

УДК 532.5

© А. А. Дорфман¹, С. А. Печенин, К. К. Семенов^{2,3}, И. С. Нуднер^{2,4}, В. В. Максимов⁵

¹Высшая техническая школа Ведель, Германия

²23 ГМПИ — филиал АО «31 ГПИСС», г. Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

⁴Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», г. Санкт-Петербург

⁵АО «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург

alexander-dorfmann@yandex.ru

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛНЫ ЦУНАМИ НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И БЕРЕГОВЫЕ ОБЪЕКТЫ

Статья поступила в редакцию 19.05.2017, после доработки 03.11.2017.

Изложен расчетный метод, позволяющий определить основные характеристики воздействия волн цунами на морские гидротехнические сооружения и объекты, размещенные в береговой зоне. Учет различных по форме объектов делает изложенный в работе подход полезным для получения оценок при решении различных прикладных задач, в том числе для расчета критериев безопасности сооружений и объектов при планировании строительства в цунамиопасных районах. В работе представлена математическая модель, используемая для количественного описания процесса взаимодействия волн цунами с морскими сооружениями и позволяющая определить значения коэффициентов давления и силы. Дана классификация береговых и прибрежных сооружений по степени их проницаемости для водного потока, выделяющая разные типы взаимодействия волнами цунами с ними. Даны формулы и соотношения, позволяющие рассчитать величины действующей на сооружения и объекты нагрузки в зависимости от их характеристик. Представлены выражения для хорошо проницаемых объектов; указаны формулы для плохо проницаемых объектов при воздействии на них фронта потока, образованного волнами цунами, и при стадии их квазистационарного обтекания волнами цунами.

Ключевые слова: волны цунами, волновое воздействие, нагрузки, морские гидротехнические сооружения, береговые объекты.

A. A. Dorfman¹, S. A. Pechenin, K. K. Semenov^{2,3}, I. S. Nudner^{2,4}, V. V. Maximov⁵

¹Fachhochschule Wedel, Deutschland

²23 State Marine Design Institute — Branch of «31 State Design Institute of Special Construction», St.-Petersburg, Russia

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, Russia

⁴Baltic State Technical University, St.-Petersburg, Russia

⁵JSC «Corporation «Oceanpribor», St.-Petersburg, Russia

TSUNAMI WAVE IMPACT ON MARINE HYDROTECHNICAL STRUCTURES AND COASTAL OBJECTS

Received 19.05.2017, in final form 03.11.2017.

In this paper, the calculation method is described that makes it possible to determine the main characteristics of tsunami waves impact on marine hydrotechnical structures and objects located in the coastal zone. Taking into account the various forms of the objects makes the approach presented in the work useful for obtaining estimates for the solution of various applied problems including the calculating the criteria of safety of structures and objects during the planning of construction in tsunami-prone areas. The paper presents a mathematical model that is used for the quantitative describing of the process of tsunami waves interaction with marine structures and allows to determine the values of the pressure and force coefficients. Classification of offshore and coastal structures according to the degree of their permeability for the water flow is given. This classification makes it possible to identify different types of tsunami waves interaction with

Ссылка для цитирования: Дорфман А. А., Печенин С. А., Семенов К. К., Нуднер И. С., Максимов В. В. Воздействие волны цунами на морские гидротехнические сооружения и береговые объекты // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 4. С. 16—30.

For citation: Dorfman A. A., Pechenin S. A., Semenov K. K., Nudner I. S., Maximov V. V. Tsunami wave impact on marine hydrotechnical structures and coastal objects. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 4, 16—30.

DOI: 10.7868/S2073667317040025.

them. Formulas and relationships are given that allow to calculate the values of the wave loads on the structures and objects depending on their characteristics. Expressions for well-permeable objects are presented. Formulas are given for poorly permeable objects for the situation of the impact of the flow formed by the tsunami waves and for the stage of quasistationary flow around these objects.

Key words: tsunami waves, waves impact, wave loads, marine hydrotechnical structures, coastal structures.

Важной проблемой для цунамиопасных побережий является защита объектов жизнедеятельности от воздействия волн цунами. Такие явления могут приводить к катастрофическим последствиям. Только за последние десятилетия произошедшие цунами привели к гибели тысяч людей и нанесли огромный ущерб прибрежным территориям [1].

