

# ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

## 1. Аннотация

Рассматривается движение многокомпонентной вязкой несжимаемой среды, у которой вязкость и плотность зависят от концентрации компонент, соответствующих воздуху, воде и намокшему связному грунту. Построена модель гидроволнового лотка и вакуумного волнопродуктора, проведена валидация на лабораторных данных. Представлены численные расчеты задач переноса донного связного грунта под действием поверхностных волн и возникновения поверхностной волны в результате движения грунта по наклонному дну.

## 2. Тема работы

Численное моделирование взаимодействия поверхностных волн и донного связного грунта

## 3. Состав коллектива

- Захаров Юрий Николаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям, Кемеровский государственный университет, руководитель
- Зимин Антон Игоревич, научный сотрудник, ассистент кафедры ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям, Кемеровский государственный университет, исполнитель

## 4. Научное содержание работы:

### 4.1. Постановка задачи

Целью работы является моделирование взаимодействия поверхностных волн и донного связного грунта. Рассматриваются задачи распространения поверхностных волн, возникновения волны вследствие движения грунта по наклонному дну и размыв донного грунта вблизи препятствия под действием поверхностных волнений. Для этого используется модель трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости с переменными вязкостью и плотностью. Вода, воздух и размокшая часть донного грунта 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

Задачи о взаимодействии донного грунта и поверхностных волн могут возникать в прикладной гидродинамике: водная экология, океанология, гидрология. В частности, одной из важных является задача о движении подводного оползня по склону, которое приводит к появлению длинных морских или океанических поверхностных волн. При подходе к берегу они значительно увеличивают свою высоту, что представляет опасность для береговых сооружений [4, 7].

В настоящее время существует несколько подходов для моделирования возникновения волны в результате движения оползня. В лабораторных исследованиях перемещение подводного грунта можно имитировать либо движением полностью погружённого в воду твёрдого тела [6], либо сползанием в бассейн некоторого гранулированного грунта [8]. При численном моделировании часто опираются на нелинейную теорию мелкой воды [2, 5, 11]. Другой подход заключается в использование неоднородных моделей, основанных на полных уравнениях Навье-Стокса и уравнениях переноса концентрации [3, 10].

Еще одним важным классом являются задачи о воздействии поверхностных волн на размыв и перенос донного грунта [1]. Волны накатываются на прибрежное морское сооружение, отражаются, заплескиваются и обрушаются, тем самым создавая переменные пристеночные течения, уносящие и размывающие грунт около основания. В случае, когда грунт является связным, возрастает относительная сложность его описания и моделирования в силу происходящих в нем различных физико-химических процессов.

1. Альхименко, А. И. Безопасность морских гидротехнических сооружений / А. И. Альхименко, Н. Д. Беляев, Ю. Н. Фомин – Санкт-Петербург: Лань, 2003. – 288 с.
2. Бейзель, С. А. Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону / С. А. Бейзель, Г. С. Хакимзянов, Л. Б. Чубаров // Вычислительные технологии. – 2010. – Т. 15 – № 3 – С. 39–51.
3. Козелков, А. С. Моделирование волн цунами космогенного и оползневоего происхождения на основе уравнений Навье-Стокса: дис. ... д. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Козелков Андрей Сергеевич. – Нижний Новгород-Саров, 2016. – 401 с.
4. Пелиновский, Е. Н. Гидродинамика волн цунами / Е. Н. Пелиновский – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
5. Петрухин, Н. С. Римановы волны в динамике оползней над плоским откосом / Н. С. Петрухин, Е. Н. Пелиновский // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6 – С. 137.
6. Enet, F. Experimental study of tsunami generation by three-dimensional rigid underwater landslides / F. Enet, S. T. Grilli // Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering. – 2007. – Vol. 133 – No. 6 – P. 442–454.
7. Khakimzyanov, G. S. Simulation of tsunami waves generated by submarine landslides in the Black Sea / G. S. Khakimzyanov, O. I. Gusev, S. A. Beisel, L. B. Chubarov, N. Y. Shokina // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2015. – Vol. 30 – No. 4 – P. 227–237.
8. Mohammed, F. Experiments on tsunamis generated by 3D granular landslides / F. Mohammed, H. M. Fritz // Submarine mass movements and their consequences. – Springer Netherlands, 2010. – P. 705–718.
9. Rzadkiewicz, S. A. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects / S. A. Rzadkiewicz, C. Mariotti, P. Heinrich // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. – 1997. – Vol. 123 – No. 4 – P. 149–157.
10. Smith, R. C. Comparing approaches for numerical modelling of tsunami generation by deformable submarine slides / R. C. Smith, J. Hill, G. S. Collins, M. D. Piggott, S. C. Kramer, S. D. Parkinson, C. Wilson // Ocean Modelling. – 2016. – Vol. 100 – P. 125–140.
11. Watts, P. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model / P. Watts, S. T. Grilli, J. T. Kirby, G. J. Fryer, D. R. Tappin // Natural Hazards And Earth System Science. – 2003. – Vol. 3 – No. 5 – P. 391–402.

