

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛИННЫХ
ВОЛН ТИПА ЦУНАМИ С ЗАТОПЛЕННОЙ ПРЕГРАДОЙ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ**

К.Н. Жильцов, К.В. Костюшин, И.М. Тырышкин

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Б.В. Бошнятов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

**MATHEMATICAL INVESTIGATION OF TSUNAMI-LIKE LONG WAVES INTERACTION WITH
SUBMERGE DIKE OF DIFFERENT THICKNESS**

K.N. Zhiltsov, K.V. Kostyshin, I.M. Tyryshkin

Scientific Supervisor: Dr. B.V. Boshenyatov

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

Abstract. *The results of mathematical modeling of long gravitational wave interaction with submerged dike is presented. The calculations were performed using OpenFOAM software package. A two-dimensional problem in a viscous, incompressible formulation in the Navier-Stokes equations was solved. Volume of Fluid (VOF) method for tracking the free surface was used. The effect of impermeable submerged dike of various thickness on transmission and evolution of the wave field was observed. The effectiveness of the submerge dike is estimated by evaluating the wave reflection and transmission coefficients using the energy integral method. Calculations showed that after the dike are formed vortex structures of different intensity. In these vortices focuses a large amount of wave energy. This reduces the destructive wave forces almost two-fold.*

Введение. Волны цунами – одно из самых разрушительных явлений природы, возникающих вследствие подводных землетрясений, сдвигов тектонических плит или оползней [1]. Распространяясь в открытом океане на большие расстояния, волны цунами способны сохранять свою разрушительную силу. При входе в зону мелководья их скорость резко уменьшается, но при этом растет амплитуда волн, достигая, порой, высоты в 30–35 метров. Проникая вглубь побережья на километры, волны цунами уничтожают все на своем пути. Для борьбы с волнами цунами часто пользуются самым распространенным и традиционным методом – установкой преграды на пути волны. Тем не менее, в случае возникновения очень сильных волн, даже современные барьеры оказываются бесполезны [2].

В последнее десятилетие проводится достаточно большое количество исследований о взаимодействии длинных гравитационных волн с различными видами препятствий. Большинство работ включают как экспериментальные исследования в лабораторных условиях, так и проведение численной верификации. Иностранные работы в основном направлены на исследование взаимодействия уединенной волны с проницаемыми и непроницаемыми трапецевидными препятствия [3,4]. В российской печати в последнее время стоит отметить работу Сапрыкиной и др. [5]. Особняком стоит работа академика Фридмана и др. [6] в которой основательно исследован процесс прохождения волны через комплекс барьеров и оценено их влияние на силу берегового заплеска.

В наших предыдущих работах с помощью комплексного экспериментального и математического анализа были проведены исследования по взаимодействию волны с непроницаемой тонкой преградой. В работах [7,8] приведены основополагающие положения о коэффициентах отражения и прохождения волны, верифицирован эксперимент и численная модель. В [7] введен безразмерный коэффициент преграды, позволяющий оценивать поведение волны в гораздо большем спектре различных характерных параметров. В работе [9] был численно исследован случай взаимодействия волны с комплексом преград и подтверждены экспериментальные выводы работы [6].

Математическая модель. В работе в качестве математической модели используются уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в двумерной постановке:

$$\nabla \mathbf{U} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} - \sigma_T k_\gamma \nabla \gamma \quad (2)$$

Для учета движения свободной поверхности жидкости использовалась метод *Volume of Fluid* (VOF):

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla(\gamma \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

где γ — определяет объемную долю воды в расчетной ячейке и изменяется линейно от 0 до 1 в соответствии со следующими условиями:

$$\gamma = \begin{cases} \gamma = 0, \text{воздух} \\ 0 < \gamma < 1, \text{интерфейс} \\ \gamma = 1, \text{вода} \end{cases} \quad (4)$$

Вычисления проводились с помощью пакета OpenFOAM [10]. Широко распространенный пакет с открытым исходным кодом представляет собой набор библиотек и макросов и является, по сути, языком программирования и удобным инструментом для численного моделирования.

