

# Численное моделирование процесса очистки промышленных стоков в отработанных горных выработках\*

Л.В. Бондарева, Ю.Н. Захаров

Кемеровский Государственный Университет, Кемерово, Россия  
l.v.kemerova@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящается математической модели процесса очистки и захоронения промышленных и бытовых отходов в отработанных горных выработках затопленной угольной шахты. В настоящее время в Кузбассе для очистки шламовых стоков углеобогащательной фабрики «Комсомолец» используются отработанные горные выработки ш. «Кольчугинской». При всей идейной простоте и низкой стоимости применения такого подхода остается актуальной и важной проблема исследования и прогнозирования возможного развития процессов очистки. Т.к. обводненная выработка представляет собой «черный ящик», математическое моделирование и численные эксперименты становятся удобным инструментом для решения задачи прогнозирования. Целью исследования является построение и изучение математической модели течения и распространения взвешенных примесей. Рассматривается модель оседания примеси. Предусматривается возможность изменения области решения из-за слеживания осадка. Приводятся картины течения и распространения примеси. Модель позволяет прогнозировать «залповый выброс» взвешенных примесей из выработки.

**Ключевые слова:** Промышленные и бытовые стоки, захоронение, очистка, математическое моделирование, уравнения движения жидкости, уравнение переноса примеси.

## Введение

Для Кузбасса загрязнение водных ресурсов промышленными и бытовыми сточными водами становится серьезной угрозой экологической безопасности [1]. Особо усугубляет эту проблему работа углеперерабатывающих предприятий. Так их жидкие стоки включают в себя, в основном, отходы флотации и отводимые с фабрик шламовые воды. Они представляют собой гидросмесь, в состав которой входят жидкая, твердая и газообразная фазы. Жидкая фаза составляет 95-98% по массе и состоит в основном из шахтной или речной воды, потребляемой фабрикой в процессе переработки угля. Газообразная фаза представлена воздухом, находящимся в ней в основном и растворенном состоянии. А твердая часть состоит из частиц минерального и органического происхождения, при этом содержание частиц крупностью до 50 мкм в ней достигает 80 - 95% [2]. Сточные воды угольных предприятий могут содержать: взвешенные частицы (угольная и породная пыль, частицы глины), соли тяжелых металлов, фенолы, аммиак, нитраты, нитриты, свободную серную кислоту, серу и другие вредные компоненты [3]. Внедрение на шахтах высокомеханизированных комплексов со сложной сетью гидросистем привело к увеличению расходов нефтепродуктов при ведении горных работ, часть из которых попадает в шахтную воду и дополнительно загрязняет ее [3].

Обычно комплекс мероприятий, проводимых для обезвреживания жидких промышленных стоков угольной промышленности, является трудоемким и затратным. Для очистки сточных вод угольных предприятий сегодня используются самые разнообразные технологии водоочистки, отличающиеся степенью очистки, сложностью используемого оборудования, энергетическими и денежными затратами [4] - [9]. Известно, что при работе очистных сооружений образуется значительное количество осадка с содержанием взвешенных

\* Работа выполнена в рамках проектной части Государственного задания 1.630.2014/К.

веществ до 5 г/куб.дм. Чаще всего обработка осадка производится на иловых площадках, в прудах-отстойниках или илонакопителях, где совмещаются процессы его обеззараживания и складирования. Такие сооружения занимают значительные площади, а также являются потенциальными источниками загрязнения окружающей среды [10]. Однако на практике, эта технология получила широкое распространение как наиболее простая в обслуживании и конструктивном исполнении.

В Кузбассе используется и другой способ очистки промышленных стоков угольной промышленности с помощью отработанных горных выработок затопленных угольных шахт. Метод реализуется для очистки шламовых стоков углеобогадательной фабрики «Комсомолец» в отработанных выработках ш. «Кольчугинской». Жидкие промышленные стоки углеобогадательной фабрики закачиваются в выработанное пространство закрытой затопленной угольной шахты. Предполагается, что в шахте будет происходить их естественная очистка за счет отстаивания и разбавления фильтрующимися в выработанное пространство грунтовыми водами. Данная технология подразумевает не только очистку, но и складирование осажденных илов в выработанном пространстве [10]. Изучение этого альтернативного способа очистки представляет большой практический интерес для Кузбасса. В Кемеровской области в результате закрытия нерентабельных угледобывающих предприятий, заполнены техногенными подземными водами огромные по площади подземные пространства. Более того часто такие затопленные горные выработки находятся в черте городов и их потенциально можно использовать как очистные сооружения.