Проблема защиты территорий и прибрежных объектов от разрушительного воздействия цунами, оценка вероятности их повреждения, минимизация наносимого ущерба для конкретных условий прибрежной зоны связана с задачами определения волнового поля на всех его стадиях от возникновения волн, их распространения, взаимодействия с морскими гидротехническими сооружениями и наката на берег до воздействия потока на береговые объекты. Из отмеченных задач наименее разработанной является задача расчета силового воздействия волнового потока на морские и береговые объекты. В литературе представлены результаты исследований воздействия волн цунами на объекты сравнительно простой формы: для морских гидротехнических сооружений и береговых объектов — на вертикальную стенку [2, 3], цилиндрические и призматические преграды [4—11], доки и резервуары [5, 12], модели объектов с прямоугольным основанием [13] и с особенностями [14]. Существенное внимание уделяется исследованиям воздействия волн на береговые сооружения [15]. В силу сложности вопроса исследования выполняются преимущественно с помощью физического моделирования и с применением сложных численных моделей. Вместе с тем, есть необходимость в расчетном сопровождении проектирования объектов простых и сложных конструкций в цунамиопасных районах, которое позволило бы осуществлять поиск наилучших конструктивных решений без выполнения дорогостоящих исследований, обращаясь к ним только для апробации конечных проектных решений.

В работе представлен метод расчета нагрузок цунами на сооружения и объекты в береговой зоне, основанный на приближенных формулах. Учет различных по форме объектов делает его полезным для различного рода оценок при решении прикладных задач, в частности для расчета критериев безопасности сооружений и объектов при планировании строительства в цунамиопасных районах.

Качественная картина взаимодействия цунами с объектами. Процесс воздействия волн цунами на морские и береговые гидротехнические сооружения и объекты можно представить в виде двух характерных стадий — воздействия фронта потока и квазистационарного обтекания. В области фронта потока его глубина и скорость изменяются достаточно быстро. При распространении волн к берегу после их обрушения фронт потока приобретает форму бора (рис. 1, *a*), при движении по сухому берегу фронт потока деформируется, принимая форму «языка», нарастающего по глубине слоя воды (рис. 1, *б*).

Взаимодействие фронта потока с объектом имеет существенно нестационарный характер. Наибольшую нагрузку воспринимает лобовая, обращенная к потоку часть сооружения. За фронтом потока его параметры изменяются достаточно плавно. Через некоторый промежуток времени воздействие можно считать квазистационарным. В этой стадии воздействие потока существенно на все грани сооружения и складывается из нагрузок, вызванных динамическим напором жидкости и нагрузок, вызванных ее ускорением, которое имеет отрицательный знак при накате волн на берег и положительный — при откате (рис. 2).

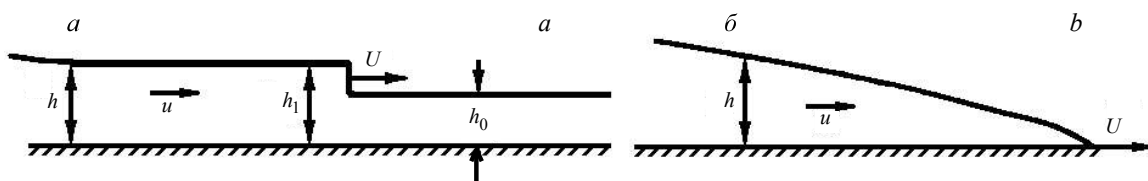


Рис. 1. Типы фронтов волны цунами: *a* — бор; *б* — гладкий фронт.

Fig. 1. Types of tsunami wave fronts: *a* — vertical front; *b* — smooth front.

