внутри выработки будет медленно расти. Кроме того, частицы взвешенных примесей таких малых размеров, что процесс их осаждения очень длителен по времени. Поэтому частицы примеси, передвигаясь в потоке жидкости, не могут изменить скорости самого течения, и увеличение концентрации примеси до некоторого предела на течение влиять не будет. Характер течения может измениться только вслед за изменением формы дна из-за слеживания осадка.

В-пятых, взвешенные примеси могут отличаться по фракционному составу. Характер распространения примесей в зависимости от крупности фракций - от наиболее мелких и летучих, до относительно крупных и тяжелых, может существенно различаться.

В-шестых, в отличие от открытых русел, в рассматриваемой задаче размеры зоны осаждения взвешенных загрязняющих частиц ограничены площадью самой выработки и распространением загрязнений «по ширине»

можно пренебречь. В то время как распределение примеси «по высоте» имеет принципиальное значение в вопросе накопления осадков и выявления тенденций их распространения. Также в математической модели рассматривается уже обводненная горная выработка, соответственно частицы примеси со стенок и верхней кровли уже попали в заполняющую выработку жидкость. Других источников взвешенных примесей внутри выработки нет. Таким образом, стенки горной выработки не окажут существенного влияния на процесс очистки, поэтому в математической модели изучаемых процессов очистки будет рассматриваться только двумерная модель.

В-седьмых, существенное влияние на качество очистки оказывают грунтовые воды. Очистка от взвешенных примесей происходит из-за существенного разбавления поступающими в выработанное пространство грунтовыми водами, и благодаря отстаиванию. Поэтому «чистота» или «загрязненность» грунтовых вод может существенно повлиять на мутность откачиваемых стоков. При этом после фильтрации через толщу породы грунтовые воды содержат только мелкие частицы примеси, а крупные частицы в них отсутствуют.

Параграф 1.2. посвящается моделированию оседания примеси. Сначала выбирается область решения, с учетом характерных особенностей ш. Кольчугинской (см. рисунок 2). Так для этой шахты ее протяженность ($\approx 4,35$ км) много больше средней высоты шахтного ствола (≈ 3 м).

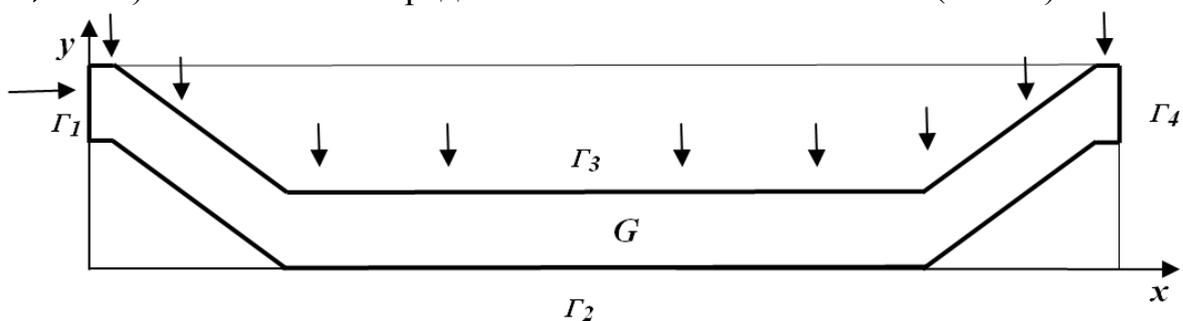


Рисунок 2 – Область решения для задачи об оседании примеси и слеживании осадка.

Рассматривается область решения G , характерной для затопленной горной выработки формы, с границей $\Gamma = \cup_{i=1}^4 \Gamma_i$, где Γ_1, Γ_4 – входное и выходное отверстия, соответственно; Γ_2, Γ_3 – нижняя и верхняя границы. Входная граница выбирается таким образом, чтобы она соответствовала, находящейся на некотором удалении от места закачки жидкости, области в реальной выработке.