При всей идейной простоте и низкой стоимости его применения остается актуальной и важной проблема исследования и прогнозирования возможного развития протекающих внутри процессов очистки. Так наибольшую опасность представляет вероятность «залпового выброса» накопленных примесей, при котором может происходить кратковременное, но интенсивное увеличение концентрации и объема примесей в откачиваемой жидкости. Причиной возникновения данного явления могут стать изменения внутренней структуры выработки из-за обрушения верхней кровли или слеживание накопившегося осадка, сезонное изменение гидрологического режима в регионе, а как следствие увеличение объема фильтрующихся грунтовых вод и другие факторы. Для безопасного практического применения такого метода очистки 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. В связи с этим возникает необходимость в применении математического моделирования и численных экспериментов, как инструментов для прогнозирования вероятного развития протекания процессов, проходящих в затопленных горных выработках.

## **1 Математическая модель оседания примеси и изменения области решения из-за слеживания осадка**

Шламовые гидросмеси относятся к неустойчивым, расслаивающимся системам, благодаря выпадению из них твердых частиц. Процесс сложен для аналитического описания, так как на скорость осаждения частиц полидисперсной смеси, какой являются шламы, влияют взаимодействие сил тяжести, сопротивления среды, гидродинамических факторов, различная скорость падения частиц разной крупности. При осаждении с течением времени в единице объема в верхней части гидросмеси число частиц уменьшается и изменяется соотношение между долей частиц различной крупности. Более крупные частицы осаждаются быстрее, и их содержание в верхних слоях уменьшается быстрее, чем мелких. Соответственно в

нижних слоях гидросмеси отмечается противоположная тенденция. Очень мелкие частицы могут оставаться в верхних слоях, поскольку силы их веса могут оказаться настолько малыми, что силы сопротивления среды и броуновское движение могут их уравновесить. Одновременно с осаждением твердой фазы образуется и уплотняется осадок [2].

Таким образом, в модели процесса очистки жидких промышленных стоков от взвешенных оседающих примесей в отработанных горных выработках будем учитывать три процесса: течение жидкости, распространение частиц примеси в найденном потоке и изменение области решения из-за накопления и слеживания осадка. В данной работе для моделирования течения жидкости будем использовать безразмерную систему уравнений Навье - Стокса. Для определения распространения примеси будем использовать уравнение переноса, которое является следствием закона сохранения непрерывных неоднородных сред [11]. За счет выбора граничных условий на нижней границе области решения будем моделировать массообмен между дном и близлежащими слоями жидкости, а также будем предусматривать возможность изменения области решения из-за слеживания осадка.

В литературе [12] - [15] широко представлены модели, позволяющие изучить процесс движения речных наносов. Обычно исследователи этой проблемы учитывают три взаимозависимых процесса: образование взвешенных наносов, их перенос потоком и массообмен между донными отложениями и прилежащими слоями жидкости. Для моделирования первого процесса используется диффузионная теория, для второго - уравнения переноса, а для оценки расходов донных наносов применяются эмпирические формулы [14]. Однако для моделирования очистки шламовых стоков эта методика не применима по ряду причин. Во-первых, для речного потока характерно непостоянство вертикальных и горизонтальных составляющих скоростей. Это приводит к тому, что движение частиц в потоке имеет прерывистый характер. Частицы могут двигаться скачками, перекачиваться, останавливаться и вновь вовлекаться в поток. Скорости же течения в отработанной горной выработке малы. Основной объем жидкости фильтруется через верхнюю кровлю, и течение не может перейти в турбулентный режим, который принципиально характерен для речных потоков. Более того, 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. Во-вторых, доля твердой фазы в поступающих в выработку промышленных стоках не превышает 5%, и состоит в основном из частиц крупностью до 50 мкм. Выпавшие в осадок такие примеси уплотняются, слеживаются со временем и перестают размываться течением. Поэтому для таких осадков не применимы эмпирические формулы для определения массообмена между дном и водным потоком, полученные для взвешенных примесей в руслах рек.

Будем предполагать, что в отработанную горную выработку подаются промышленные стоки, содержащие только нерастворенные примеси с известными концентрациями. Задача о течении и распространении растворенных примесей рассматривалась в работах [16] - [20]. Через верхнюю кровлю в выработку поступают «чистые» грунтовые воды. Частицы примеси таких размеров, что при принятой модели течения они на него не влияют, но оседают под действием силы тяжести и распространяются по выработке за счет диффузии и переноса вместе с потоком воды. Осевшие примеси могут накапливаться и «затвердевать» (слеживаться), если на протяжении некоторого времени не сносятся потоками воды.

Реальные размеры отработанной горной выработки и физические процессы очистки таковы, что при моделировании выбор размеров области решения повлияет только на время слеживания осадка, но не на характер и тенденции развития происходящих процессов. Поэтому, в данной работе не проводится масштабирование с реальными размерами ш. Кольчугинской, и рассматривается область решения меньшей протяженности. Отдельно стоит

отметить, что так как скорость движения жидкости в затопленной горной выработке мала, будем считать, что боковые стенки не оказывают существенного влияния на осаждение частиц примеси, поэтому будем рассматривать только двумерную модель (см. рис. 1).