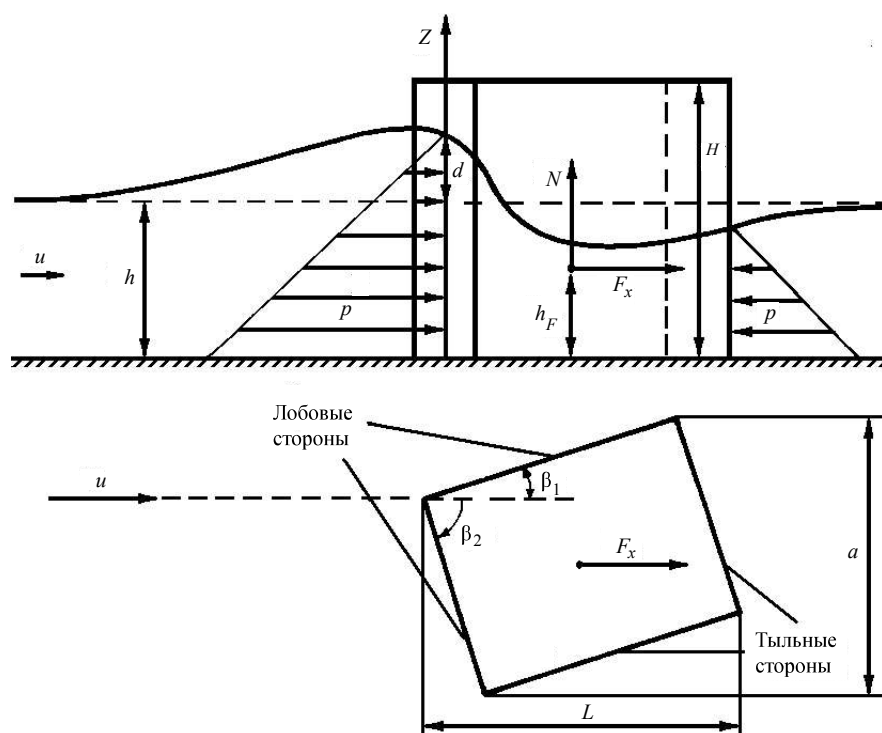


Рис. 2. Квazистационарное обтекание призматической преграды.

Fig. 2. Quasistationary flow around a prismatic obstacle.

При расчете нагрузок на объекты основные характеристики волнового потока в прибрежной зоне считаются известными. Исходными данными для расчета нагрузок от воздействия цунами являются: скорость фронта потока при подходе к берегу $C_{фр}$, глубина потока h над отметкой затопляемой местности около объекта, скорость течения у объекта U , ускорение потока dU/dt ; первоначальная глубина воды у объекта h_0 ; коэффициент шероховатости берега η , направление подхода фронта к объекту, а также размеры сооружения, его форма, вес сооружения G , коэффициент проницаемости сооружения $f = 1 - S_{п}/S_c$, где $S_{п}$ — площадь проемов в стенах сооружения, S_c — площадь стен сооружения.

На рис. 1, a отмечена высота бора, равная перепаду ($h_1 - h_0$) глубин после прохождения бора (h_1) и перед ним (h_0). Рис. 2 содержит обозначения геометрических размеров объекта, на который воздействует волна цунами: высоту сооружения H , протяженность его проекции a на плоскость, нормальную к направлению распространения волны, площадь сечения S_k . Возникающая равнодействующая сила F_x приложена на высоте h_F над дном. Углы к граням объекта, которые образует направление распространения волны цунами, обозначены как β_1 и β_2 . Высота смоченной части сооружения равна d .

Морские сооружения и береговые объекты можно разделить на две группы по характеру воздействия на них волн цунами: хорошо и плохо проницаемые. К первой группе относятся конструкции, состоящие в основном из цилиндрических элементов: опоры мостов, эстакады, пирсы, крановое оборудование причальных линий портов, опоры высоковольтных линий передач. Воздействие на такие сооружения фронта потока несущественно.

К сооружениям второй группы можно отнести промышленные, административные и жилые здания. Сооружения такого типа воспринимают значительные нагрузки и на стадии удара фронта потока, и при обтекании в квазистационарном режиме.

Для количественного описания процесса взаимодействия волн цунами с морскими сооружениями рассмотрим математическую модель, определяющую основные параметры данного процесса и позволяющую их вычислить.