Модель оседания примеси и слеживания осадка в шахте состоит из безразмерной системы уравнений Навье - Стокса в переменных «функция тока - вихрь»:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega \quad (1)$$

и безразмерного уравнения переноса примеси:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (v - v_s) \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}. \quad (2)$$

В уравнениях (1) – (2) используются следующие обозначения:

$\bar{U} = (u(t, x, y), v(t, x, y))$ – вектор скорости, заданный своими компонентами u, v ; ω – вихрь, ψ – функция тока, Re – число Рейнольдса, $C(t, x, y)$ – концентрация примеси, v_s – скорость оседания примеси под действием силы тяжести или скорость подъема примеси, D – коэффициент диффузии. В зависимости от знака v_s примесь относительно потока жидкости оседает ($v_s > 0$), поднимается ($v_s < 0$) или находится в равновесии ($v_s = 0$) и переносится вместе с ним. Внутренние свойства примеси определяются экспериментальным подбором коэффициента диффузии D и скорости оседания или подъема v_s .

Граничные и начальные условия для скоростей ставятся исходя из известных для шахты Кольчугинской объемов закачиваемой и откачиваемой жидкости. Граничные условия для функции тока ψ определяются численным интегрированием известного профиля скорости. Начальные и граничные условия для вихря ω определяются путем численного дифференцирования известного профиля скорости. Считается, что в начальный момент времени в области решения нет примеси. Известна концентрация загрязнений в поступающей через входную и верхнюю границы жидкости; на выходной границе ставится условие свободного вытекания примеси; на нижней границе ставится условие накопления осадка вида: $D_1 \frac{\partial C}{\partial y} + v_s C = C_D - C_{v_s}$, где D_1 – коэффициент диффузии примеси у дна, $C_D(t, x, y)$ – расход отрывающихся от дна частиц (отвечает за размыв осадка), $C_{v_s}(t, x, y)$ – расход оседающих частиц (определяет аккумуляцию примеси на дне).

Накопление и уплотнение осадка взвешенных примесей происходит в достаточно тонком слое у дна, который называют активным. Как только концентрация осевшей примеси в активном слое достаточно возрастает, то осадок начинает слеживаться и через некоторое время полностью перестает размываться течением жидкости. В модели слеживание осадка соответствует изменению формы дна, за счет передвижения нижней границы внутрь области решения, которое определяется исходя из достижения концентрацией примеси в активном слое порогового значения C^* , и сохранением этого значения на протяжении порогового времени слеживания T^* . При этом в слое со слежавшимся осадком нет течения жидкости, и не происходит дальнейшего накопления и уплотнения осадка примеси.

Параграф 1.3. посвящен построению модели «самоизлива» жидкости из шахты.

Если отработанные горные выработки не используются как очистные сооружения, из них все равно приходится откачивать излишки жидкости для поддержания уровня грунтовых вод и предотвращения подтопления наземных

территории. Это приводит к дополнительным затратам. Для экономии можно было бы бурить скважины, через которые под действием давления поступающих через верхнюю кровлю грунтовых вод жидкость будет «самоизливаться». Для реализации подобного проекта по «самоизливу» жидкости из шахты важно знать, а будут ли вымываться потоком жидкости из выработанного пространства частицы нерастворенных всплывающих или оседающих не слежавшихся примесей.

Рассматривается модель участка обводненной шахты, характерной для затопленной горной выработки прямоугольной формы с полостью вдоль верхней кровли и «сливной скважиной», с границей $\Gamma = \cup_{i=1}^{12} \Gamma_i$ (см. рисунок 3). Через границы $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ в область решения поступают грунтовые воды, через Γ_1 жидкость «самоизливается». За $\Gamma_i, i = 5, \dots, 12$ обозначаются непроницаемые границы.

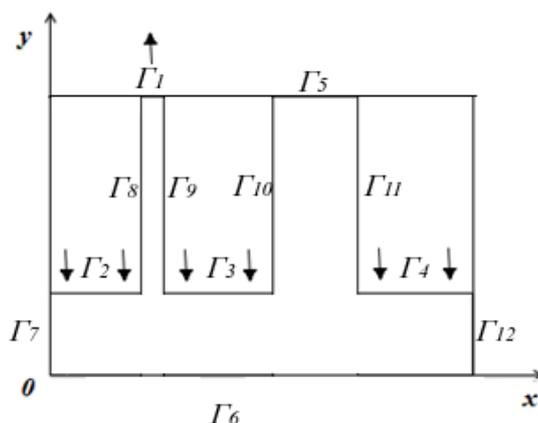


Рисунок 3 – Область решения для задачи о подъеме примеси.