Рассматривается область решения  $G$ , характерной для затопленной горной выработки формы [17] с границей  $\Gamma = \cup_{i=1}^4 \Gamma_i$ , где  $\Gamma_1, \Gamma_4$  - входное и выходное отверстия, соответственно, высоты  $H_2, \Gamma_2, \Gamma_3$  - нижняя и верхняя границы, длины  $2L_1 + 2L_2 + L_3$ .

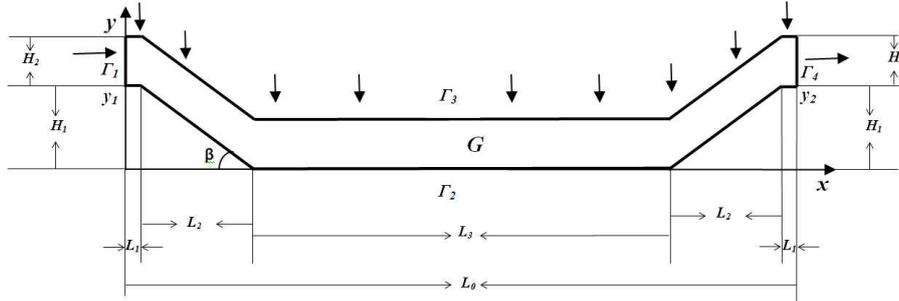


Рис. 1. Область решения для задачи об оседании примеси и слеживании осадка.

Считаем, что жидкость является однородной, вязкой и несжимаемой. Течение такой жидкости описывается безразмерной системой уравнений Навье - Стокса в переменных «функция тока - вихрь» [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} &= \frac{1}{Re} \Delta \omega, \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= \omega. \end{aligned} \tag{1}$$

Для системы уравнений (1) необходимо поставить начальные и граничные условия, но физическая постановка задачи включает только условия на скорость. Так известно, с какой скоростью происходит закачка сточных вод и можно измерить, с какой скоростью жидкость откачивается из выработки. Исходя из измерений уровня грунтовых вод и скорости откачки, можно вычислить объем фильтруемых грунтовых вод. Тогда для физических переменных можно поставить следующую начально - краевую задачу:

$$\begin{aligned} u|_{t=0} &= 0; \quad v|_{t=0} = 0; \\ \Gamma_1 : u &= u_0(t); \quad v = 0; \quad \Gamma_2 : u = 0; \quad v = 0; \\ \Gamma_3 : u &= 0; \quad v = v_0(t); \quad \Gamma_4 : u = u_1(t); \quad v = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

В (1) - (2) используются следующие обозначения:  $\vec{U} = (u(t, x, y), v(t, x, y))$  - вектор скорости, заданный своими компонентами  $u, v$ ;  $u_0(t), u_1(t), v_0(t)$  - известные функции, определенные на границе области решения  $\partial G$ ;  $Re = \frac{\tilde{u} L_0}{\nu}$  - число Рейнольдса;  $\tilde{u}$  - характерная скорость, вычисляется как максимальная скорость входного потока;  $L_0$  - характерная длина;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $\Delta$  - оператор Лапласа.

Компоненты вектора скорости  $u, v$  связаны с вихрем  $\omega$  и функцией тока  $\psi$  соотношениями:

$$\omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}; \quad u = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \tag{3}$$

Учитывая (2), зададим  $\omega, \psi$  на  $\Gamma$  следующим образом:

$$\omega|_{t=0} = 0; \quad \omega|_{\Gamma} = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{\Gamma}; \quad \psi|_{t=0} = 0; \quad \psi|_{\Gamma} = \psi_1(t, x, y), \quad (4)$$

где  $\psi_1(t, x, y)$  - известная функция, которая выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие  $\oint_{\Gamma} \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0$  [22], где  $n$  - направление внешней нормали.

Для моделирования распространения примеси используется безразмерное уравнение переноса [11], учитывающее воздействие силы тяжести и диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (v - v_s) \frac{\partial C}{\partial y} = D \Delta C. \quad (5)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} C(x, y, 0) &= C_0(x, y); \\ \Gamma_1 : C &= C_1(x, y); \quad \Gamma_2 : D_1 \frac{\partial C}{\partial y} + v_s C = C_D - C_{v_s}; \\ \Gamma_3 : C &= C_2(x, y); \quad \Gamma_4 : \frac{\partial C}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $C$  - концентрация оседающей примеси,  $C_0(x, y)$ ,  $C_1(x, y)$ ,  $C_2(x, y)$  - известные функции,  $v_s > 0$  - абсолютная величина скорости оседания частиц под действием силы тяжести,  $D$  - коэффициент диффузии,  $\tilde{v}_s$  - абсолютная величина скорости оседания частиц под действием силы тяжести у дна. На нижней границе области решения  $\Gamma_2$  определяется поток примеси, равный разности расходов отрывающихся от дна частиц примеси  $C_D(t, x, y)$  (отвечает за размыв осадка) и оседающих частиц  $C_{v_s}(t, x, y)$  (определяет аккумуляцию примеси на дне).

