

# ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

## 1. Аннотация

В работе представлена математическая модель физического гидроволнового лотка, позволяющая существенно расширить возможность исследования задач распространения поверхностных волн и их воздействие на донный связный грунт. Распространение волн на поверхности и перенос грунта в воде моделируются трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкостью, где воздух, вода и грунт рассматриваются как компоненты неоднородной среды. Решение получено при помощи конечно-разностного численного алгоритма, основанного на схеме расщепления по физическим факторам и методе предиктор–корректор. Представлены результаты численных расчетов.

## 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, старший преподаватель кафедры ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям, Кемеровский государственный университет, исполнитель
- Яшин Михаил Евгеньевич, аспирант, Кемеровский государственный университет, исполнитель

## 4. Научное содержание работы:

### 4.1. Постановка задачи

Целью работы является расширение возможностей использования математической модели гидроволнового лотка «23 ГМПИ» для решения таких задач, которые сложно или невозможно выполнить в лабораторных условиях. Например, к таким относятся задачи по набеганию одиночной волны на препятствие и ее воздействие на придонный связный грунт. В работе 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

В настоящее время является актуальной задача определения качественного и количественного поведения одиночной волны при набегании на берег или препятствие. Это связано

с возможными разрушительными действиями, которые длинная волна может оказать на прибрежные и береговые сооружения. Источниками появления таких волн могут служить землетрясения, извержения подводных вулканов, обвалы, оползни и другие [4]. Часто возникновение и распространение длинной волны цунами исследуются при помощи лабораторных экспериментов [2, 7, 8, 10]. Однако их проведение является дорогостоящим и требует достаточно большого времени для подготовки. Поэтому применяют математическое моделирование, которое позволяет относительно быстро получить результаты для различных задач, а также расширить возможности лабораторных экспериментов.

Для математического моделирования задач возникновения и распространения волн на свободной поверхности существует несколько основных подходов [9, 11]. Применительно к волнам типа цунами они представлены, например, в работах [1, 6, 12].

В «23 ГМПИ» филиала ОАО «31 ГПИСС» (г. Санкт-Петербург) для исследования поведения одиночной волны используется гидроволновой лоток. В работе [3] была предложена математическая модель гидроволнового лотка «23 ГМПИ» и проведена ее валидация на экспериментальных данных, в дальнейшем исследование модели было продолжено в работе [5]. В лабораторных условиях изменение геометрии области гидроволнового лотка может потребовать значительных временных и финансовых затрат, а добавление слоя связного грунта на дно вообще представляется технически невозможным в силу конструктивных особенностей. Поэтому для подобных задач актуально расширение возможностей использования математической модели.

1. Бошенятов, Б. В. Численное моделирование волн типа цунами в гидродинамическом лотке / Б. В. Бошенятов, Д. Г. Лисин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 6(26) – С. 45–55.
2. Бошенятов, Б. В. Особенности моделирования волн цунами в лабораторной установке / Б. В. Бошенятов // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – Алуста: Изд-во МАИ, 2015. – С. 384–385.
3. 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>.
4. Пелиновский, Е. Н. Гидродинамика волн цунами / Е. Н. Пелиновский – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
5. Семенов, К. К. Лабораторные и численные исследования профиля волн цунами, распространяющихся по ровному дну / К. К. Семенов, И. С. Нуднер, В. В. Лебедев, Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, С. В. Стуколов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2017. – № 4 – С. 5–15.
6. Шокин, Ю. И. Об использовании методов численного моделирования для решения прикладных задач проблемы цунами / Ю. И. Шокин, С. А. Бейзель, З. И. Федотова, Л. Б. Чубаров // Труды Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». – Павлодар: ТОО НПФ «ЭКО», 2006. – С. 36–51.
7. Ataie-Ashtiani, B. Impulsive waves caused by subaerial landslides / B. Ataie-Ashtiani, A. Nik-Khah // Environmental Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 8 – No. 3 – P. 263–280.
8. Heller, V. Composite modelling of subaerial landslide–tsunamis in different water body geometries and novel insight into slide and wave kinematics / V. Heller, M. Bruggemann, J. Spinneken, B. D. Rogers // Coastal Engineering. – 2016. – Vol. 109 – P. 20–41.
9. Katopodes, N. D. Free-Surface Flow: Computational Methods / N. D. Katopodes – Butterworth-Heinemann, 2018. – 914 с.
10. Miller, G. S. Tsunamis generated by long and thin granular landslides in a large flume / G. S. Miller, W. Andy Take, R. P. Mulligan, S. McDougall // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2017. – Vol. 122 – No. 1 – P. 653–668.
11. Mirjalili, S. Interface-capturing methods for two-phase flows: An overview and recent developments / S. Mirjalili, S. S. Jain, M. Dodd // Center for Turbulence Research Annual Research Briefs. – 2017. – P. 117–135.
12. Yavari-Ramshe, S. Numerical simulation of subaerial and submarine landslide generated tsunami waves — recent advances and future challenges / S. Yavari-Ramshe, B. Ataie-Ashtiani // Landslides. – 2016. – Vol. 13 – No. 6 – P. 1325–1368.