В случае моделирования «самоизлива шахтных вод» сколько находятся взвешенных примесей внутри неизвестно, не контролируется процесс истечения жидкости из выработки, трудно выяснить есть ли вблизи скважины полости, в которых скопилась примесь, также выработка может находиться на разной глубине. По этим причинам неизвестно как будет развиваться течение жидкости при «самоизливе», и как всплывающие примеси будут распространяться в потоке жидкости. Поэтому в диссертационной работе рассматриваются три наиболее характерные для выбранной области решения модели течения жидкости.

Первая – модель течения вязкой однородной несжимаемой жидкости (свойственной для воды), описываемая системой уравнений Навье – Стокса (1).

Вторая и третья – модели течения идеальной стратифицированной и идеальной нестратифицированной жидкости в приближении Буссинеска, описываемые уравнением Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + k^2 \psi = \psi_1, \quad (3)$$

где $\psi_1(x, y)$ – заданная функция, k – коэффициент стратификации. Если $k = 0$ жидкость является нестратифицированной, и стратифицированной в противном случае.

Накопление всплывшей примеси происходит в тонком слое у верхней кровли, который называют активным слоем. Увеличение концентрации всплывшей примеси в активном слое физически возможно до некоторой предельной концентрации $C^* < 1$, при достижении которой толщина активного слоя увеличивается. Особенностью в данном случае является то, что активный слой из всплывшей примеси может размываться потоком жидкости. Образование слоя из всплывшей примеси моделируется за счет передвижения внутрь области верхней границы области решения для расчета концентрации при неизменных границах для скорости. Передвижение верхней границы внутрь области решения для концентрации определяется исходя из достижения концентрацией примеси в активном слое порогового значения $C^* < 1$. Граничное условие для концентрации будет переноситься на измененную границу.

В параграфе 1.4 формулируются основные выводы к первой главе.

Вторая глава состоит из шести параграфов. В ней рассматриваются вопросы численного решения поставленных дифференциальных задач. Определяется алгоритм и последовательность решения.

В параграфе 2.1. освещен вопрос дискретизации моделей. Области решения покрываются конечно-разностной сеткой с шагами h_{xi}, h_{yj} по пространству и шагом τ по времени. Частные производные, входящие в уравнения и граничные условия, аппроксимируются в узлах разностной сетки. Для аппроксимации первых производных внутри области используются разности против потока с первым порядком точности, а на границе – аппроксимации внутрь области с первым порядком. Вторые производные аппроксимируются с первым порядком по пространственным переменным на неравномерных сетках.

В параграфе 2.2. рассматривается метод решения уравнений переноса вихря и примеси. Для их решения используется схема стабилизирующих поправок.

В параграфе 2.3. описывается метод решения уравнений Пуассона и Гельмгольца. Полученные после их аппроксимации разностные схемы можно записать в виде систем линейных алгебраических уравнений вида $Au = f$, где A – линейный оператор, определенный в вещественном m -мерном гильбертовом пространстве H_m , со скалярным произведением (u, v) и нормой $\|u\| = (u, u)^{1/2}$, $u, v \in H_m$, m зависит от краевой задачи и количества узлов разностной сетки в области решения и определяется количеством неизвестных, f – заданный вектор, u – вектор искомой функции.

Из-за слеживания осадка область решения может значительно меняться, и, как следствие, матрица полученной СЛАУ может не обладать такими

свойствами как симметричность и положительная определенность. Поэтому для решения полученной системы используется сходящийся метод минимальных невязок неполной аппроксимации с глобальной оптимизацией итерационных параметров, который применяется даже для особенных или почти особенных операторов.