Осевшая и слежавшаяся у дна примесь может со временем изменять его форму. Данный процесс мы будем моделировать следующим образом: если на протяжении времени  $T^*$  в области решения вблизи границы, концентрация осевшей примеси превышает пороговое значение  $C^*$ , то будем считать, что данная примесь перестает сноситься течением, и граница области решения переносится в соответствии с концентрацией  $C^*$  и временем  $T^*$ .

## 2 Математическая модель самоизлива жидкости из выработки

Со временем, выработанное пространство закрытых угольных шахт обводняется и для поддержания уровня грунтовых вод в регионе, приходится продолжать откачку жидкости из выработки, что связано с дополнительными расходами. Для решения этой проблемы было предложено бурить скважины в затопленную горную выработку, через которые под действием давления поступающих через верхнюю кровлю грунтовых вод будет происходить самоизлив жидкости. Однако вместе с потоком жидкости на поверхность могут поступать находящиеся внутри выработки взвешенные примеси. Высока вероятность, что это будут осевшие, но не слежавшиеся на дне примеси. Течение и распространение всплывших примесей при самоизливе жидкости из шахты исследовалось в [23], а в данной работе уделяется внимание размыву не слежавшегося осадка.

При математическом моделировании рассматриваемой задачи будем полагать, что через верхний свод постоянно поступают грунтовые воды, которые считаем чистыми. Предполагаем, что выработка полностью обводнена, а у дна накоплено какое-то количество слежавшегося или не слежавшегося осадка.

Используем модель области решения  $G$ , характерной для затопленной горной выработки прямоугольной формы с полостью вдоль верхней кровли и «сливной скважиной». Область решения определяется своей границей  $\Gamma = \cup_{i=1}^{12} \Gamma_i$ . Через границы  $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$  в область решения фильтруются грунтовые воды, через  $\Gamma_1$  вытекают (см. рис. 2). За  $\Gamma_i, i = 5, \dots, 12$  обозначаются непроницаемые границы.

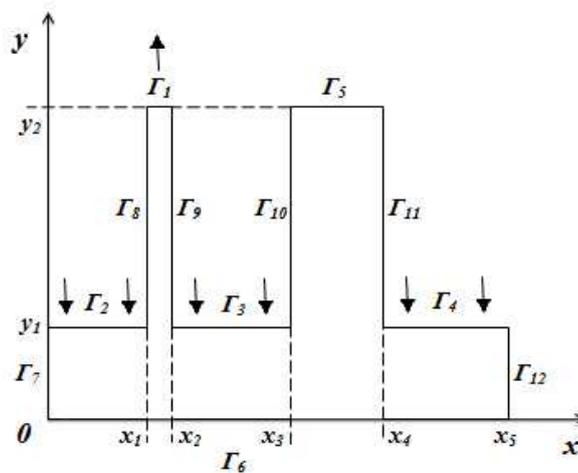


Рис. 2. Область решения для задачи о самоизливе жидкости из шахты.

На основании сравнения результатов численных расчетов распространения растворенных примесей с данными натурных измерений в [16] - [20] был сделан вывод о том, что для правильного моделирования их распространения необходимо использовать различные модели движения жидкости. В [23] для моделирования распространения всплывающих примесей использовать три модели течения жидкости. В данной работе ограничиваемся моделью идеальной стратифицированной жидкости, описываемой с помощью безразмерного уравнения Гельмгольца:

$$\Delta \psi + k^2 \psi = \psi_1. \tag{7}$$

С соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} u|_{t=0} = 0; \quad v|_{t=0} = 0; \\ \cup_{i=1}^4 \Gamma_i : u = 0; \quad v = v_i(t, x, y); \quad \cup_{i=5}^{12} \Gamma_i : u = 0; \quad v = 0; \\ \psi|_{t=0} = 0; \quad \psi|_{\Gamma} = \psi_1(t, x, y). \end{aligned} \tag{8}$$

где  $\psi(t, x, y)$  - функция тока,  $\psi_1(t, x, y)$  - известная функция, в случае прямоугольной области решения можно взять  $\psi_1 = k^2 y$ ;  $k = \frac{a}{Fr^2}$ ,  $a = \frac{\partial \rho}{\partial y}$ ,  $Fr$  - плотностное число Фруда. В данной модели  $a = \frac{\partial \rho}{\partial y} \neq 0$ , и тем самым  $k \neq 0$ , жидкость является стратифицированной, а ее течение - вихревым.

