

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

1. Аннотация

В работе рассматривается математическая модель движения многокомпонентной вязкой несжимаемой среды, у которой вязкость и плотность зависят от концентрации компонент. Модель описывается трёхкомпонентной системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса с переменной вязкостью и плотностью, где три компонента среды представляют собой воздух, воду и связный грунт соответственно. Решение получено при помощи конечно-разностного численного алгоритма, основанного на схеме расщепления по физическим факторам и методе предиктор–корректор. Проведены численные расчеты по определению картины течения в пруду-отстойнике, а также картины воздействия поверхностных волн на полупогруженное препятствие и связный грунт на дне.

2. Тема работы

Перенос связного грунта под действием внутреннего течения и поверхностных волн.

3. Состав коллектива

- Захаров Юрий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, руководитель
- Зимин Антон Игоревич, к.ф.-м.н., доцент кафедры цифровых технологий, Кемеровский государственный университет, исполнитель

4. Научное содержание работы:

4.1. Постановка задачи

Загрязненные сточные воды угольных предприятий требуют очистки даже для использования в качестве технических вод и для утилизации их в природных водоемах. Одним из распространенных способов очистки является отстаивание вод в специальных прудах-отстойниках, в которые постоянно закачиваются загрязненные воды и выкачиваются уже очищенные для поддержания уровня воды в пруду. В работе рассмотрены различные конфигурации системы закачивания воды в отстойник с целью исследования характера течения и его влияния на результат очистки. Также рассматривается задача о распространении в области бассейна одиночной волны и её взаимодействие с полупогруженным препятствием или «береговым причалом» и связным грунтом на дне.

В работе используется модель трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости с переменными вязкостью и плотностью. Вода, воздух и жидкий оползень рассматриваются как компоненты неоднородной среды. Преимуществом такого подхода является универсальность, позволяющая моделировать взаимодействие жидкости с различными препятствиями и грунтами без выделения особенностей в решение.

4.2. Современное состояние проблемы

Загрязненные сточные воды угольных предприятий неизбежно появляются в процессе производства. Есть много видов загрязняющих веществ, среди которых можно выделить растворенные химические соединения и твердые частицы. Для очистки сточных вод от твердых взвешенных глинистых частиц сегодня используется несколько технологий, выделяют химические [1, 2] и биологические методы (химические вещества и живые организмы, водоросли, рыбы и другие) [3], фильтрацию через специально создаваемые фильтры [4], а также пруды-отстойники. Пруды-отстойники являются хорошо показавшим себя методом для очистки сточных вод от крупных частиц, но за счет физических свойств мелкодисперсных глиняных частиц, взвешенных в воде, оседание их происходит медленно, и даже спустя продолжительное время (1-2 года) концентрация частиц в воде может составлять до 40% от начальной. Это создает постоянную потребность в сооружении прудов-отстойников, а оптимизация их использования значительно снизила бы потребность в строительстве и упростила обслуживание очистных сооружений [5].

Одним из методов оптимизации работы отстойников для очистки от нерастворимых органических примесей может являться изменение расположения входных труб, по которым закачиваются загрязненные сточные воды. Зарекомендовали себя методы организации входного потока в виде разветвленной структуры труб и труб со щелевидным протяженным отверстием на всю глубину погружения входной трубы [6].

В данной работе для моделирования движения волн, жидкости и связанного грунта применяется модель трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости [7, 8].

1. D. Das, S.K. Das, P.K. Parhi, A.K. Dand, S/ Mishra, P. K. Misra, Green strategies in formulating, stabilizing and pipeline transportation of coal water slurry in the framework of WATER-ENERGY NEXUS: A state of the art review / Energy Nexus, Vol. 4, 30 December 2021, 100025
2. T.L. Provin and J.L Pitt. Water Management: Clearing Cloudy and Muddy Water in Ponds and Lakes. Texas A&M Agrilife Extension article, SCS-2013-02
3. Z. Ruhua, Y. Niansheng, W. Yuqing, X. Dongliang and S. Jiahao, "Automatic control of sewage treatment process using biological reaction (iSPEC 2021)," 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Nanjing, China, 2021, pp. 737-742, doi: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735824.
4. Макридин Е.В., Тюленев М.А., Марков С.О. Экспериментальные исследования фильтрования карьерных сточных вод в крупнокусковых массивах из разрушенных горных пород в условиях разреза «Камышанский» // Техника и технология горного дела. – 2020. – № 2 (9). – С. 4-25.
5. Зиборов А. П., Бордий А. П., Денисенко А. И., Франчук В. П., Шломин А. Н. Разработка рациональной и экологически безопасной технологии очистки шламовых отстойников угольных шахт // ГИАБ. 1996. №1.
6. Пат. RU 107962 U1 Российская Федерация, МПК В01D 21/24 Горизонтальный отстойник / Голованчиков А.Б., Милова Д.А., Балашов В.А., Кузнецов Н.А., Чурикова В.И. ; заявитель и патентообладатель – ВолгГТУ – № 2011109533/05 ; заявл. 14.03.2011; опубл. 2011.09.10.
7. Zakharov, Y. N. Numerical simulation of surface waves arising from underwater landslide movement / Y. N. Zakharov, A. I. Zimin // Conference Proceedings «Mathematical and Information Technologies MIT-2016». – 2017. – P. 535–546.
8. Zakharov, Y. N. Mathematical modeling of a hydraulic flume for carrying out numerical experiments on coastal waves and erosion of cohesive soil / Y. N. Zakharov, A. I. Zimin, I. S. Nudner, M. E. Yashin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1441 – No. 1 – P. 012182.