В **параграфе 2.4.** формулируется численный алгоритм изменения границы для моделирования слеживания осадка и накопления слоя из всплывшей примеси. Шаг по пространству выбирается таким образом, чтобы при дальнейшем его измельчении толщина активного слоя не изменялась. Для моделирования слеживания осадка предложен следующий численный алгоритм изменения границы: (1) в узлах сетки у дна проверяется выполнение условия вида: $C \geq C^*$ и $t \geq T^*$; (2) граница области решения переносится внутрь области в ближайšie по вертикали расчетные узлы сетки, в которых это условие не выполняется; (3) граничные условия на передвинутую границу переносятся без изменений с прошлой границы. Для моделирования накопления слоя из всплывшей примеси используется следующий численный алгоритм изменения границы области решения: (1) в узлах сетки у верхней границы проверяется выполнение условия вида: $C \geq C^*$, в случае его выполнения дальнейшее накопление примеси будет проходить в слоях с меньшей концентрацией примеси; (2) граница области решения для примеси переносится внутрь области в ближайšie по вертикали расчетные узлы, в которых концентрация не превышает порогового значения C^* ; (3) граничное условие для примеси переносится с прошлого положения границы на текущее без изменений. Компоненты вектора скорости пересчитываются на каждом шаге по времени в исходной области решения.

В **параграфе 2.5.** приводятся расчеты тестовых модельных задач на последовательности сеток с измельчением шага по времени и пространству. Нормы разностей решения уменьшаются с уменьшением шагов.

Основные выводы ко второй главе диссертационной работы формулируются в **параграфе 2.6.**

В **главе 3** приводятся результаты численного моделирования процессов очистки шламовых стоков в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт. На основании результатов численного моделирования производится оценка времени работы выработки как очистного сооружения.

Параграф 3.1. посвящен моделированию распространения оседающих примесей, здесь приводятся результаты численных экспериментов, полученные с помощью разработанного и зарегистрированного программного комплекса. Приводятся результаты расчетов, полученных на последовательности сеток с измельчением шага по времени и пространству. Проводится исследование влияния основных характеристик течения и примеси, а также фракционного состава загрязнений на получаемые результаты.

При практическом применении способа очистки в отработанных горных выработках важно не допустить «залпового выброса» накопленных примесей и оценивать время до его возникновения. Такое время будем называть временем безопасной работы. Для его оценки в численных экспериментах учитываются реальные размеры ш. Кольчугинской и реальные параметры угольных шламов. Характерным размером выбирается высота ствола шахты. Характерной скоростью берется скорость закачки жидкости в выработку. На основании выбора характерных величин в диссертационной работе приводится сопоставление реального и расчетного времени, и для всех результатов численных экспериментов указывается не расчетное время, а соответствующее ему реальное.

Как правило, в шламовых стоках выделяют до пяти фракций частиц различной крупности. Однако по фракционному составу примеси условно можно поделить на «летучие» и «тяжелые». Поэтому рассмотрим примесь, состоящую из двух фракций (см. рисунок 4а).

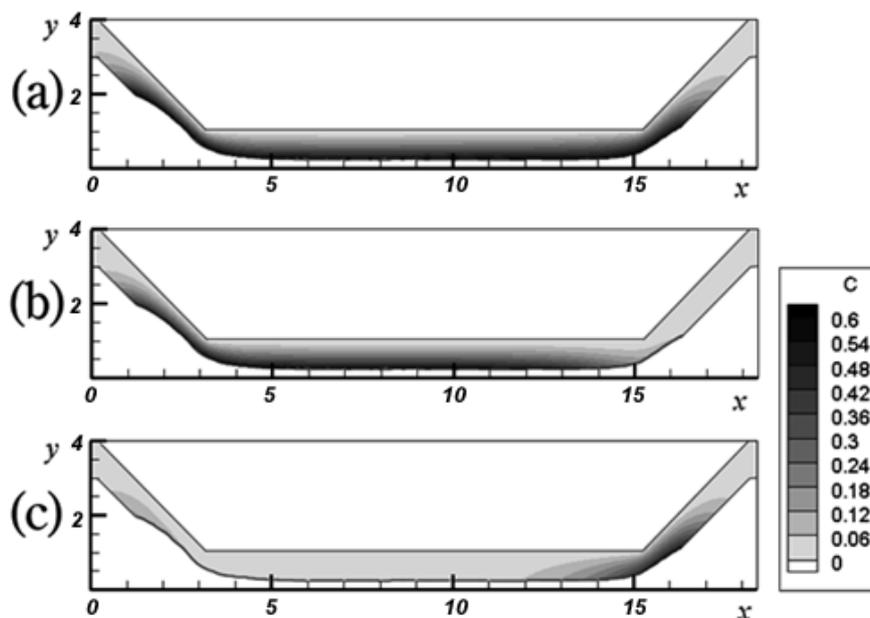


Рисунок 4 – Распространение примеси, состоящей из двух фракций частиц, где: (а) – суммарное поле концентрации; (б) – «тяжелая» фракция; (с) – «легкая» фракция.