### 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:

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

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 гидроволновом лотке «23 ГМПИ» волна образуется в результате сброса воды из волнопродуктора. На рисунке 1 представлены картины движения волны в области, которая обычно используется при проведении лабораторных экспериментов. Под буквами изображены моменты времени, соответствующие: а) начальному положению жидкости, б) образованию волны, с) движению волны по наклонному дну, д) обрушению волны на берег.



Рисунок 1 – Движение волны на моменты времени (в секундах): а) 0, б) 1.2, с) 2.9, д) 3.7

Форма и уровень дна прибрежной зоны может оказывать решающее влияние на характер распространения и обрушения длинной волны. Для того чтобы проверить степень такого влияния были проведены расчеты, в которых крутизна ступеньки увеличена в два раза. На рисунке 2 под буквами изображены поверхности жидкости на моменты времени, соответствующие: а) образованию волны при движении по наклонному дну, б) обрушению волны на берег.

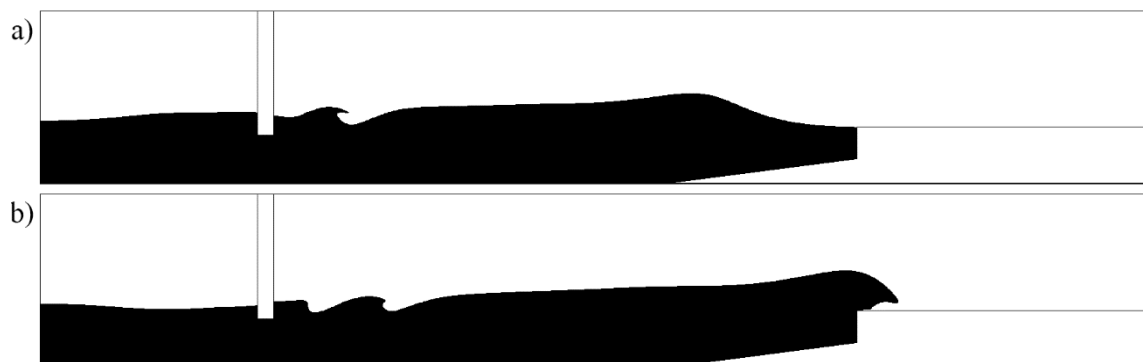


Рисунок 2 – Движение волны на моменты времени (в секундах): а) 2.9, б) 3.7

Так как волны цунами представляют одно из самых непредсказуемых и разрушительных бедствий, то задача защиты береговых сооружений является актуальной. Одним из

распространенных способов защиты является установка прибрежных барьеров, которые отражают длинные волны определенной высоты. В следующем расчете перед ступенькой поставлено прямоугольное препятствие. На рисунке 3 под буквами изображены форма волны на моменты времени, соответствующие: а) движению волны по наклонному дну, б) обрушению волны на берег.

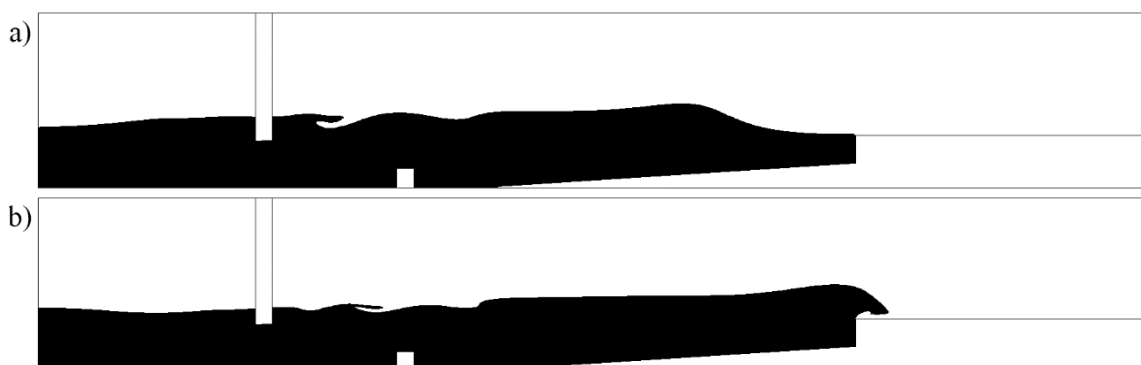


Рисунок 3 – Движение волны в области с препятствием на моменты времени (в секундах): 1) 2.9, 2) 3.7

Представленная в работе математическая модель позволяет включить в задачу распространения длинной поверхностной волны и взаимодействие с донным связным грунтом. На рисунке 4 под буквами изображены форма волны, и расположение связного грунта на моменты времени, соответствующие: а) начальному положению жидкости и грунта, б) образованию волны, влекущей за собой грунт, с) набеганию волны по косому дну, d) обрушению волны на берег.