Результаты исследования. В работе [7] был определен безразмерный коэффициент преграды $h/(H+A)$, где h — высота преграды, H — глубина спокойной воды, A — амплитуда падающей волны. Результаты эксперимента в большой гидродинамической лотке на базе ИПРИМ РАН и численные расчеты показали, что при $h/(H+A) \approx 0,85$ наблюдается угасание волны, прошедшей через преграду, практически на 50%, относительно отношений энергий $W_R + W_T / W_0$. Используя эти данные были проведены расчеты для полностью затопленной преграды различной толщины $0,01 \text{ м} < D < 6 \text{ м}$. Стоит отметить, что глубина канала $H = 0,103 \text{ м}$, амплитуда волны $A = 0,007 \text{ м}$ — постоянны для всех тестовых пусков. Стандартную оценку амплитудных коэффициентов отражения и прохождения было решено заменить интегральным методом оценки потенциальной и кинетической энергии:

$$W_{\text{пот}} = \frac{1}{2} \rho g \sqrt{gH} \int_0^t \xi^2(t) dt \quad (5)$$

$$W_{\text{кин}} = \sqrt{gH} \int_0^t \int_0^\xi \frac{\rho U^2}{2} dy dt \quad (6)$$

На рис. 1 приведены зависимости относительной суммы прошедшей и отраженной волн. Энергии рассчитаны относительно полной энергии генератора. Видно, что энергия уменьшается с увеличением толщины преграды.

Заключение. Математическое моделирование взаимодействия длинных гравитационных волн с непроницаемой преградой различной длины показало, что увеличение толщины преграды приводит к уменьшению относительной энергии волны. Чем толще преграда, тем сильнее это угасание. При $D = 2\lambda$

угасание прошедшей волны может составлять вплоть до 60% от падающей волны. Это объясняется образованием вихревых структур за преградой, в которых и аккумулируется большее количество энергии.

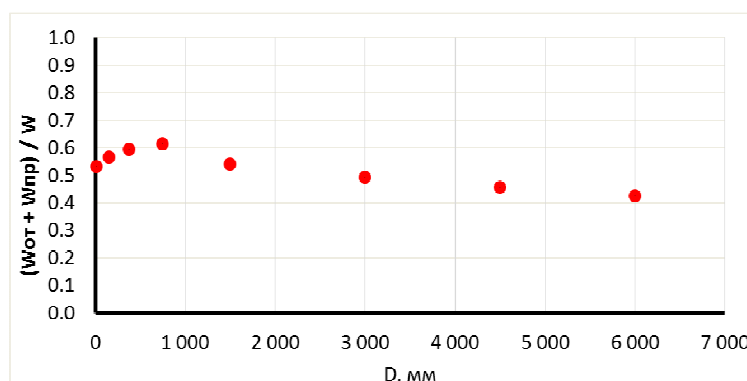


Рис. 1. Отношение сумм энергий отраженной и прошедшей волн к энергии генератора в зависимости от длины преграды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований №15-08-04097-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. – М.: Янус-К, 2005. – 360 с.
2. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Цунами: предупреждение и защита – М.: МЧС России, 2006. – 264 с.
3. Irtem E., Seyfioglu E., Kabdasli S. Experimental Investigation on the Effects of Submerged Breakwaters on Tsunami Run-up Height. J. Coast. Res., 2011. SI 64, 516-520.
4. Sriram V., Didenkulova I., Sergeeva A., Schimmels S. Tsunami evolution and run-up in a large scale experimental facility. Coastal Eng. 2016. 111. 1-12.
5. Saprykina Y., Kuznetsov S., Korzinin D. Nonlinear transformation of waves above submerged structures. 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2015). Procedia Eng. 2015. 116. 187–194.
6. Фридман А.Н., Альперович Л.С., Шемер Л., Пустильник Л., Штивельман Д., Марчук Ан. Г., Либерзон Д. // УФН. 2010. Т. 180. № 8. С. 843–850.
7. Бошнятов Б.В. О подавлении волн цунами подводными преградами. ДАН. 2013. Т.452. №4. С.392-395.
8. B. Boshenyatov and D. Lisin, “Modeling of Tsunami Waves in an Open Hydrodynamic Channel,” in Proceedings of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics. Report 123, (3-6 November 2013, Sendai, Japan).
9. Boshenyatov B. V., Zhiltsov K. N. Simulation of the interaction of tsunami waves with underwater barriers. AIP Conference Proceedings 1770, 030088 (2016); doi: 10.1063/1.4964030.
10. OpenFOAM Foundation. 2016. OpenFOAM. User guide.” Available at <http://www.openfoam.org>, 211p.