4.3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Рассматривается движение многокомпонентной вязкой несжимаемой среды, у которой вязкость и плотность зависят от концентрации компонент, соответствующих воздуху, воде и

намокшему связному грунту. Каждая из таких компонент представляется вязкой несжимаемой жидкостью с собственными значениями вязкости и плотности, предполагается возможность диффузии массы между этими компонентами. Движение такой многокомпонентной среды описывается нестационарной системой уравнений Навье-Стокса, учитывающей перечисленные выше эффекты, а перенос компонент среды – уравнениями конвективной диффузии и соотношениями для определения плотности и вязкости:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\rho \bar{V})}{dt} = -\nabla p + \text{div}(\mu \mathbf{D}) + \rho \bar{f}, \\ \text{div} \bar{V} = 0, \\ \frac{dC_1}{dt} = D_{12} \Delta C_1, \\ \frac{dC_3}{dt} = D_{23} \Delta C_3, \\ C_2 = 1 - C_1 - C_3, \\ \mu = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{\mu_2 \mu_3 C_1 + \mu_1 \mu_3 C_2 + \mu_1 \mu_2 C_3}, \\ \rho = \rho_1 C_1 + \rho_2 C_2 + \rho_3 C_3, \end{array} \right.$$

где $\bar{V}(\bar{x}, t) = (v_1, v_2, v_3)$ – вектор скорости смеси в точке $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$ и момент времени t , $\mu(\bar{x}, t)$ – динамическая вязкость, $\rho(\bar{x}, t)$ – плотность, $C_1(\bar{x}, t)$, $C_2(\bar{x}, t)$, $C_3(\bar{x}, t)$ – объемные концентрации компонент с постоянными плотностями ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 и вязкостями μ_1 , μ_2 , μ_3 , $\bar{f} = (f_1, f_2, f_3)$ – вектор массовых сил, p – давление, \mathbf{D} – тензор скоростей деформаций, компоненты которого равны $\tau_{ij} = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$, $D_{12} = \text{const}$ – коэффициент диффузии между первой и второй компонентой, $D_{23} = \text{const}$ – коэффициент диффузии между второй и третьей компонентой.

Для численной реализации модели используется метод конечных разностей на прямоугольной неравномерной сетке с шахматным расположением узлов. При этом система уравнений Навье-Стокса аппроксимируется схемой расщепления по физическим факторам с учетом переменной плотности, а для решения уравнений конвективной диффузии применяется схема предиктор-корректор.

4.4. Полученные результаты

Рассматриваемые водоемы имеют глубину 50м и протяженность 1400м, что за счет диспропорции размеров создает определенные сложности при визуализации полученных картин течения. Однако же в средней части водоема вихревые и линейные компоненты картины течения не меняются и остаются параллельными, картина течения имеет различия в начальной и конечных частях водоема, и именно они показаны на рисунках 1-3.

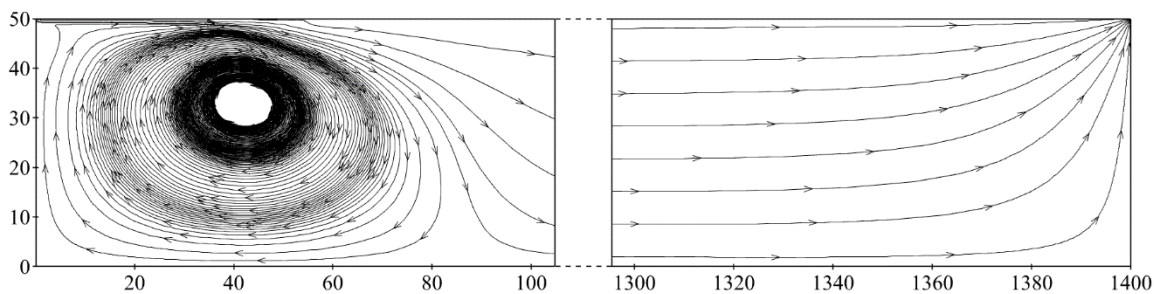


Рисунок 1 – Картина течения в отстойнике при расположении входной трубы в верхней части водоема.