Летучие примеси представляют собой самые мелкие частицы, тяжелые фракции, наоборот, состоят из крупных частиц. Последние в значительной мере осаждаются, их концентрация увеличивается ближе к нижней границе области решения (см. рисунок 4б). Осадок из тяжелых фракций слеживается, что приводит к изменению области решения и соответствующему увеличению скорости течения в месте сужения основного канала. Из-за этого, а также за счет большой диффузии и плохой осаждаемости, легкие фракции интенсивно распространяются по области решения, незначительно выпадают в осадок, и существенно вымываются (см. рисунок 4с), увеличивая мутность откачиваемой жидкости.

В ходе эксплуатации шахты Кольчугинской как очистного сооружения на протяжении 14 лет уровень концентрации загрязнений в откачиваемой жидкости остается стабильным. Для оценки данного показателя в диссертационной работе приводятся графики изменения среднего значения концентрации примеси на выходной границе C_{out} (см. рисунок 5). Как видно из графика, в полученных численных расчетах примерно через полгода концентрация примеси в откачиваемой жидкости достигает значения 21 мг/л и на протяжении 780 месяцев (≈ 65 лет) эта величина незначительно меняется (см. рисунок 5b).

В дальнейшем слеживание выпавшего осадка приводит к сужению канала и «летучие» фракции примеси «вымываются». Концентрация загрязнений на выходной границе области решения резко растет (см. рисунок 5a) – происходит «залповый выброс».

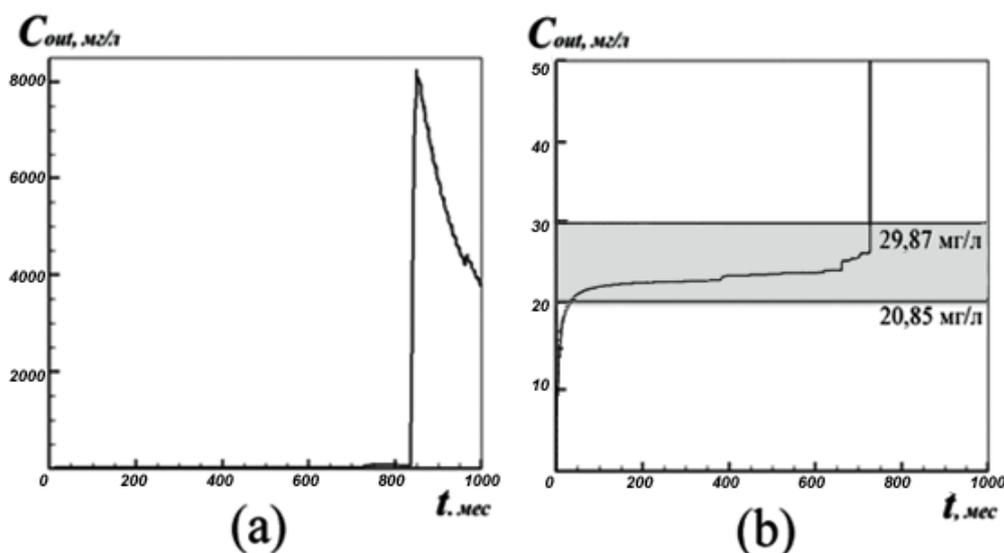


Рисунок 5 – Графики изменения концентрации примеси на выходной границе области решения, где (a) – общий график, (b) – увеличенная часть графика для $C_{out} \in [0, 50]$ мг/л, серым выделен диапазон, соответствующий натурным данным.

В диссертационной работе приводятся результаты численного моделирования, показывающие, что такие факторы как сужение основного канала выработки; изменение гидродинамических условий вслед за сезонным колебанием уровня грунтовых вод или изменением объема закачиваемых промышленных стоков; фракционный состав примеси с преобладанием летучих плохослеживаемых взвешенных частиц, приводят к сокращению времени безопасной эксплуатации горной выработки как очистного сооружения, так как явление «залпового выброса» в этих случаях происходит раньше, а пиковые концентрации залпа могут существенно расти.