Для моделирования распространения примесей используется уравнение переноса (6) с граничными и начальными условиями:

$$\begin{aligned} C(x, y, 0) = C_0(x, y); \text{ number} \\ \Gamma_1 : \frac{\partial C}{\partial y} = 0; \quad \cup_{i=2}^4 \Gamma_i : C = 0; \quad \cup_{i=7}^{12} \Gamma_i : \frac{\partial C}{\partial n} = 0; \\ \Gamma_5 : \frac{\partial C}{\partial y} = \alpha_1 C; \quad \Gamma_6 : \frac{\partial C}{\partial y} = \alpha_2 C. \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь  $C(t, x, y)$  - концентрация примеси,  $C_0(x, y)$  - известная функция,  $v_s$  - абсолютная величина скорости оседания частиц под действием силы тяжести,  $D$  - коэффициент диффузии,  $\alpha_1 < 0$  - коэффициент, определяющий интенсивность аккумуляции примеси у дна,  $\alpha_2 \leq 0$  - коэффициент, определяющий интенсивность отрыва примеси от верхней кровли. Параметр  $\alpha_2$  будет не равен нулю, если вблизи верхней непроницаемой границы находятся еще не осевшие взвешенные частицы примеси, и будет равен нулю в обратном случае.

### 3 Методы решения и результаты расчетов

Поставленные дифференциальные задачи решаются методом сеток. Исходные дифференциальные краевые задачи аппроксимируются обычным образом на разностной, согласованной с границей, неравномерной сетке с шагом  $h_{x_i}, h_{y_j}$  по пространственным переменным и шагом  $\tau$  по времени [24].

Уравнение переноса вихря и уравнение переноса примеси решаются неявной схемой стабилизирующих поправок с противопоточной аппроксимацией конвективных членов [25]. Разностное уравнение Пуассона для функции тока решается методом минимальных невязок неполной аппроксимации с параметром – матрицей с использованием покомпонентной и глобальной оптимизации итерационных параметров [26], [27].

Решение осуществляется в два этапа: сначала решается краевая задача (1) - (4) или (7), (8) и находятся компоненты вектора скорости, на втором этапе решается задача (5), (6) или (5), (9) и получаются картины распространения примеси в области решения.

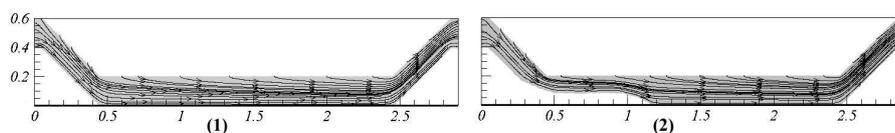
При валидации построенной модели проводились серии расчетов по общепринятой методике: расчеты в более простых областях решения и сравнение с аналитическими решениями, если таковые существовали; расчеты с измельчением шага сетки и изменением каждого из параметров модели в отдельности. Проводилась проверка соответствия полученного решения построенной модели. В данной работе приводятся лишь некоторые результаты численных расчетов, полученные с помощью построенной математической модели. При этом, не будем проводить подробный анализ влияния всех параметров модели на полученные картины течения и распространения примеси. В каждом из приведенных результатов расчетов рассматривается лишь одна примесь, характеризующаяся своим набором параметров. Характерной длиной выбирается длина области решения по  $x$ , а характерной скоростью – скорость входного потока. Все параметры безразмерны.

Вначале рассмотрим результаты, полученные для задачи об оседании примеси и слеживании осадка. Предполагается, что в начальный момент времени  $t = 0$  в области решения нет примесей, и через входную границу начинается подача загрязненной жидкости. Через верхнюю кровлю фильтруются «чистые» грунтовые воды, а на выходной границе проводится откачка жидкости.

Далее на рис. 3 - 5 будут представлены результаты при следующих значениях характеристик сетки и течения: размеры области решения  $H_2 = 0,2$ ,  $H_1 = L_2 = 0,4$ ,  $L_3 = 2$ ,  $L_1 = 0,05$ ; шаги пространственной сетки  $h_x = h_y = 0,01$ ; шаг по времени  $\tau = 0,01$ ; число Рейнольдса  $Re = 1000$ ; скорость входного потока  $u_0(t) = 0,0001$ ; концентрация примеси во входном потоке жидкости  $C_1 = 0,2$ ; начальные условия для компонентов вектора скорости  $u|_{t=0} = 0$ ,  $v|_{t=0} = 0$ .

Задача о течении вязкой однородной несжимаемой жидкости является эволюционной, потому приходится находить компоненты вектора скорости на каждом слое по времени. В области решения течение развивается при малых скоростях, и линии тока жидкости направлены вдоль канала, а вихревые структуры не образуются (см. рис. 3.1). Из-за слеживания осадка может измениться форма области решения, поэтому при каждом изменении границы течение жидкости пересчитывается (см. рис. 3.2).

