

УДК 550.344.42 + 532.5

ОСОБЕННОСТИ ВИХРЕВОГО ПОДАВЛЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ ПОДВОДНЫМИ БАРЬЕРАМИ

Б. В. Бошнятов^{1,2,*}, К. Н. Жильцов²

Представлено академиком РАН Г.А. Поповым 29.05.2018 г.

Поступило 22.06.2018 г.

Исследованы особенности вихревого подавления волн цунами непроницаемой подводной преградой при её высоте, близкой к оптимальной, которая соответствует максимальному эффекту вихревого подавления энергии волн.

Ключевые слова: волна цунами, подводный барьер, численное моделирование, гидродинамический (волновой) лоток, вихревые структуры.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846755-759>

В работах [1–4] показано, что при определённых условиях вблизи тонких и непроницаемых подводных преград образуются крупномасштабные вихревые структуры, которые могут аккумулировать значительную часть энергии длинных (по сравнению с глубиной водоёма, $L \gg H$) волн типа цунами. Изучение этого явления является важной и актуальной задачей, поскольку использование вихревого механизма подавления длинных волн может служить основой для создания в будущем недорогих и высокоэффективных подводных преград, значительно снижающих разрушительную силу волн цунами. В работе [1] впервые было обнаружено, что существует оптимальная высота преграды $h \approx 0,85H$, при которой в вихревых структурах аккумулируется наибольшая энергия W_v , достигающая в ряде случаев 50% от энергии падающей волны W . На рис. 1 по экспериментальным данным работы [1] построен график этой зависимости.

Эксперименты [1] проводили в гидродинамическом лотке ИПРИМ РАН (длина 15 м, ширина 0,26 м и высота 0,35 м), где генерировалась гравитационная волна длиной $L = 3$ 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 $A/H < 0,1$, и, как показано в работах [5, 6], в этом случае влиянием нелинейных эффектов на энергию и скорость распространения волн можно пренебречь, $c = \sqrt{gH}$ (g — ускорение силы тяжести). Однако из тех же экспериментов следует, что при взаимодействии

волн с тонкой одиночной преградой заданной высоты наблюдается довольно значительный разброс данных по относительным энергиям отражения $W_r = W_r/W$ и энергиям вихревых потерь $W_v = W_v/W$ (рис. 1), что в ряде случаев приводило к снижению (до 30%) суммарной энергии подавления волн. Таким образом, экспериментальные факты свидетельствуют о том, что необходимы более детальные исследования с целью выявления дополнительных условий и параметров, влияющих на эффективность вихревого подавления волн типа цунами.

В данной работе приведены результаты таких исследований при оптимальной относительной высоте подводной преграды, которая соответствует максимальному эффекту вихревого подавления энергии волн $h/(H + A) = 0,855–0,875$. Преграда высотой $h = 95$ мм располагалась на расстоянии 9 м

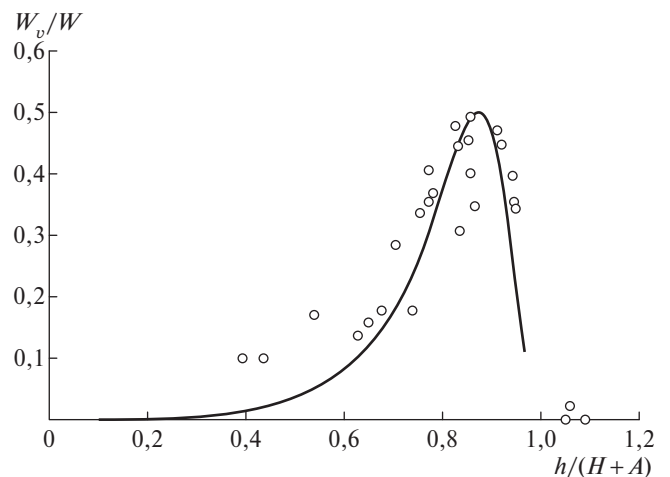


Рис. 1. Коэффициент вихревых потерь в зависимости от относительной высоты подводной преграды; точки — эксперимент [1], $A/H = 0,04–0,1$; кривая — теория [4], $A/H = 0,07$ ($k = 0,82$).

