

УДК 532.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛИННЫХ ВОЛН ТИПА ЦУНАМИ С КОМПЛЕКСОМ ПРЕГРАД^{1,2}Бошенятов Б.В., ²Жильцов К.Н.¹ФГБУН «Институт прикладной механики Российской Академии наук»,
Москва, e-mail: bosbosh@iam.ras.ru;²Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики ТГУ,
Томск, e-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

Настоящая статья посвящена результатам экспериментального и численного моделирования процессов генерации, распространения и взаимодействия с комплексом подводных преград длинных гравитационных волн типа цунами. Натурные эксперименты проводились в гидродинамическом лотке с использованием высокоточных измерительных датчиков для фиксации происходящих волновых процессов. Математическое моделирование проводилось с использованием двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса в условиях ламинарной несжимаемой жидкости на свободно распространяемом программном пакете математического моделирования OpenFOAM. В процессе исследований были получены новые результаты, объясняющие, почему комплекс из двух расположенных на определенном расстоянии друг от друга преград, оказывает значительное воздействие на силу проходящей волны, существенно её уменьшая. Показано, что энергия волны, проходящей через две преграды, может быть уменьшена до 35% от падающей.

Ключевые слова: численное моделирование, уравнение Навье-Стокса, волны цунами, гидродинамический лоток, экспериментальные исследования

COMPUTER SIMULATION OF LONG TSUNAMI WAVES INTERACTION WITH COMPLEX BARRIERS^{1,2}Boshenyatov B.V., ²Zhiltsov K.N.¹Institute of Applied Mechanics Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: bosbosh@iam.ras.ru;²Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University,
Tomsk, e-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

This article focuses on the results of experimental and numerical modeling of the generation, propagation and interaction with a complex of underwater barriers of long gravitational waves such as tsunami. Full-scale experiments were conducted in hydrodynamic tray using high precision measuring sensors for fixing the occurring wave processes. Mathematical modeling was performed using two-dimensional unsteady Navier-Stokes equations in a laminar incompressible fluid on freely distribute software package of mathematical modeling OpenFOAM. Results of the research showing that a complex of two barriers located at some distance from each other have a significant influence on the strength of the transmitted wave significantly reduced it. The energy of the wave passing through the two barriers can be reduced to 35% of the incident.

Keywords: numerical modeling, Navier-Stokes equations, the tsunami waves, hydrodynamic tray, experimental studies

Огромные волны цунами, которые неожиданно обрушиваются на прибрежные города морей и океанов, являются одним из наиболее опасных и катастрофических явлений природы. Вдали от береговой линии эти волны не представляют никакой опасности, так как их высота редко превышает 1 метр. Но при входе волны в зону мелководья скорость переднего фронта волны резко уменьшается, а высота волн увеличивается в десятки раз. Ясно, что изучать волну цунами в натурных условиях практически не представляется возможным. Поэтому при исследовании волны цунами широко используют аналитические методы исследования, а также методы численного (компьютерного) моделирования и эксперименты в наземных установках [1–3].

В работе [4] была предложена математическая модель и ее программная реализация для комплексного исследования проблем

волн цунами в гидродинамическом лотке. Проведена ее верификация, которая показала хорошее согласование численных расчетов с экспериментальными данными, полученными в лабораторной установке [3, 4]. Эксперименты проводились в 15-метровом гидродинамическом лотке ИПРИМ РАН, в котором генерировалась гравитационная волна длиной $\lambda = 3$ м и средней амплитудой A от 4,5 до 10 мм. Начальная глубина воды в лотке H изменялась от 100 до 103 мм. При этом измеренная скорость распространения волн в лотке соответствовала теоретической в приближении «мелкой воды» ($\lambda \gg H$): $c = \sqrt{gH} = 1,0003$ м/с. В частности, в работе [4] показано, что при исследовании коэффициентов отражения волн от одиночной преграды данные экспериментов и численного моделирования при $A/H < 0,1$ обобщаются единой зависимостью, но сильно отличаются от расчетной

зависимости по линейной теории длинных волн. В работе [5] предложен безразмерный параметр преграды $h/(H + A)$, учитывающий амплитуду падающей волны и высоту преграды h , относительно которого данные обобщаются в более широком диапазоне $A/H < 0,3$. Установлено, что при определенных условиях вблизи тонких и непрозрачных подводных преград образуются крупномасштабные вихревые структуры, которые аккумулируют значительную часть энергии падающей волны. При значениях параметра $h/(H + A) \approx 0,8 - 0,9$ энергия, сосредоточенная в вихревых структурах, имеет максимум, при этом энергия прошедшей через преграду волны может быть уменьшена почти вдвое относительно падающей волны [5, 6].

