

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Старченко Александра Васильевича на диссертацию Бондаревой Любови Васильевны на тему «Распространение нерастворенных примесей в затопленных подземных выработках», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация Л.В. Бондаревой направлена на построение математической модели очистки жидких промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках затопленных угольных шахт и получении численной оценки эффективности такого способа очистки.

Тема исследования является актуальной, поскольку до сих пор нет окончательного решения о перспективности использования затопленных горных выработок для очистки различных промышленных стоков, в том числе поступающих и от обогатительных фабрик, на которых проводится повышение качества (мокрое обогащение) добываемого угольного топлива. Для получения ответа на поставленные задачи в диссертации было применено численное моделирование, поскольку в рассматриваемой ситуации научного поиска решения только математическое моделирование в той или иной степени может подтвердить перспективность выбранного способа очистки промышленных стоков.

Во введении автор работы перечислил основные экологические проблемы, связанные с добычей угольного топлива в Кузнецком бассейне, среди которых не последнее место занимают проблемы загрязнения естественных водоемов и подземных грунтовых вод жидкими промышленными стоками, образовавшимися либо в результате добычи угля или его обогащения. Наряду с традиционными методами очистки промышленных стоков в Кузбассе также применяется очистка в отработанных горных выработках затопленных угольных шахт. Однако поскольку исследование эффективности этого способа очистки не проводилось, автором было принято решение в качестве цели диссертации выбрать применение методов математического моделирования очистки жидких промышленных стоков. Дается обоснование выбора этого способа исследования рассматриваемого процесса, определяется вид уравнений и замыкающих соотношений математических моделей, а также применяемых для их решения численных методов. В заключительной части введения формулируются основные результаты работы, которые соответствуют трем областям паспорта специальности, научная новизна работы, достоверность и обоснованность полученных результатов, теоретическая и практическая ценность работы, указывается личный вклад автора, структура и объем диссертации, степень апробации ее результатов.



В первой главе подробно рассмотрена физическая постановка задачи, выполнено построение математической модели ламинарного течения, оседания и подъема примеси и слеживания осадка в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных с необходимыми для получения единственного решения начальными и граничными условиями. Приводятся выбранные алгоритмы учета изменения области решения из-за накопления и слеживания осадка или образования слоя всплывшей примеси.

Вторая глава диссертации посвящена описанию вычислительных технологий, используемых для решения систем дифференциальных уравнений, составляющих основу математической модели. В качестве надежного, устойчивого, хорошо апробированного метода решения уравнения для вихря или уравнения переноса примеси используется схема стабилизирующей поправки. Для решения уравнения Пуассона или уравнения Гельмгольца применяется схема неполной аппроксимации, которая хорошо себя зарекомендовала при решении систем линейных уравнений с плохообусловленной матрицей. Для этой схемы подробно обсуждается выбор параметров метода минимальных невязок неполной аппроксимации. Отдельное внимание уделено численным алгоритмам изменения границы области решения при моделировании слеживания осадка или при моделировании образования слоя всплывшей примеси. В заключительной части второй главы рассмотрены тестовые задачи, решение которых демонстрирует применимость выбранных и предложенных вычислительных технологий: задача об осаждении и слеживании осадка в вертикальном канале, задача об осаждении примеси при ламинарном течении Пуазейля в горизонтальном плоском канале с непроницаемыми направляющими поток стенками, задача об осаждении примеси при ламинарном течении в плоском горизонтальном канале с проницаемой верхней границей. Для всех тестовых задач были проведены расчеты на последовательности вложенных сеток и для различных шагов по времени. Полученные результаты демонстрируют практическую сходимость разностных схем при дроблении сетки по пространству и по времени.

Третья глава диссертации посвящена представлению результатов численного моделирования процессов очистки промышленных стоков в отработанных горных выработках затопленных угольных шахт. При этом основной целью исследований является выявление тенденций развития рассматриваемого процесса в зависимости от различных параметров, но и оценка времени работы очистного сооружения до залпового выброса накопленных примесей. Первоначально автор уделил много внимания выбору и обоснованию параметров моделируемого процесса. На последовательности сеток исследовал сходимость вычислительного процесса. Провел исследование осаждения примеси, состоящей из одной фракции частиц. Исследовал влияние значения



коэффициента диффузии, скорости оседания примеси, интенсивности накопления осадка, величины пороговой концентрации слеживания осадка на осаждение примеси на донной части очистного сооружения, а также на величину временного промежутка до залпового выброса примеси в выходном сечении очистного сооружения. Также было проведено моделирование поведения примеси, состоящей из нескольких фракций частиц, выполнено исследование причин резкого увеличения концентрации примеси в откачиваемой из очистного сооружения жидкости. Заключительная часть третьей главы посвящена изложению результатов моделирования появления на поверхности всплывающих примесей вместе с водами, накопленными в результате поступления в затопленную горную выработку грунтовых вод. В результате проведенных вычислительных экспериментов показано, что в этом случае необходимо уделять повышенное внимание очистке вытекающих на поверхность вод от легких примесей.