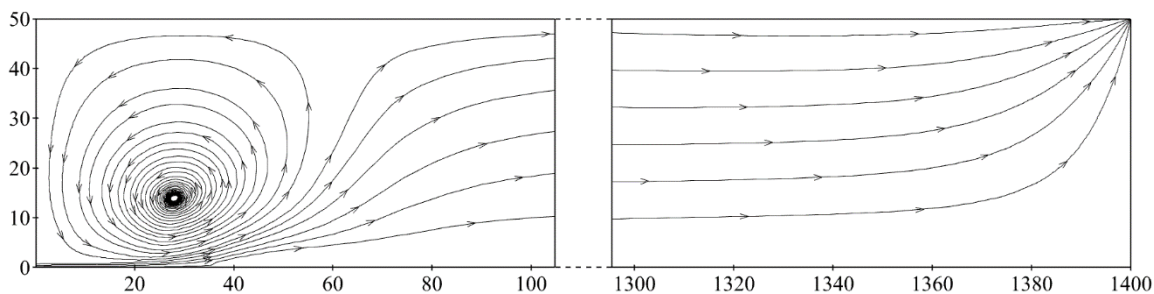


Рисунок 2 – Картина течения в отстойнике при расположении входной трубы в придонной области.

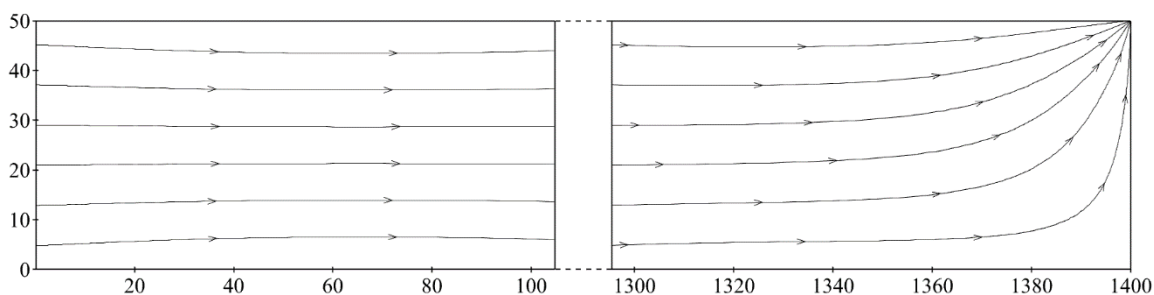


Рисунок 3 – Картина течения в отстойнике в случае использования трубы со щелевым отверстием на всей протяженности погруженного участка.

Из анализа картин течения можно заметить, что форма вихрей возле входной части водоема различается, однако же на отметке не более 60-80м от входных труб характер течения стабилизируется, и далее по длине водоема профиль и ламинарной, и вихревой частей картин течения совпадает. Наложение расчета динамики концентрации взвешенных частиц на картину течения, показывает, что различие течений на такой малой части протяженности водоема не оказывает существенного влияния на механизм очистки сточных вод от взвешенных частиц.

Далее рассматривается задача о распространении в области гидроволнового лотка одиночной волны и её взаимодействие с полупогруженным препятствием или «береговым причалом» и связным грунтом. Динамические вязкости и плотности компонент имели следующие значения: для воз-

$$\text{духа} \quad \mu_1 = 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}, \quad \rho_1 = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \text{для} \quad \text{воды} \quad \mu_2 = 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}, \quad \rho_2 = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \text{для} \quad \text{грунта}$$

$\mu_3 = 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$, $\rho_3 = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Граница раздела компонент проходит при значении концентрации $C = 0.5$.

Длина области составляет 20 м, высота 3 м. Глубина жидкости 1 м. Препятствие представляет собой прямоугольник размером 5 м на 0.6 м. Препятствие располагается на 10 м от левого края, заглублено в жидкость на 0.3 м. Столб жидкости, образующий волну, имеет размер 4 м на 0.25 м. На рисунке 4 представлен результат одного из расчетов для варианта области с полупогруженным закреплённым препятствием и слоем связного грунта на дне.