Авторы работы [9] в 5-метровом гидродинамическом лотке исследовали возможность подавления волн цунами двойными подводными преградами. Важным результатом этой работы является то, что расстояние между преградами Δ и при значениях $\Delta \ll \lambda$ влияет на высоту (и энергию) проходящей волны, причем существует минимум высоты берегового заплеска при определенных расстояниях между преградами. Объяснение этому эффекту до сих пор отсутствовало.

В данной работе авторами приведены результаты численного моделирования взаимодействия волн типа цунами с двойными преградами (рис. 1) при оптимальном [5] значении параметра $h/(H + A) \approx 0,84$ для обеих преград. Толщина преград $B = 10$ мм, первая преграда располагалась на расстоянии 9 м от начала лотка, расстояние между преградами изменялось от 50 до 721 мм.

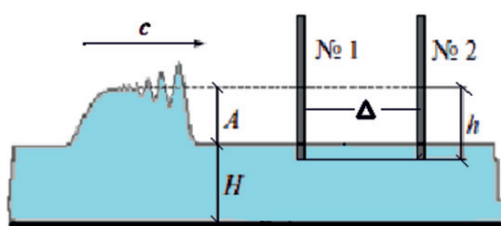


Рис. 1. Схематический чертеж численных экспериментов с двумя преградами (№ 1 и № 2)

Материалы и методы исследования

Рассматривается нестационарная задача о течении вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью раздела в канале переменного сечения. Течение в лотке считается двумерным, т.е. геометрия лотка имеет бесконечную длину в z -направлении, ось x направлена вдоль лотка, а ось y – вертикально вверх.

Течение жидкости в лотке описывается уравнениями Навье-Стокса (1–3), которые решаются численным методом конечных объемов при использо-

вании модели *VOF (Volume of Fluid)* [10] совместно с уравнением сохранения скалярной величины γ :

$$\nabla U = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla(U\gamma) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + U\nabla(\rho U) = -\nabla p + \eta \nabla^2 U + \rho g - \rho F_\sigma, \quad (3)$$

где $U(x, y, t)$ – скорость жидкости, p – давление, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести, γ – объемная концентрация несущей жидкости в расчетной ячейке. Значение скалярной функции γ в ячейке может обозначать одно из трех состояний: $\gamma = 0$ – ячейка содержит только воздух; $\gamma = 1$ – ячейка содержит только воду; $0 < \gamma < 1$ – ячейка содержит границу раздела между жидкостью и газом. Физические свойства среды рассчитываются как средневзвешенные величины в соответствии с объемными концентрациями фаз в каждой ячейке. Средневзвешенная плотность в ячейке рассчитывается как $\rho = \gamma \rho_1 + (1 - \gamma) \rho_2$, где ρ_1 – плотность несущей жидкости, ρ_2 – плотность воздуха; соответственно вязкость $\eta = \gamma \eta_1 + (1 - \gamma) \eta_2$. F_σ – сила, обусловленная поверхностным натяжением: $F_\sigma = \sigma \cdot k \nabla \gamma$, где $\sigma = 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ – коэффициент поверхностного натяжения вода-воздух, $k = \nabla \cdot (\nabla \gamma / |\nabla \gamma|) = \nabla n$.

Граничные условия на жестких стенках канала (и стенках жестких преград) устанавливаются следующими:

$$U = 0,$$

$$n \cdot \nabla \gamma = 0. \quad (4)$$

Программная реализация численного метода построена на основе свободно распространяемого (<http://www.openfoam.org>) вычислительного инструментария OpenFOAM.

Оценка точности и достоверности численных результатов проводилась сопоставлением расчетов с экспериментальными данными, полученными в идентичных условиях.

Результаты исследования и их обсуждение

Для регистрации волновых процессов в лотке используются резистивные датчики уровня воды, измерительная аппаратура [7, 8], цифровой осциллограф и двухканальный регистратор Velleman PCS 500. Резистивными датчиками, измерялось смещение свободной поверхности воды в зависимости от времени $\xi(t)$. Это позволило построить волновые диаграммы для каждого эксперимента, определить скорости всех волн, а также, при взаимодействии с преградами вычислять энергии волн: падающей W , отраженной W_R и прошедшей W_T через преграду волн [5].

На рис. 2 дано сравнение экспериментальной осциллограммы высоты волны от времени $\xi(t)$, измеренной датчиком уровня на расстоянии 5,245 м от начала лотка, с расчетной зависимостью при идентичных начальных условиях: $H = 0,103 \text{ м}$; $A/H = 0,035$.

Видно, что экспериментальная зависимость очень хорошо согласуется с расчетной.