На рис. 4 представлена динамика распространения и оседания примесей. Примесь распространяется вдоль линий тока, неравномерно по каналу  $t = 10$ . За счет диффузии происходит не только горизонтальное, но и вертикальное распространение. Под действием силы тяжести на всем протяжении канала вдоль нижней границы выпадает осадок. Однако большая концентрация примесей сосредотачивается преимущественно вдоль наклонных границ  $t = 20$ . Поток жидкости, подаваемый через верхнюю кровлю, дополнительно способствует

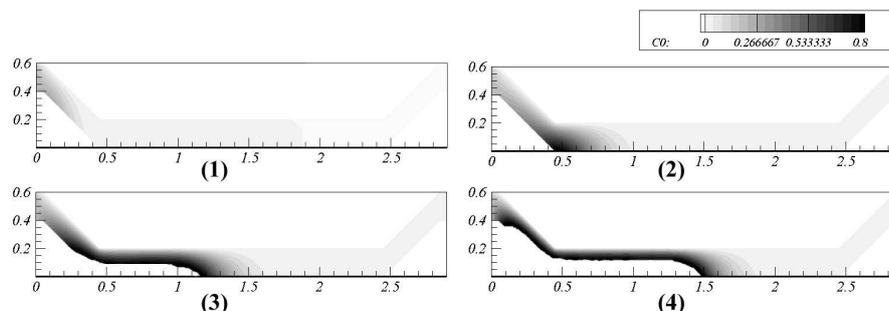


**Рис. 3.** Течение жидкости при скорости фильтрации грунтовых вод  $v_0 = -4u_0H_2/L_3$ .

(1) В первоначальной области решения при  $t = 0$ .

(2) В измененной области решения при  $t = 10$ .

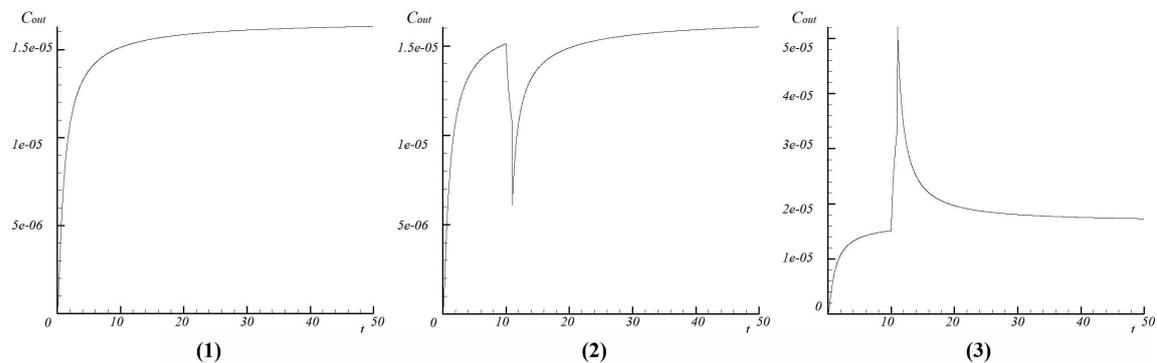
вертикальному осаждению примеси. Уже на момент безразмерного времени  $t = 20$  наблюдается частичное слеживание осадка вдоль нижней левой наклонной границы, к моменту же  $t = 50$  канал значительно сужается. Более подробное исследование влияния входных параметров задачи на результирующие картины течения и распространения взвешенных примесей приводится в [28].



**Рис. 4.** Течение и распространение оседающей примеси при значениях параметров: диффузия  $D = 0,001$ ; скорость оседания  $v_s = \tilde{v}_s = 0,001$ ; массообмен от дна  $C_D - C_{v_s} = 0,25$ ; пороговое значение концентрации  $C^* = 0,6$ ; пороговое значение времени слеживания осадка  $T^* = 1$  на моменты времени: (1)  $t = 0,1$ ; (2)  $t = 2$ ; (3)  $t = 5$ ; (4)  $t = 10$ .

Основной характеристикой, показывающей насколько «эффективно» происходит процесс осаждения и накопления примеси является объем примесей, выходящих из области решения с потоком откачиваемой жидкости  $C_{out} = \int_{\Gamma_4} uCdy$ . Когда поток поступающих в область грунтовых вод  $V_{in} = \int_{\Gamma_1} udy$  постоянен, количество выходящей примеси равномерно увеличивается до некоторого уровня (см. рис. 5.1.) Но в случае любых колебаний  $V_{in}$ , показатель  $C_{out}$  может существенно изменяться. При этом кратковременное уменьшение объема поступающей жидкости не приводит к опасным последствиям (см. рис. 5.2), количество «выброса» уменьшается соответствующим образом и с восстановлением прежнего объема потока равномерно увеличивается.