В параграфе 3.2. рассматриваются результаты численного моделирования «самоизлива» жидкости из шахты, полученные для моделей

вязкой (см. рисунок ба – бс), идеальной стратифицированной (см. рисунок бd – бf) и идеальной нестратифицированной жидкостей (см. Рисунок бg – би). Вихревые течения, характерные для моделей вязкой и идеальной стратифицированной жидкостей, перемешивают примесь и частично задерживают ее внутри полости у верхней границы. Однако из-за действия диффузии частицы примеси вовлекаются в поток самоизливающейся жидкости, что приводит к почти полному ее вымыванию из области решения. Течением же нестратифицированной идеальной жидкости примесь вымывается из области решения еще интенсивнее за счет отсутствия вихрей.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что какая бы из рассмотренных моделей течения жидкости ни рассматривалась, примеси все равно будут вымываться из области решения при «самоизливе шахтных вод».

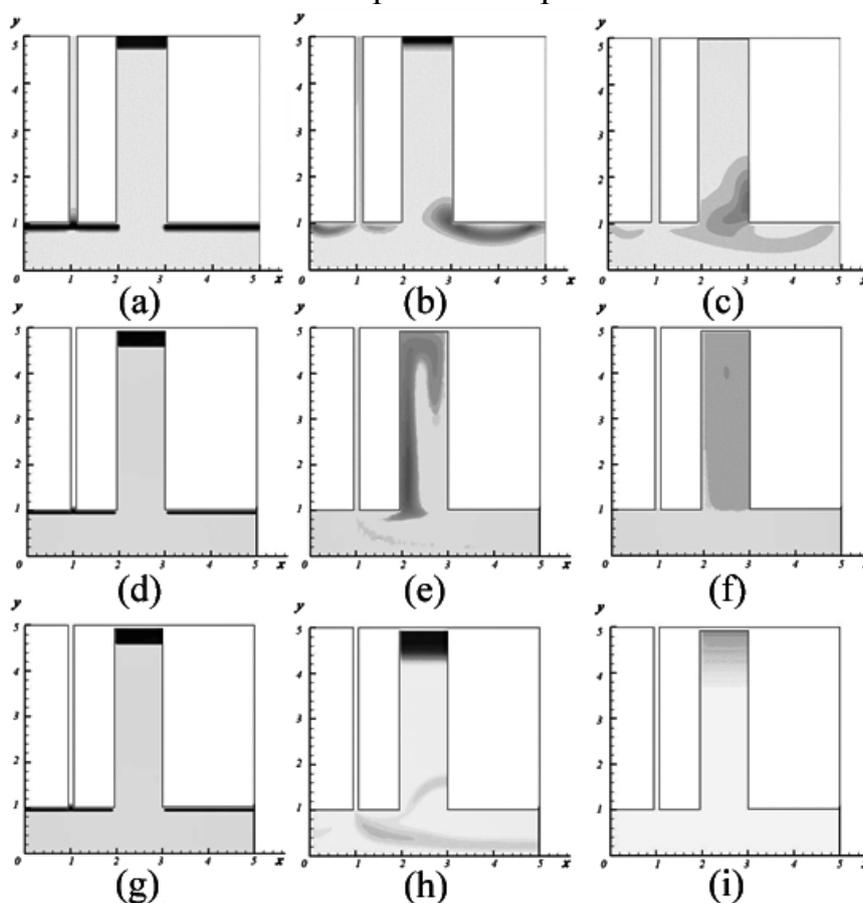


Рисунок 6 – Размыв слоя всплывших примесей из шахты потоком «самоизливающейся»
 (a) – (c) вязкой, (d) – (f) идеальной стратифицированной, (g) – (i) идеальной
 нестратифицированной жидкости на моменты расчетного времени по столбцам:
 1) $t = 0$, 2) $t = 50$, 3) $t = 100$.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Для исследования процессов очистки жидких промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках закрытых и затопленных угольных шахт предложена математическая модель с учетом

всплытия и оседания примесей, а также с возможностью изменения области решения из-за слеживания осадка.