¹Институт прикладной механики
Российской Академии наук, Москва

²Национальный исследовательский
Томский государственный университет

*E-mail: bosbosh@mail.ru

от начала лотка. Глубина воды в гидродинамическом лотке и длина генерируемой волны оставались неизменными: $H = 103$ мм, $L = 3000$ мм, а высота падающей волны изменялась от 0,5 до 16,5 мм, т.е. в более широком, чем в работе [1], диапазоне.

Исследования проводили комплексным методом, сочетающим физические эксперименты в гидродинамическом лотке с численным моделированием изучаемых в лотке волновых процессов на основе полных уравнений Навье—Стокса. Описание экспериментальной установки, методика численного моделирования и методика экспериментальных исследований детально изложены в работах [6–9].

Двумерные уравнения Навье—Стокса для несжимаемой жидкости с соответствующими граничными условиями на твёрдых стенках и свободной поверхности решались методом конечных объёмов на неподвижной прямоугольной сетке с градиентом мелкости ячеек, направленным нормально к исходной плоскости раздела фаз вода—воздух, образующей свободную поверхность жидкости. Пространственная дискретизация уравнений осуществлялась на основе комбинации центральной схемы и схемы “против потока”, что обеспечивает устойчивость и точность дискретизации второго порядка. Использовалась явная схема бегущего счёта, при этом шаг по времени контролировался автоматически, чтобы оставаться много меньше шага по координате (число Куранта $< 0,6$). Программная реализация численного метода построена на основе свободно распространяемого (<http://www.openfoam.org>) вычислительного инструментария OpenFOAM.

В экспериментах при помощи четырёх резистивных датчиков [9], расположенных на различных расстояниях l_n (1,4; 6; 8,99 и 11,22 м) от начала лотка, измерялось смещение свободной поверхности воды в зависимости от времени $\xi_n(t)$. Это позволило построить волновые диаграммы $x-t$ для каждого эксперимента (ось x направлена вдоль лотка, t — время), определить скорости всех волн, а также амплитудные коэффициенты отражения $R = A_r/A$ и прохождения $T = A_t/A$ волны после её взаимодействия с преградой.

Сравнение данных численного моделирования и результатов экспериментов по измерению зависимостей $\xi_n(t)$ на различных расстояниях от генератора волн подтвердили достоверность экспериментов и адекватность программы моделирования, которая позволила визуализировать поле скоростей, в том числе вблизи преграды, и вычислять кинетическую энергию волн [6, 8] в каждом эксперименте.

Используя измеренные профили волн $\xi(t)$, можно вычислить потенциальную энергию волн

$$W_p = \frac{\rho g}{2} \sqrt{gH} \int_0^T \xi^2 dt,$$

а при $A/H < 0,1$ и полную энергию волны $W = 2W_p$ [10]. При $A/H > 0,1$ погрешность линейной теории превышает 5% и кинетическую энергию необходимо вычислять, интегрируя профиль скорости $u(y, t)$ потока жидкости за фронтом волны:

$$W_k = \frac{\rho}{2} \sqrt{gH} \int_0^T \int_0^{H+\xi} u^2 dy dt.$$

На рис. 2 по результатам численных и экспериментальных исследований дана зависимость коэффициента отражения гравитационной волны типа цунами от тонкой непроницаемой преграды в зависимости от безразмерной высоты волны. Там же (штриховая линия) показана величина коэффициента отражения волны от преграды той же высоты, но бесконечно большой протяжённости в направлении распространения волны, рассчитанная по линейной теории [10]:

$$R = \frac{\sqrt{H} - \sqrt{H-h}}{\sqrt{H} + \sqrt{H-h}} = 0,564.$$

Из рис. 2 видно, что при высоте волны $A < 0,08H$ коэффициент отражения сильно зависит от относительной высоты падающей волны. При $A/H < 0,01$ от преграды отражается менее 1% энергии падающей волны $W_r = R^2 < 0,01$. При $A/H > 0,1$ коэффициент отражения приближается к максимуму, который близок по величине к коэффициенту отражения от преграды бесконечной толщины и может быть оценён по линейной теории. Подобный характер