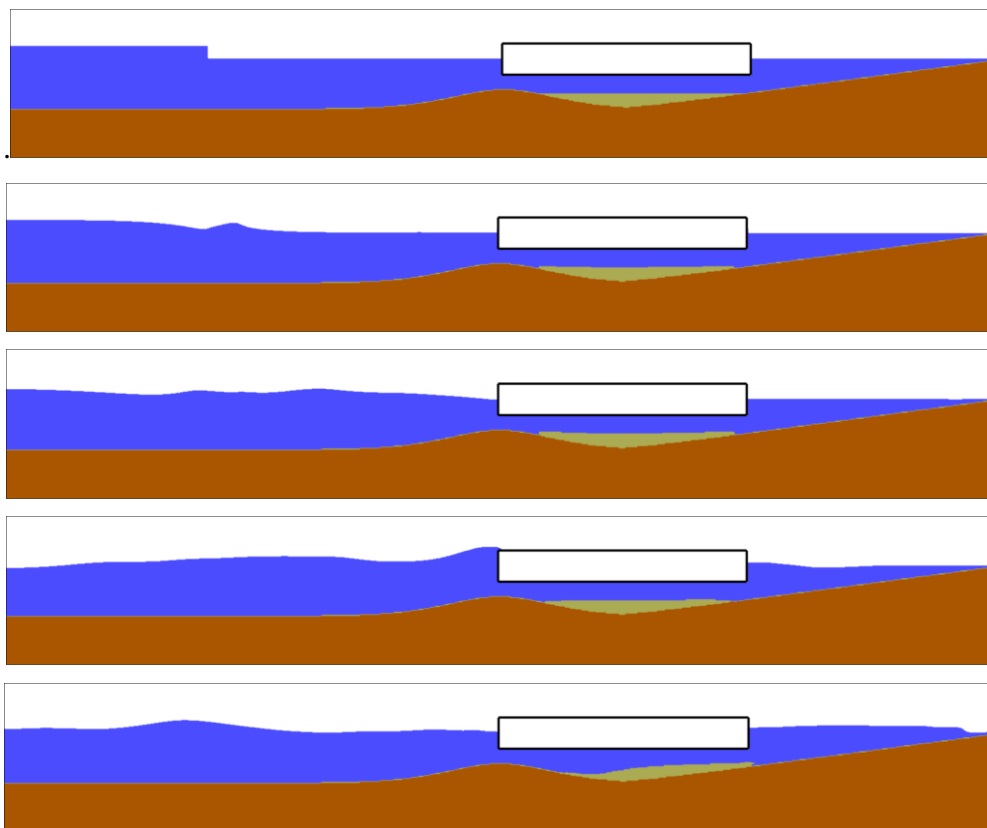


Рисунок 4 – Движение волны в области с прямоугольным закреплённым препятствием с «горкой» на дне, подъемом к правому берегу и связным грунтом на дне на моменты времени (в секундах): 1) 0, 2) 0.5, 3) 1.25, 4) 2.5, 5) 5

Также происходил расчет силы воздействия жидкости на дно препятствия через интеграл от давления за вычетом силы воздействия покоящейся жидкости:

$$F(t) = \int_{x_l}^{x_r} P(t, x, y_b) dx - \int_{x_l}^{x_r} P(0, x, y_b) dx.$$

На рисунке 2 приведен график воздействия силы на дно препятствия.

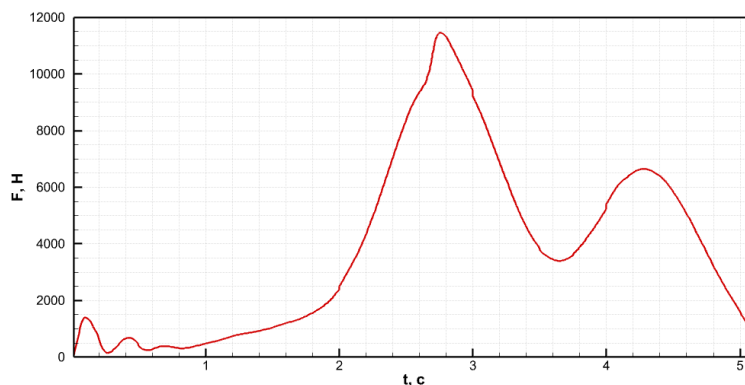


Рисунок 5 – График воздействия силы жидкости на дно препятствия.

Проведенные расчёты показывают, что связный грунт при незначительной вязкости и плотности (в полтора раза от плотности воды и на один порядок больше вязкости воды) слабо влияет на величину силы воздействия на полупогруженное закреплённое препятствие, несмотря на большую толщину донного грунта

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Численное решение представленных задач требует построения достаточно подробной сетки, в связи с наличием свободной поверхности и неоднородности среды. На практике это приводит к значительным затратам оперативной памяти и увеличению времени счета. В таких условиях использование вычислительного кластера является обязательным и позволяет проводить все необходимые расчеты за разумное время.

6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

- Вылегжанина, А. В. Сравнение картины течения в прудах-отстойниках разной геометрии / А. В. Вылегжанина, А. И. Зимин // Уголь. – 2023. – № 12(1174). – С. 80-84. – DOI 10.18796/0041-5790-2023-12-80-84. – EDN CVUDVG.