В ходе выполнения работы автором получены следующие новые результаты:

- предложена новая математическая модель очистки промышленных стоков от нерастворенных примесей в отработанных горных выработках с учетом всплытия и оседания примеси, изучения особенностей развивающегося в затопленной шахте течения и слеживания осадка;
- при численной реализации математической модели с помощью метода конечных разностей и неявных разностных схем разработан оригинальный алгоритм учета изменения границы области решения из-за накопления и слеживания осадка примеси;
- с помощью разработанного автором программного комплекса получены результаты вычислительных экспериментов, демонстрирующие влияние различных параметров примеси и ее интенсивности осаждения на заиливание выработанного пространства и явление «залпового выброса», при котором существенно увеличивается концентрация примеси в откачиваемой жидкости. Получены оценки времени эксплуатации отработанной горной выработки как очистного сооружения до возникновения «залпового выброса».

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается обоснованностью выбранных математических моделей и численных алгоритмов, контролем при проведении вычислений за выполнением законов сохранения массы и импульса, сравнением с известными из литературы экспериментальными результатами других авторов.



Основные результаты диссертации опубликованы в четырех рецензируемых журналах из списка ВАК РФ и двух журналах, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертации утверждается, что уравнение (1.8) записано в безразмерном виде. Однако в таком случае в (1.8) должен появиться критерий, отвечающий за соотношение конвективного и диффузионного переноса примеси (диффузионный аналог числа Рейнольдса). В работе в явном виде не приведены формулы, по которым осуществляется обезразмеривание постановки задачи (1.3.1)-(1.8), отсутствуют формулы для безразмерной скорости оседания и безразмерного коэффициента диффузии. Так же нет обоснования выбранных для моделирования значений скорости оседания, коэффициента диффузии и других важных параметров.
2. На стр. 46 утверждается, что при  $|v_s| \gg D$  примесь состоит из «тяжелых частиц», однако не учтено, что при  $v_s < 0$  частицы примеси будут подниматься.
3. Использование в разностных схемах уравнений для вихря и концентрации примеси противопотоковой схемы является недостатком работы, поскольку для рассматриваемых значений скорости и размера ячеек сетки коэффициент схемной вязкости больше коэффициента физической вязкости.
4. На рисунке 2.7а линии тока должны быть перпендикулярны границам  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Концентрация на границе  $\Gamma_2$  должна быть равна нулю в соответствии с выбранными граничными условиями.
5. На странице 84 при выборе размеров области исследования диссертант решил ограничиться «коротким» плоским каналом с соотношением длины к высоте 18.4:1, хотя для профиля горной выработки шахты «Кольчугинская» это отношение = 4350м:3м=1450:1. Выбор «короткого» канала является необоснованным, тем более, что при рассматриваемом значении числа Рейнольдса для течения в канале длина гидродинамической стабилизации будет составлять порядка 100 калибров канала (>18.4). Также и концентрация примеси при гравитационном осаждении уменьшится более значительно в «длинном», чем в «коротком» канале.
6. В качестве основного принятого приближения рассматриваемого процесса указывается, что течение в канале жидкости, содержащей нерастворенную примесь, является ламинарным. При значении числа Рейнольдса на входе в канал горной выработки 1600 это действительно так, но в случае, когда поток грунтовых



вод, поступающих в канал через верхнюю границу, имеет расход в четыре раза больше чем значение расхода на входе, средняя скорость потока ближе к выходной части канала будет в пять раз больше и число Рейнольдса будет иметь значение 8000, что соответствует развитому турбулентному режиму течения.

7. На рисунках 3.37а и 3.39в графики ежегодного изменения объема поступающих грунтовых вод во времени не соответствуют описаниям в тексте: увеличению объема с марта по май (3-5, 15-18, ... месяцы) и уменьшению объема с июня по август (6-8, 18-20, ... месяцы).

Отмеченные недостатки не снижают качество проведенного исследования, не умаляют их ценность и не влияют на основные результаты диссертации.

### Заключение

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе представлены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как решение научной задачи, имеющей существенное значение в развитии методов математического моделирования для исследования распространения нерастворенных примесей в затопленных подземных выработках.

Работа написана ясно и аккуратно оформлена. Однако следует отметить низкое качество тоновых рисунков.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Л.В. Бондаревой соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор Бондарева Любовь Васильевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,  
декан механико-математического факультета,  
заведующий кафедрой вычислительной  
математики и компьютерного моделирования ТГУ  
д.ф.-м.н., профессор

13.02.2019  
Старченко Александр  
Васильевич

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
тел. 382-2-529740, e-mail: [dean@math.tsu.ru](mailto:dean@math.tsu.ru)