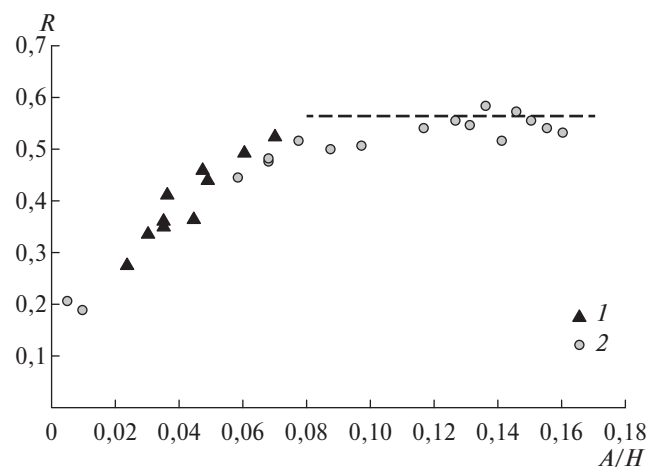


Рис. 2. Коэффициент отражения гравитационной волны типа цунами от преграды оптимальной высоты $h = 0,87(H + A)$ в зависимости от относительной высоты падающей волны; 1 — эксперимент, 2 — расчёт.

имеет и зависимость вихревых потерь энергии от параметра A/H . При $A/H < 0,005$ вихревые потери энергии на преграде составляют менее 1%. При $A/H = 0,07$ энергия вихревых потерь достигает максимума, равного 50% от энергии падающей волны, и далее, вплоть до значения $A/H = 0,16$, практически не изменяется. Отметим, что при распространении волн цунами в океане значения параметра $A/H < 0,0002$, поэтому любые подводные преграды в виде высоких горных хребтов практически не уменьшают суммарную энергию волн цунами.

В работе [4] получены теоретические зависимости для расчёта коэффициентов отражения и прохождения волн типа цунами при их взаимодействии с тонкими преградами:

$$R = \left(\frac{1-k}{1+k} P^2 \right) / \left(4 + \frac{1-k}{1+k} P^2 \right)^{-1}, \quad T = 1 - R,$$

$$P = \frac{h/(H+A) - A/(H+A)}{1 - h/(H+A)}. \quad (1)$$

Используя формулы (1) для коэффициента отражения и данные исследований, представленные на рис. 2, можно построить зависимость коэффициента восстановления $k = f(A/H)$, которая приведена на рис. 3.

Для натуральных волн цунами, которые распространяются в океане вдали от мелководья, коэффициент восстановления близок к единице, что соответствует “упругому” взаимодействию волны цунами с любыми подводными преградами без диссипации энергии. При этом из (1) следует, что коэффициент отражения $R = 0$, а коэффициент прохождения волны $T = 1$. С увеличением относительной высоты волны коэффициент восстановления уменьшается, при

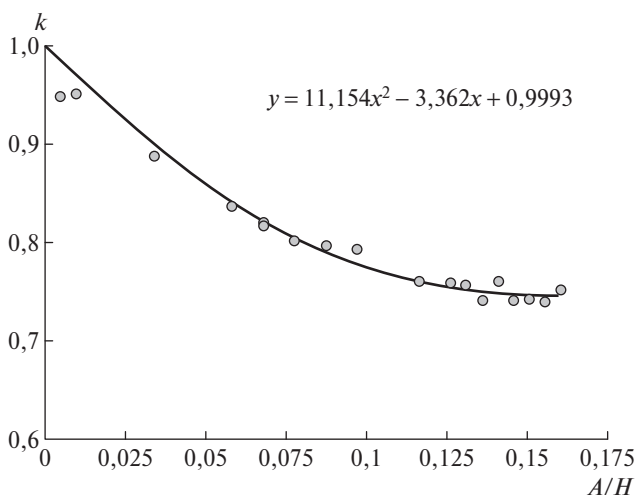


Рис. 3. Зависимость коэффициента восстановления от относительной высоты падающей волны.