2. Для численной реализации предложенной модели разработан программный комплекс, который позволяет исследовать течение и распространение оседающих и всплывающих нерастворенных примесей в области, моделирующей закрытый затопленный горно-технологический объект, с возможностью изменения области решения и выделением до пяти фракций частиц примеси.
3. С помощью разработанного и зарегистрированного программного комплекса получены результаты численного моделирования заиливания выработанного пространства, и обнаружена возможность «залпового выброса» примеси из шахты, когда концентрация загрязнений в откачиваемой жидкости резко и значительно растет.
4. Получены оценки времени безопасного использования выработки как очистного сооружения – до появления «залпового выброса».
5. Получены результаты численного моделирования «самоизлива шахтных вод», которые показали, что как всплывающие, так и несслежавшиеся оседающие примеси будут вымываться. Поэтому в случае реализации подобного проекта необходимо предусматривать очистку «самоизливающихся шахтных вод» на резервных очистных сооружениях.

Основные публикации по теме исследования

В рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Бондарева, Л.В. Численное моделирование процесса очистки промышленных стоков в отработанных горных выработках / Л.В. Бондарева, Ю.Н. Захаров // Совместный выпуск по материалам международной научной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»: Вычислительные технологии, Новосибирск, 2015. – Т. 20. – Вестник КАЗНУ им. Аль-Фараби, серия математика, механика и информатика, Алматы, 2015. – №. 3(86), Ч. 3. – С. 121 - 131.
2. Гудов, А.М. Наукоемкий программный web-инструментарий для решения задач экологии угольного региона / А.М. Гудов, С.Ю. Завозкин, И.В. Григорьева, Л.В. Бондарева, Н.Н. Окулов // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – Т. 1. – №. 2(62). – С. 22 - 30.
3. Бондарева, Л.В. Моделирование процесса очистки промышленных стоков с помощью затопленных горных выработок / Л.В. Бондарева, Ю.Н. Захаров // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 122 - 127.
4. Бондарева, Л.В. Об одной модели распространения всплывающей примеси в затопленных горных выработках / Л.В. Бондарева, М.А. Гурских,

Ю.Н. Захаров // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2014. – № 4 (60). – С. 54 - 61.

В рецензируемых журналах (SCOPUS и WebofScience):

5. Bondareva, L. Simulation of Industrial Wastewater Treatment from the Suspended Impurities into the Flooded Waste Mining Workings Engineering / L. Bondareva, Yu. Zakharov, A. Goudov // Proceedings of the 5th International Conference “Modern Technologies For Non-Destructive Testing”. Tomsk, October 03-08, 2016. IOP Conf. series: Materials and Engineering. – 2017. – No. 189. – P.1 – 5. DOI: 10.1088/1757-899X/189/1/012011
6. Zakharov, Yu. Simulation of Domestic and Industrial Wastewater Disposal in Flooded Mine Workings/ Yu. Zakharov, L. Bondareva // Proceedings of the International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (SPbUCEMF-2015). Saint-Petersburg, March 18-20, 2015. Procedia Engineering. – 2015. –No. 117. –P. 389 - 396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.183

Монография:

7. Бондарева, Л.В. Распространение нерастворенных примесей в затопленных подземных горных выработках: монография / Л.В. Бондарева, Ю.Н. Захаров, В.П. Потапов, Е.Л. Счастливцев. – Кемерово: Изд-во КемГУ, 2017. – 91 с.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

8. Бондарева, Л.В. Программный комплекс для численного расчета течения и распространения примесей в закрытых водоёмах «Distribution and Stream of Impurity in the Closed Reservoirs»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617559 / Л.В. Бондарева, Ю.Н. Захаров; КемГУ. – № 2014615508; заявл. 03.06.2014. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ, г. Москва, 28 июля 2014 г.

В трудах международных и всероссийских конференций:

9. Бондарева, Л.В. Моделирование очистки промышленных стоков от нерастворенных примесей в затопленных подземных выработках закрытых угольных шахт / Л.В. Бондарева // Сборник научных трудов V Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее». В 3 томах. Томск. 03-09 октября 2016 г. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2016. – Т.1. – С. 48 - 49.
10. Бондарева, Л.В. Численное моделирование очистки шламовых стоков от взвешенных примесей / Л.В. Бондарева // Материалы XV Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование». Алтайский край, пос. Катунь. 12-16 сентября, 2016 г. Томск: Изд-во Томского государственного университета. – 2016. – Ч. 2. – С.144 - 148.