Математическая постановка задачи воздействия волн на морские сооружения призматической формы. В работе [16] предложено решение задачи об определении воздействия стационарного течения тяжелой идеальной несжимаемой жидкости со свободной поверхностью на установленную на горизонтальном дне вертикальную призматическую преграду. Решение получено в предположении,

что в области, занятой жидкостью, имеет место докритический режим течения (число Фруда меньше единицы), движение жидкости имеет потенциальный характер и справедливы уравнения теории мелкой воды [17]:

$$(u \nabla) u + g \nabla h = 0, \quad (1)$$

$$\nabla(uh) = 0, \quad (2)$$

$$w = -z \nabla u, \quad (3)$$

$$p = \rho g(h - z), \quad (4)$$

где переменные x, y, z задают Декартову систему координат с началом, расположенным на дне, направление оси x совпадает с направлением скорости потока на бесконечности, а ось z направлена вертикально вверх; $u(x, y)$ — вектор горизонтальной компоненты скорости; $w(x, y, z)$ — вертикальная компонента скорости; $h(x, y)$ — глубина потока; ∇ — градиент, действующий в горизонтальной плоскости; p — давление; ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Метод решения задачи о воздействии волн на сооружения. В силу предположения о потенциальном характере движения жидкости имеем $u = \nabla \phi$. Тогда интегрированием уравнения (1) получим интеграл Бернулли

$$h_0/h = 1 + 0.5 F^2, \quad (5)$$

где h_0 — глубина потока в точке торможения (то есть точка, в которой скорость равна $u = 0$); $F = u/\sqrt{gh}$ — число Фруда.

Уравнение (5) связывает гидродинамические параметры в различных точках потока с их значениями в области невозмущенного течения:

$$\frac{h}{h_\infty} = \frac{1 + 0.5 F_\infty^2}{1 + 0.5 F^2}, \quad (6)$$

где индексом « ∞ » обозначены параметры невозмущенного потока.

Интеграл Бернулли (5) может быть записан также с применением величины $\lambda = u/\sqrt{gh_*}$, где h_* — глубина потока при критической скорости $u_* = \sqrt{gh_*}$ (соответствует $F = 1$), что позволит уменьшить число исходных параметров в правой части равенства. Подставив в (5) значение $F = 1$, получаем, что $h_*/h_0 = 2/3$. Тогда

$$h_0/h = 1 + 0.5 F^2 = 1 + u^2/(2gh) = 1 + \frac{u^2}{2gh_*} \frac{h_*}{h_0} \frac{h_0}{h} = 1 + \frac{\lambda^2}{3} \frac{h_0}{h},$$

откуда, выразив (h/h_0) , окончательно получаем

$$h/h_0 = 1 - \lambda^2/3. \quad (7)$$

Из (7) следует формула, аналогичная (6):

$$\frac{h}{h_\infty} = \frac{1 - \lambda^2/3}{1 - \lambda_\infty^2/3}. \quad (8)$$

Соотношения (5) и (7) позволяют получить связь между F и λ :

$$F = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \lambda^2/3}}, \quad (9)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{F}{\sqrt{1 + 0.5 F^2}}. \quad (10)$$

Из требования совместности уравнения неразрывности (2) и условия потенциальности течения следует

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{h_0}{h} \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{h_0}{h} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (11)$$

где $\psi(x, y)$ — функция тока.

Система уравнений (11) аналогична уравнениям плоского безвихревого движения идеального газа, исследованным в [18]. Это дает возможность применять математический аппарат, разработанный для

решения соответствующих задач газовой динамики. Уравнения (11) могут быть преобразованы к полярным координатам u, θ в плоскости годографа скорости и приведены к симметричному виду путем введения переменной s :

$$ds = \sqrt{\frac{1-\lambda^2}{1-\lambda^2/3}} \cdot \frac{d\lambda}{\lambda}, \quad 0 < \lambda < 1. \quad (12)$$

Тогда получим

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \sqrt{K} \frac{\partial \psi}{\partial s}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial s} = -\sqrt{K} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad (13)$$

где $K = (1 - \lambda^2)/(1 - \lambda^2/3)^3$.

Система (13) представляет собой обобщение системы уравнений Коши-Римана для течений безграничной невесомой жидкости.