### 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  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  и вязкостями  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$ ,  $\bar{f} = (f_1, f_2, f_3)$  – 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 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

В рамках работы рассматривалась задача образования и распространения одиночной волны в гидроволновом лотке «23 ГМПИ» филиала ОАО «31 ГПИСС». На основании двухкомпонентной версии неоднородной среды разработана модель гидроволнового лотка и вакуумного волнопродуктора. Вакуумный волнопродуктор представляет собой герметичный закрытый резервуар, сообщающийся с лотком. В лотке установлены волномеры, позволяющие получить характеристики волны в различные моменты времени. На рисунке 1 приведены профили волн, зарегистрированных четырьмя волномерами  $B1$ – $B4$  в волнопродукторе в сравнении с результатом численного расчета.

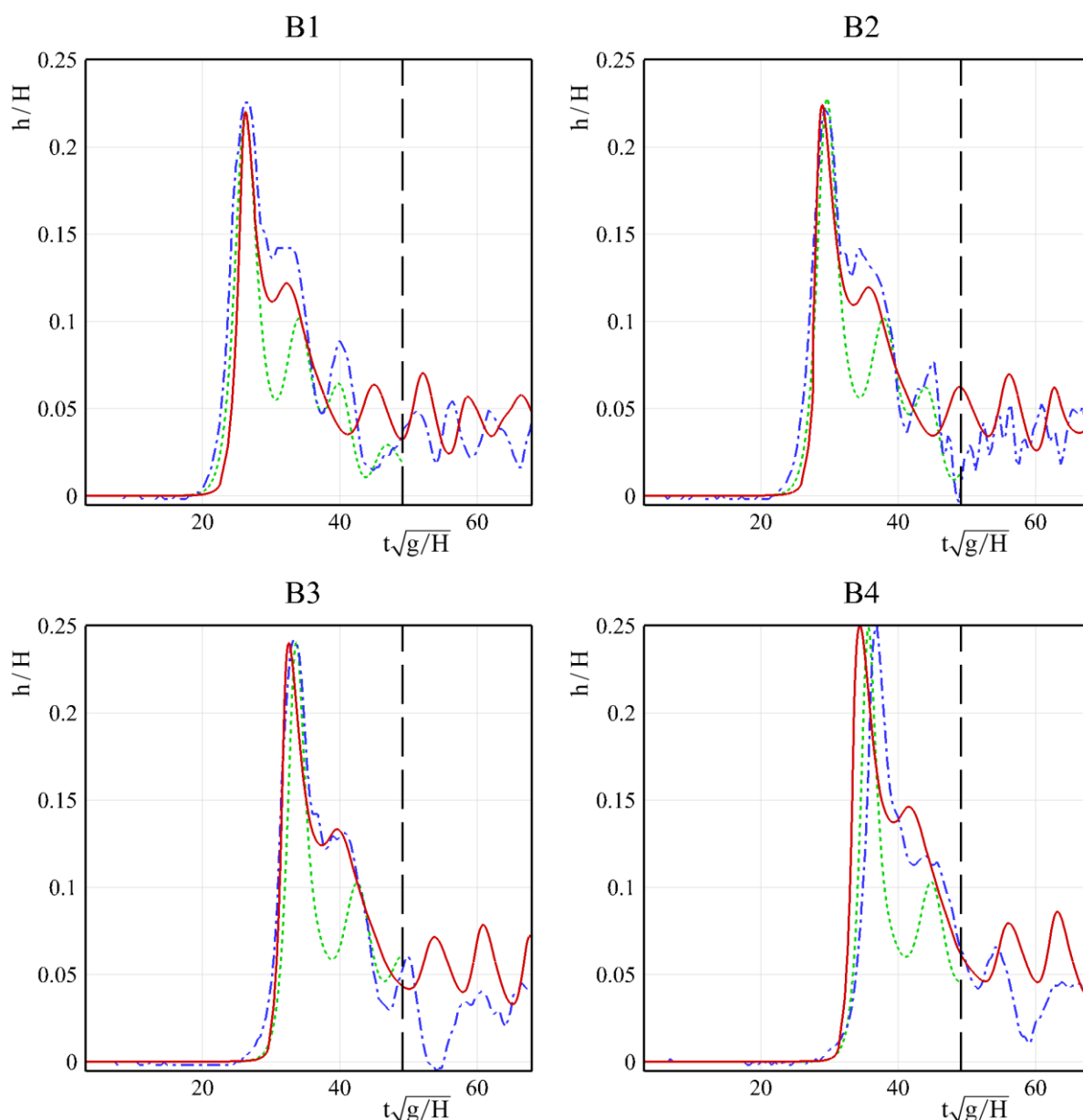


Рисунок 1 – Графики показаний четырех волномеров  $B1$ – $B4$  во времени. Синяя штрихпунктирная линия – экспериментальные профили волн, красная сплошная линия – результаты модели вязкой несжимаемой двухкомпонентной жидкости, зеленая точечная линия – результаты потенциальной модели.

Следует заметить, что проведение подобного лабораторного эксперимента является дорогостоящим и требует времени для подготовки. При этом он предназначен только для анализа процесса распространения одиночной волны. Однако возможности численной модели позволили расширить область применения на задачи распространения нерегулярных волн и их взаимодействия с донным связным грунтом.

На рисунке 2 представлены картины течения в гидроволновом лотке на различные моменты времени для случая, когда на дне области находится слой намокшего связного грунта (для наглядности область вытянута по вертикали).