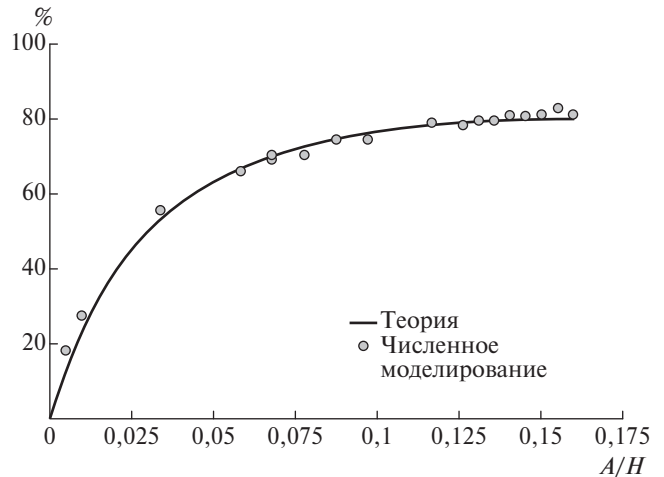


Рис. 4. Эффективность подавления волн типа цунами подводной преградой оптимальной высоты, выраженная в %, к суммарной энергии падающей волны.

этом увеличиваются как отражённая от преграды энергия, так и потери в крупномасштабных вихревых структурах. На рис. 4 с использованием теоретических формул (1) и зависимости коэффициента $k = 11,154(A/H)^2 - 3,362(A/H) + 0,9993$ (рис. 3) построена расчётная зависимость эффективности тонкой подводной преграды оптимальной высоты от безразмерной высоты падающей волны типа цунами. Там же (точки) приведены результаты прямого численного моделирования на основе полных уравнений Навье—Стокса.

При заданных условиях физического и численного экспериментов суммарная эффективность подводной преграды (коэффициент отражения и вихревые потери) увеличивается практически от нуля (при $A/H \ll 1$) до максимального значения (при $A/H > 0,1$), далее до $A/H = 0,16$ изменение слабое. При $A/H > 0,125$ тонкая и непроницаемая подводная преграда оптимальной высоты $h = 0,87(H+A)$ гасит 80% от суммарной энергии падающей волны, из них 50% энергии сосредоточено в крупномасштабных вихревых структурах.

Рассмотрим вопрос о возможности установления подобия между лабораторными экспериментами и реальными натурными условиями. В наиболее общем виде волновые процессы в жидкости описываются уравнениями Навье—Стокса. После преобразования этих уравнений к безразмерному виду получим следующие критерии подобия:

$$\frac{A}{H}, \frac{H}{L}, \frac{h}{H+A}, \frac{c}{\sqrt{gH}}, \frac{\sqrt{gH}}{L}t, \frac{x}{H}, \frac{\rho}{\eta} A \sqrt{gH}, \quad (2)$$

где ρ и η — плотность и динамическая вязкость воды соответственно. Согласно закону подобия физиче-

Таблица 1. Параметры типичных волн цунами [11]

Зона	H , км	A , м	L , км	A/H	H/L	c/\sqrt{gH}	Re
Океан	4	1	400	0,00025	0,01	1	$2 \cdot 10^8$
Континентальный шельф	0,150	2,25	80	0,015	0,0019	1	$9 \cdot 10^8$
Мелководье	0,015	4	30	0,27	0,0005	1,15	$6 \cdot 10^7$
Наши эксперименты и численные расчёты	0,0001	$(0,5-16) \cdot 10^{-3}$	0,003	0,005–0,15	0,033	1–1,1	10^4

ская модель в точности отражает натурные явления, если все безразмерные критерии (2) имеют одинаковые значения в модельном эксперименте и в природе. В табл. 1 приведены параметры типичных волн цунами при различных условиях, полученные в работе [11].