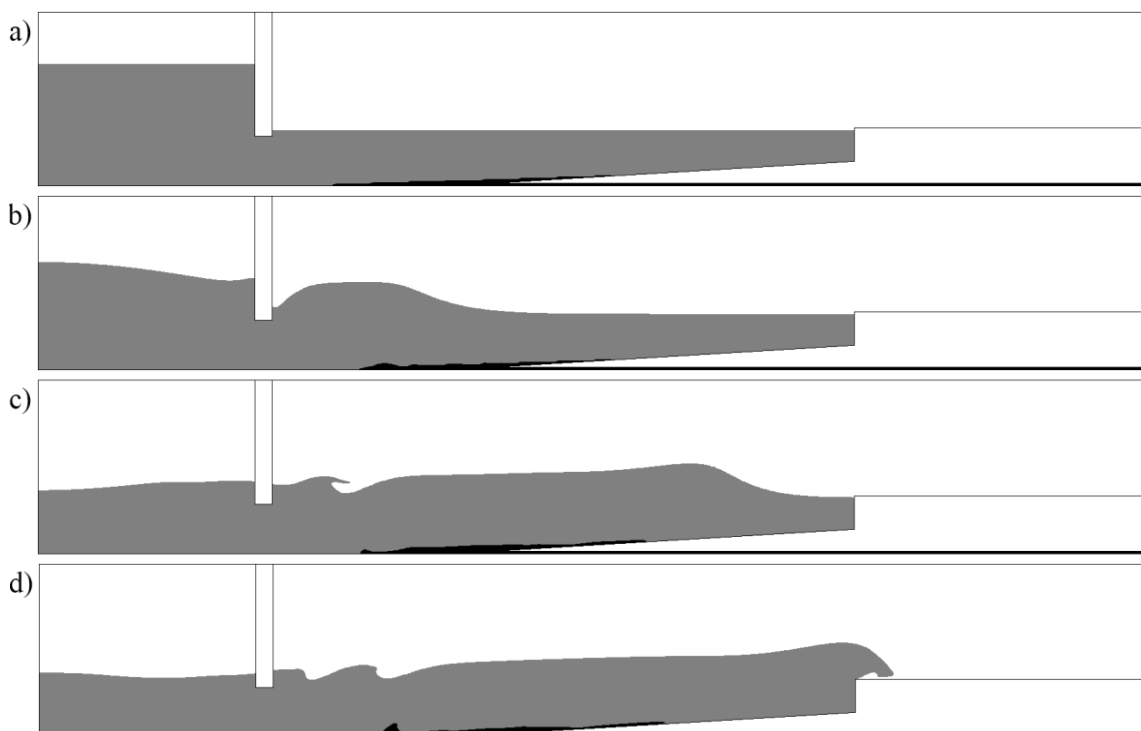


Рисунок 4 – Движение волны в области с донным связным грунтом на моменты времени (в секундах): а) 0, б) 1.2, с) 2.9, d) 3.7

Проведенные расчёты показывают: во-первых, что величина заплеска волны на прямоугольный берег зависит от угла наклона и формы прилегающей к нему дна, во-вторых,

помимо того, что связный грунт следует за движением поверхностной волны, его перемещение также влияет на форму волны, то есть имеет место их взаимодействие.

## **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. Математическое моделирование гидравлического лотка для проведения численных экспериментов по накату волн на берег и размыву связного грунта / Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, И. С. Нуднер, М. Е. Яшин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7 – № 4 – С. 4–9.
- Зимин, А. И. Использование цифровой модели гидродинамического лотка для исследования заплеска волн на берег / А. И. Зимин, М. Е. Яшин // Фундаментальные и прикладные исследования в физике, химии, математике и информатике: материалы симпозиума XIV (XLVI) Международной научно-практической конференции «Образование, наука, инновации: вклад молодых исследователей», посвящённой 45-летию Кемеровского государственного университета. – Кемерово: КемГУ, 2019. – С. 45–48.
- 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.
- Яшин, М. Е. Двухкомпонентная модель гидроволнового лотка для исследования наката одиночных волн на Кессон / М. Е. Яшин, А. И. Зимин // Тезисы XXI Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. – 2020. – С. 23-24.
- Захаров, Ю. Н. Использование цифровой модели гидроволнового лотка для исследования взаимодействия одиночной волны с подводными препятствиями / Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, И. С. Нуднер, К. К. Семенов, М. Е. Яшин // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. – 2020. – С. 235-238.