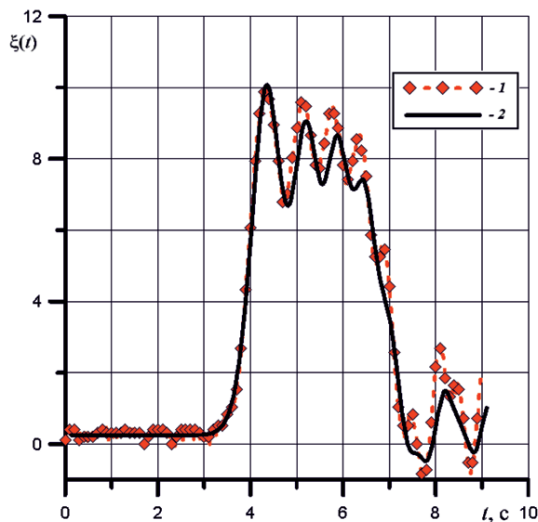


Рис. 2. Зависимость высоты волны от времени $\xi(t)$ на расстоянии 5,245 м от начала лотка: (1) – эксперимент, (2) – численный расчет

На рис. 3 приведена зависимость относительной энергии прошедшей волны в процентном отношении от расстояния между преградами, полученная путем численного расчета в данной работе. Численное моделирование проводилось при значениях безразмерных параметров: $h/(H+A) \approx 0,84$ и $A/H = 0,035$. Расстояния между преградами выражены в виде безразмерного параметра Δ/H . Видно, что относительная энергия прошедшей волны зависит от расстояния между преградами и имеет ярко выраженный минимум в области, соответствующей расстоянию $\Delta = 2H$, при этом энергия прошедшей волны составляет всего 35% от падающей. При расстоянии $\Delta = 0$, т.е. для одиночной преграды, энергия прошедшей волны составляет около 50% от падающей волны. В работе [9], в которой все результаты приведены в размерных координатах, наиболее выраженный минимум заплеска наблюдался при высоте преград $h = 75$ мм и расстоянием между ними $\Delta = 200 - 250$ мм, при этом: $A = 30$ мм, $H = 105$ мм, а $\lambda = 3$ м. Таким образом, условия этих экспериментов соответствуют безразмерным параметрам: $A/H = 0,29$, $h/(H+A) \approx 0,55$, $\Delta/H = 0 - 4,57$. Так как по высоте заплеска можно судить об энергии прошедшей волны, на рис. 3, для сравнения, приведены величины L (мм) заплесков прошедшей через двойные преграды волны, в зависимости от безразмерного параметра Δ/H . Видно, что эксперименты работы [9] качественно соответствуют нашим расчетным данным – при $\Delta/H = 2$ наблюдается ярко выраженный минимум заплеска.

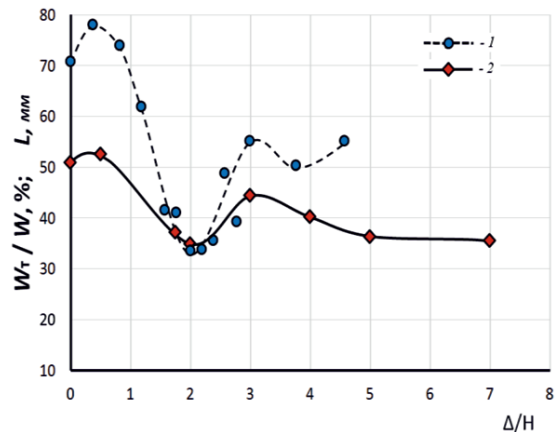


Рис. 3. 1 – обобщенная зависимость высоты заплеска L от расстояния между преградами [9] при значениях безразмерных параметров $h/(H+A) \approx 0,55$, $A/H = 0,29$; 2 – обобщенная зависимость относительной энергии прошедшей волны от расстояния между преградами при значениях безразмерных параметров $h/(H+A) \approx 0,84$ и $A/H = 0,035$

Чем же объясняется экспериментально обнаруженный минимум заплеска [9] и минимум энергии прошедшей волны, полученный в результате нашего численного эксперимента?

На рис. 4 приведены поля скоростей вблизи затопленных преград, полученные в результате наших численных расчетов, в моменты времени, когда образовавшиеся вихревые структуры за преградами уже установились.

Взаимодействие падающей волны с преградами а) и б) закончилось (т.к. $t = 17,34$ сек и $t = 17,35$ сек), отраженная и прошедшая волны находятся на большом (более чем λ) удалении от преград, но вблизи преград видны крупномасштабные вихри (диаметром, приблизительно равным начальной глубине воды в лотке), которые и аккумулируют в себе значительную часть энергии волны. В случае с одной преградой, как и в работе [5] при $A/H = 0,735$, образуются две вихревые структуры, первая из которых визуально интенсивнее. В случае двух преград вихревые структуры образуются за каждой из преград, тем самым аккумулируя в себе гораздо больше энергии, чем при взаимодействии с одной преградой. Стоит отметить, что в случае установки двух преград, вихри, образующиеся за второй преградой, имеют структуру, очень похожую на случай с одной преградой, при этом второй вихрь, сформированный за первой преградой, представляет собой более целостную структуру, нежели вихри, распространяющиеся беспрепятственно по каналу.