Ясно, что воспроизвести в наземных установках натурные значения всех перечисленных в (2) критериев подобия невозможно. Так, например, даже в крупномасштабных волновых лотках длиной 300 м и более удаётся смоделировать числа Рейнольдса $Re \approx 10^6$, что в 100 раз меньше натуральных значений. В наших экспериментах числа $Re \approx 10^4$, остальные критерии (2) за счёт повышения точности измерений [9] приближены к натурным и соответствуют крупномасштабным волновым лоткам. Поскольку обеспечить в экспериментах полного подобия натурным условиям невозможно, то при моделировании волн цунами в лабораторной установке необходимо:

проводить комплексные теоретические, экспериментальные и численные исследования;

из списка (2) выбирать наиболее важные для изучаемого явления критерии подобия;

исследовать критериальные зависимости с целью установления областей автомодельности, в которых зависимость от того или иного критерия подобия исчезает.

Видно, что зависимости, показанные на рис. 2 и 4, автомодельны и легко могут быть экстраполированы на значение параметра $A/H = 0,27$, характерного для мелководья. Есть основания полагать, что критериальные зависимости изучаемых в данной работе явлений от числа Рейнольдса зависят слабо (автомодельны при $Re > Re_{\text{exp}} \approx 10^4$), однако доказательство этого факта требует дополнительных исследований. В этом случае, как показано в [12], подобие по всем критериям (2), кроме числа Re , обеспечивается масштабным переходом от модели к натуре, если все линейные размеры увеличить в n раз, а время увеличить в \sqrt{n} раз. В этом легко убедиться

простой подстановкой указанных преобразований в соответствующие критерии подобия (2).

Источники финансирования. Работа осуществлена в рамках научного проекта № 8.1.33.2018 при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ. Экспериментальная часть работы выполнена в рамках государственного задания (номер гос. регистрации темы АААА-А19-119012290136-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бошенятов Б.В. // ДАН. 2013. Т. 452. № 4. С. 392–395.
2. Boshenyatov D.V., Zhiltsov K.N. Simulation of the Interaction of Tsunami Waves with Underwater Barriers // Amer. Inst. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 1770. № 3. P. 030088.
3. Yun-Ta Wu, Shih-Chun Hsiao. Propagation of Solitary Waves over Double Submerged Barriers // Water. 2017. V. 9. P. 917–933.
4. Бошенятов Б.В. // ДАН. 2017. Т. 477. № 4. С. 485–487.
5. Бошенятов Б.В., Попов В.В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/3. С. 145–150.
6. Бошенятов Б.В., Лисин Д.Г. // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2013. № 6 (26). С. 45–55.
7. Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В., Семянистый А.В. // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 116–118.
8. Бошенятов Б.В., Жильцов К.Н. // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2018. № 51. С. 86–103.
9. Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В. Устройство измерения уровня воды // Пат. РФ № 2485452. Приоритет 07.10.2010. Заявка № 2010141060. Зарегистрировано 20.06.2013 // Бюл. 2013.
10. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
11. Madsen P.A., Fuhrman D.R., Schaffer H.A. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. C12012. DOI: 10.1029/2008JC004932.
12. Фридман А.Н., Альперович Л.С., Шмер Л. и др. // УФН. 2010. Т. 180. № 8. С. 843–850.

FEATURES OF VORTICAL SUPPRESSION OF TSUNAMI WAVES UNDERWATER BARRIERS

B. V. Boshenyatov, K. N. Zhiltsov

Presented by Academician of the RAS G.A. Popov May 29, 2018

Received June 22, 2018

The features of vortical suppression of tsunami waves by an impermeable underwater barrier have been studied. The height of the barrier is close to the optimum corresponding to the maximum effect of vortical suppression of the wave energy. It is shown that the energy of suppressing tsunami waves by such a barrier depends on the wave height and can vary from zero to 80% of the incident wave energy.

Keywords: tsunami wave, underwater barrier, numerical simulation, hydrodynamic (wave) flume, vortex structures.