Самым опасным развитием процессов осаждения и накопления илов является возможность так называемого «залпового выброса». Т.е. резкого увеличения концентрации и количества примеси, выходящей из области решения. Такая картина может наблюдаться, если, например, произойдет даже кратковременное увеличение объема фильтруемых грунтовых вод (рис. 5.3). Как видно из рисунка, в интервале времени от  $t = 10$  до  $t = 11$  вместе с увеличением  $V_{in}$  в 4 раза происходит резкое увеличение количества примеси на выходе из области решения в 5 раз. До момента времени  $t = 10$  происходит равномерное увеличение величины  $C_{out}$ , а после  $t = 11$  ее показатели уменьшаются до значения, полученного для аналогичной задачи с постоянным объемом фильтрующихся грунтовых вод (см. рис. 5.1).



**Рис. 5.** График изменения количества примеси, выходящей из области решения.

(1) Поток грунтовых вод постоянен.

(2) Поток грунтовых вод уменьшается в 4 раза в интервале времени  $t \in (10, 11)$ .

(3) Модель «залпового выброса» поток грунтовых вод увеличивается в 4 раза в интервале времени  $t \in (10, 11)$ .

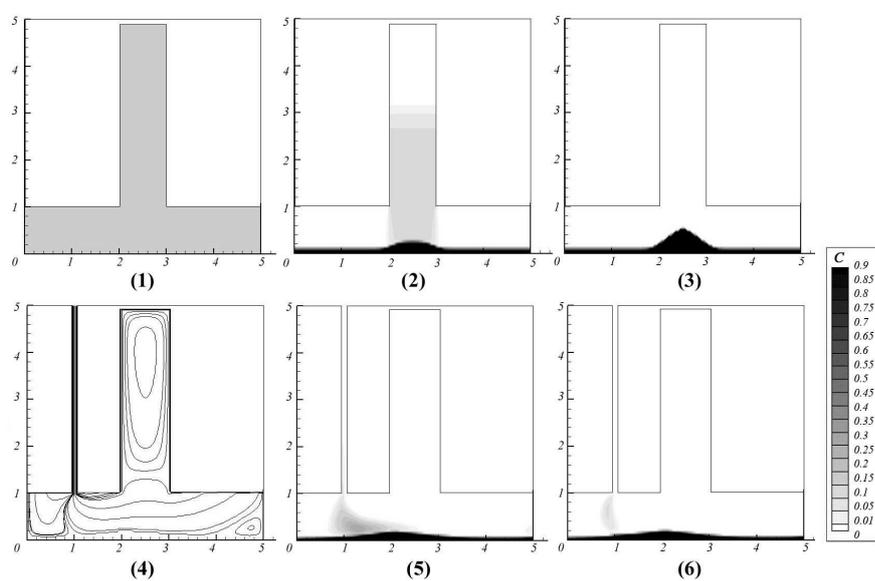
Далее рассмотрим результаты, полученные для задачи о естественном истечении жидкости из шахты (рис 6). Считаем, что в начальный момент времени в области нет течения, она полностью заполнена жидкостью, в которой равномерно распределена примесь с концентрацией  $C = 0,1$  (рис. 6.1.). Вся примесь осаждается и на дне выпадает осадок, который частично слеживается. В области под полостью образуется «горка» (см. рис. 6.2 - 6.3.). Далее добавляется отверстие для самоизлива и через верхнюю границу начинается фильтрация «чистой» жидкости. Линии тока направлены вдоль канала от верхней границы к выходному отверстию, всю полость вдоль верхней кровли занимает вихрь (см рис. 6.4.). У дна линии тока обтекают слой слежавшегося осадка, а весь несслежавшийся верхний слой осевшей примеси размывается течением и вытекает через границу  $\Gamma_1$  (см. рис. 6.3.). К моменту времени  $t = 5$  «горка» примеси значительно сглаживается, внутри области решения остается лишь слежавшийся осадок (см. рис. 6.5. - 6.6.).

## Заключение

В работе предложена общая математическая модель течения и распространения, оседания взвешенных примесей, с возможностью изменения формы области решения из-за накопления осадка и модель самоизлива жидкости из шахты. На основе предложенных моделей можно проводить анализ и изучение процесса очистки промышленных стоков в затопленных горных выработках и исследовать процесс самоизлива жидкости из шахты.

Первая модель позволяет прогнозировать, будет ли перекрыт канал тока жидкости и возможен ли «залповый выброс». Для его предотвращения необходимо контролировать качество очистки и обеспечивать автоматическое переключение подачи откачиваемой жидкости на другие очистные сооружения в случае необходимости.

Вторая модель позволяет исследовать влияние расположения скважины, ее размеров и глубины бурения на размыв накопленных внутри выработки примесей и выход их на поверхность при самоизливе жидкости из шахты.