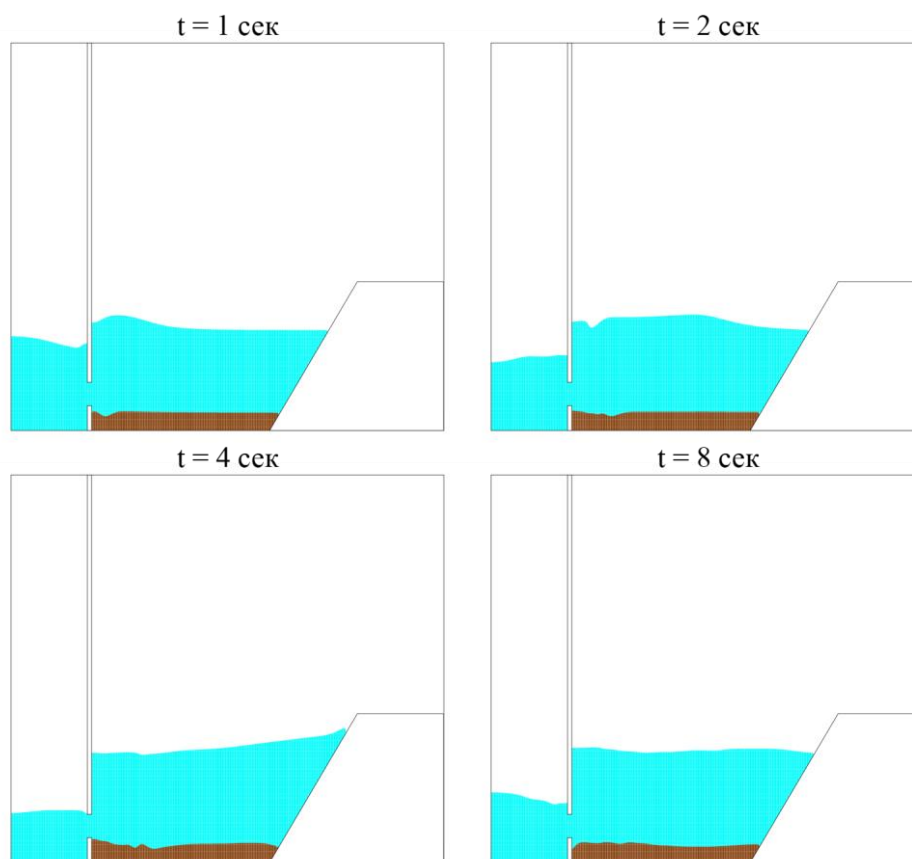


Рисунок 2 – Картина движения на моменты времени 1, 2, 4 и 8 секунд

Также были рассмотрены задачи по возникновению волны в результате движения грунта по наклонной плоскости и проведено сравнение с лабораторными данными и с результатами, полученными другими численными моделями. На рисунке 3 приведены картины волнообразования для случая, когда на наклонной границе трение отсутствует.