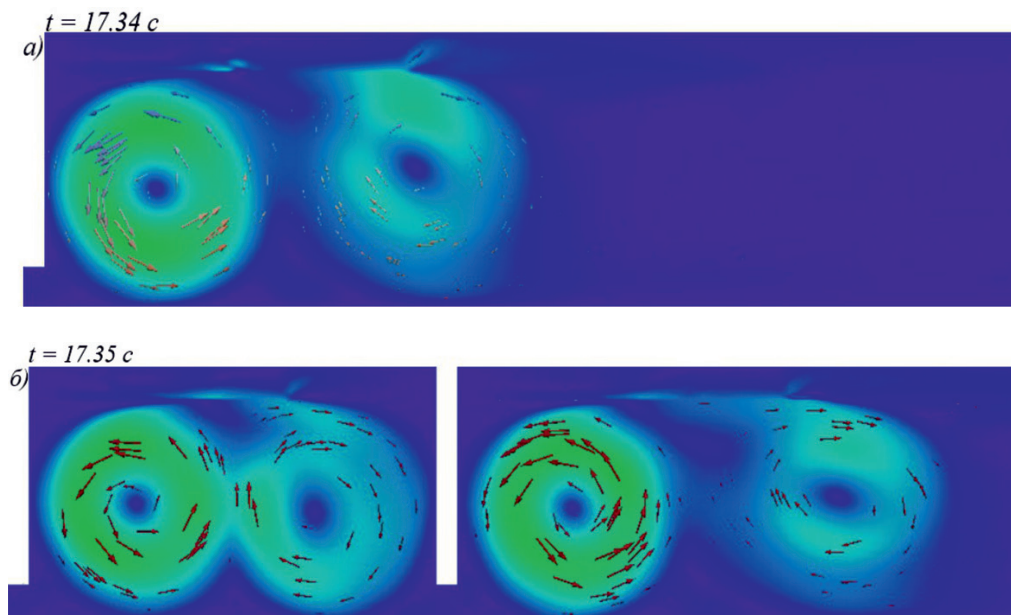


Рис. 4. Визуализация полей скоростей в момент установления вихревых структур вблизи погруженных преград при прохождении через неё гравитационной волны типа цунами при $A/H = 0,035$: а) для одной преграды; б) для двух преград при $\Delta/H = 2$

Таким образом, эксперименты и численное моделирование взаимодействия длинных волн типа цунами с комплексом, состоящим из двух преград, установленных на различных расстояниях друг от друга, показали, что при определённых расстояниях относительная энергия прошедшей волны имеет минимумы. Эти минимумы объясняются наличием крупномасштабных вихревых структур, которые аккумулируют значительную часть энергии падающей волны. Особо стоит отметить расстояния, близкие к двум начальным глубинам H , при которых наблюдается наиболее сильное уменьшение энергии прошедшей волны.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-04097 А.

Список литературы

1. Бошенятов Б.В. Особенности моделирования волн цунами в лабораторной установке // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСМПС'2015). 24–31 мая 2015, г. Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – С. 384–385.
2. Бошенятов Б.В., Попов В.В. Экспериментальные исследования взаимодействия волн типа цунами с подвод-

ными преградами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/3. – С. 145–150.

3. Бошенятов Б.В., Лисин Д.Г. Численное моделирование волн типа цунами в гидродинамическом лотке // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 6(26). – С. 45–55.

4. Бошенятов Б.В. О подавлении волн цунами подводными преградами // ДАН. – 2013. – Т. 452, № 4. – С. 392–395.

5. Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В. Устройство измерения уровня воды. Пат. 2485452 РФ, МПК G01F 23/18. Заявлено 07.10.2010; Оpubл. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 9 с.

6. Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В., Семянистый А.В. Метод измерения волн малой амплитуды на водной поверхности // ПТЭ. – 2011. – № 2. – С. 116–117.

7. Фридман А.Н., Альперович Л.С., Шемер Л. и др. О подавлении волн цунами подводными барьерами // УФН. – 2010. – Т. 180, № 8. – С. 843–850.

8. Boshenyatov B., Lisin D. Modeling of Tsunami Waves in an Open Hydrodynamic Channel // Proceedings of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics. 3–6 November, 2013, Sendai, Japan. – Report 123.

9. Boshenyatov B.V., Lisin D.G. Role of Nonlinear and Viscous Effects by Interacting the Tsunami Waves with Underwater Obstacles. // International Conference on the Methods of Aerophysical Research. June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk, Russia. Abstracts. Part 1. – Novosibirsk: Avtograf, 2014. – P. 35–36.

10. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free Boundaries // J. Comp. Phys. – 1981. – V. 39. – P. 201.