**Рис. 6.** Распространение неслежавшейся примесей при самоизливе идеальной стратифицированной жидкости со значениями параметров: диффузии  $D = 0,001$ ; скорости оседания  $v_s = 0,1$ ;  $h_x = h_y = 0,05$ ; ширина трубы равна  $0,1$ ; шаг сетки в трубе  $h_{x_1} = 0,001$ ; скорость фильтрации через верхнюю границу равна  $0,2$ ; коэффициент стратификации равен  $1$ . Где на (1) течение, (2) - (5) динамика размыва примеси на моменты времени (2)  $t = 0$ ; (3)  $t = 10$ ; (4)  $t = 20$ ; (5)  $t = 100$ .

## Список литературы

1. Лесин Ю.В., Скрынник Л.С. Охрана и рациональное использование водных ресурсов при разработке угольных месторождений Кузбасса. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2008. – 178 с.
2. Бутовецкий В.С. Охрана природы при обогащении углей: справочное пособие. – М.: Недра, 1991. – 231 с.
3. Ельчанинов Е.А., Беляев Е.В., Весков М.И. и др. Охрана окружающей среды при подземной разработке угольных месторождений – М.: Наука, 1995. – 240 с.
4. Чебакова И.Б. Очистка сточных вод: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. – 84 с.
5. Коростовенко В.В., Гронь В.А., Шахран С.Г., Капличенко Н.М., Галайко А.В. Применение электроимпульсного метода очистки сточных вод угольных месторождений// Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 10-1. – С. 164-169.
6. Демкин В.И., Навитный А.М., Гусев Н.Н., Свитцов А.А., Каплунов Ю.В. Комплексная переработка шахтных вод с использованием мембранно-сорбционных методов// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9 – С. 311-315.
7. Клейн М.С., Вахонина Т.Е. Повышение технологической и экологической эффективности очистки шламовых вод углеобогащения// Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 3 (103). – С. 125-127.
8. Красавин А. П. У истоков отраслевой экологии. – Пермь. Изд-во «Золотой город», 2001. – 268 с.
9. Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A.A., Ibraheem I.B.M. Microalgae and wastewater treatment (2012) Saudi Journal of Biological Sciences, No. 19, pp. 257-275.
10. Qu X., Alvarez P.J.J., Li Q. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment (2013) Water research No. 47 (12), pp. 3931-3946.
11. Белолипецкий В.М., Шокин Ю. И. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды. – Новосибирск: Инфолио-пресс, 1997. – 240 с.
12. Боровков В.С. Руслые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 266 с.
13. Белолипецкий В. М., Генова С. Н. Вычислительный алгоритм для определения динамики взвешенных и донных наносов в речном русле// Вычислительные технологии – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 9–25.
14. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 211 с.
15. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. – Л. Гидрометеоздат, 1984. – 280 с.
16. Захаров Ю.Н., Чирюкина А.В. Итерационный метод определения течения стратифицированной жидкости в проточном водоеме// Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы V всероссийской научной конференции. – 2006. – С. 511–512.
17. Захаров Ю.Н., Чирюкина А.В. Течение жидкости в подземных полостях с учетом фильтрации через стенки// Инновационные недра Кузбасса. IT-технологии: сборник научных трудов. – 2007. – С. 305–309.
18. Захаров Ю.Н., Счастливцев Е.Л., Чирюкина А.В. Течение идеальной жидкости в закрытых водоемах// Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, спец. вып. 2.– С. 21–27.
19. Захаров Ю.Н., Потапов В.П., Счастливцев Е.Л., Чирюкина А.В. Моделирование распространения загрязняющих веществ в затопленных горных выработках// Вестник НГУ. – 2009. – Т. 7, вып. 4. – С. 66–72. – (Серия «Информационные технологии»).
20. Захаров Ю.Н., Потапов В.П., Счастливцев Е.Л., Чирюкина А.В. Моделирование распространения примесей в затопленных горных выработках: монография// Кемеровский государственный университет. – Кемерово, 2013. – 96 с.
21. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 670 с.
22. Роч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
23. Бондарева Л.В., Гурских М. А., Захаров Ю.Н. Об одной модели распространения всплывающей примеси в затопленных горных выработках// Вестник Кемеровского государственного университета. – 2014. – № 4(60). – С. 54-61.
24. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
25. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 197 с.
26. Захаров Ю.Н. Градиентные итерационные методы решения задач гидродинамики. – Новосибирск: Наука, 2004. – 239 с.
27. Захаров Ю.Н., Иванов К.С. О нестационарных решениях в задачах гидродинамики со стационарными краевыми условиями// Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 24-33.
28. Бондарева Л.В., Захаров Ю.Н. Моделирование процесса очистки промышленных стоков с помощью затопленных горных выработок// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 22-127.