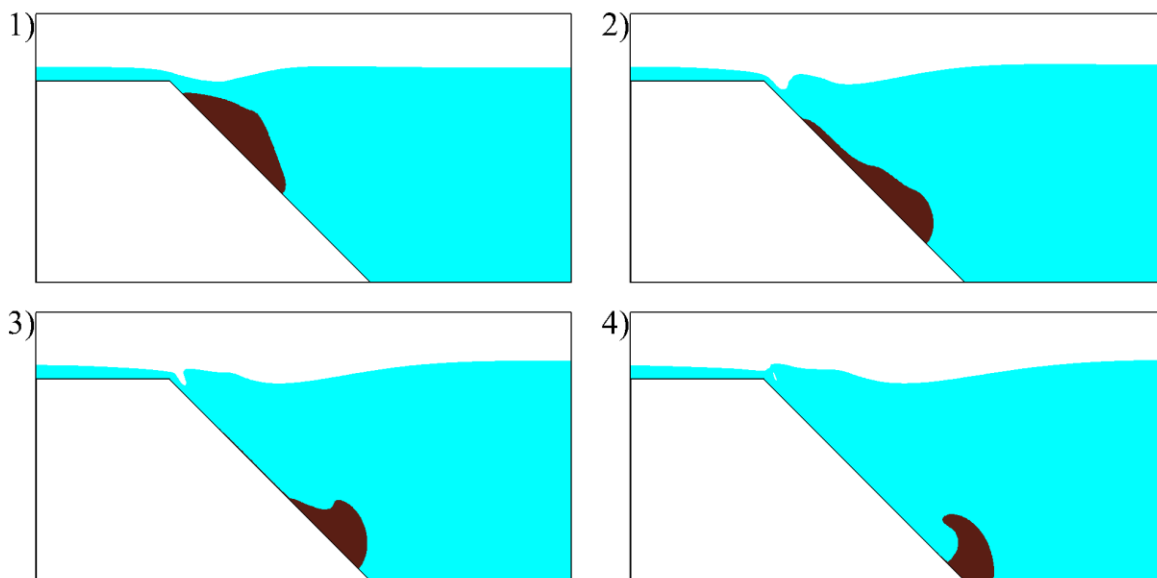


Рисунок 3 – Картины движения оползня по наклонной стенке без трения на моменты времени (в секундах): 1) 0.4, 2) 0.8, 3) 1.0, 4) 1.2

На рисунке 4 изображены графики свободной поверхности на различные моменты времени, полученные в наших расчетах по трехкомпонентной модели, результаты лабораторного эксперимента и численного расчета модели ММЗ.

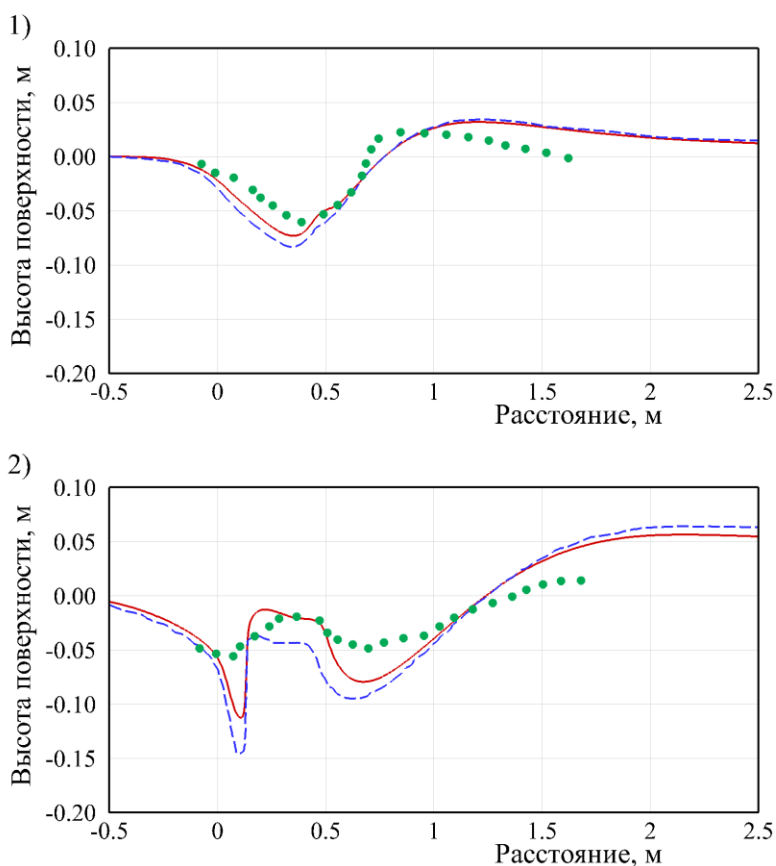


Рисунок 4 – Графики поверхностей на моменты времени (в секундах): 1) 0.4, 2) 0.8. Красная сплошная линия – представленная модель, синяя прерывистая линия – модель ММЗ, зеленые точки – данные эксперимента

## 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

- Захаров, Ю. Н. Численное моделирование работы лабораторного волнопродуктора одиночных волн на воде [Электронный ресурс] / Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, С. В. Стуколов, В. В. Лебедев, И. С. Нуднер, К. К. Семенов // Материалы третьей международной конференции «Полярная механика». – Владивосток, 2016. – С. 954–964. – Режим доступа: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/PolarMechanics.pdf>. (РИНЦ)
- Зимин, А. И. Численное моделирование образования волн в гидроволновом лотке с препятствием / А. И. Зимин // Труды XIV всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург, 2018. – С. 220–223. (РИНЦ)
- Semenov, K.K., Nudner, I.S., Lebedev, V.V., Zaharov, Yu.N., Zimin, A.I., Stukolov, S.V. Laboratory and numerical studies of tsunami waveform propagating over a plane bed // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. – 2017 – Vol.10. – P. 5 – 15. (Scopus)
- Zakharov, Y. Two-Component Incompressible Fluid Model for Simulating Surface Wave Propagation / Y. Zakharov, A. Zimin, V. Ragulin // *Mathematical Modeling of Technological Processes*. – Almaty, Kazakhstan: Springer International Publishing, 2015. – P. 201–210. (Scopus)
- 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. (Scopus)