Решим задачу, увязав движение жидкости со свободной поверхностью с движением безграничной жидкости. Следуя методу, изложенному в [18], предположим

$$K = 1, \quad ds = d\tilde{s},$$

где тильдой отмечены величины, характеризующие обтекание тела идентичного поперечного сечения безграничным потоком идеальной невесомой жидкости в условиях плоской задачи. Тогда, принимая во внимание (12), получим, что

$$ds = \sqrt{\frac{1-\lambda^2}{1-\lambda^2/3}} \cdot \frac{d\lambda}{\lambda} = \left(1 - \lambda^2/3\right) \sqrt{K} \cdot \frac{d\lambda}{\lambda} = \left(1 - \lambda^2/3\right) \frac{d\lambda}{\lambda}.$$

В силу условия безграничности жидкости $\tilde{\lambda} \rightarrow 0$ и, следовательно, $d\tilde{s} = d\tilde{\lambda}/\tilde{\lambda}$. Значит, имеет место уравнение

$$\left(1 - \lambda^2/3\right) \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d\tilde{\lambda}}{\tilde{\lambda}}, \quad (14)$$

которое следует решать при краевом условии $\lambda \tilde{\lambda} \rightarrow 1$ при $\lambda \rightarrow 0$. Интеграл уравнения (14) имеет вид

$$\tilde{\lambda} = \lambda \exp\left(-\lambda^2/6\right). \quad (15)$$

Отсюда, принимая во внимание неравенство $0 < \lambda < 1$, получим, в частности, что $0 < \tilde{\lambda} < 0.8465$.

Разложение (15) в ряд дает в первом приближении связь

$$\tilde{\lambda} = \lambda \left(1 - \lambda^2/6\right). \quad (16)$$

Решая кубическое уравнение (16) относительно величины λ , получим по тригонометрической формуле Виета, что

$$\lambda = 2\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \frac{3\tilde{\lambda}}{2\sqrt{2}}\right). \quad (17)$$

Найдем распределение уровня жидкости вдоль боковой поверхности преграды. Используя формулы (8), (9), получим

$$\frac{h-h_\infty}{h_\infty} = 0.5 \left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_\infty^2}\right) F_\infty^2. \quad (18)$$

Подставляя в (18) зависимости (10) и (17), придем к соотношению

$$\frac{h-h_\infty}{h_\infty} = 0.5 F_\infty^2 - \frac{8}{3} \left(1 + 0.5 F_\infty^2\right) \cos^2\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \frac{3\tilde{\lambda}}{2\sqrt{2}}\right). \quad (19)$$

Выразим $\tilde{\lambda}$ через коэффициент давления $\tilde{c}_p = \frac{\tilde{p} - \tilde{p}_\infty}{0.5 \rho \tilde{u}_\infty^2}$; при этом воспользуемся уравнением Бернулли для безграничной невесомой жидкости

$$\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}_\infty \sqrt{1 - \tilde{c}_p}. \quad (20)$$

Подставляя в (20) значения $\tilde{\lambda}$ по формуле (15) и используя (10), получим

$$\tilde{\lambda} = \sqrt{1.5(1 - \tilde{c}_p)} \frac{F_\infty}{\sqrt{1 + 0.5 F_\infty^2}} \exp\left(-\frac{F_\infty^2}{4 + 2 F_\infty^2}\right). \quad (21)$$

Объединяя (19) и (21), приходим к искомому выражению для глубины

$$\frac{h - h_\infty}{h_\infty} = 0.5 F_\infty^2 - \frac{8}{3} (1 + 0.5 F_\infty^2) \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3\sqrt{3}}{4} \frac{F_\infty \sqrt{1 - \tilde{c}_p}}{\sqrt{1 + 0.5 F_\infty^2}} \exp \left(-\frac{F_\infty^2}{4 + 2 F_\infty^2} \right) \right) \right). \quad (22)$$

Отсюда следует связь между основными критериями, характеризующими процесс обтекания:

$$\tilde{c}_p = 1 - \frac{8}{3} \frac{(2 + F_\infty^2)}{F_\infty^2} \cos^2 \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3\sqrt{3}}{4} \frac{F_\infty \sqrt{1 - \tilde{c}_p}}{\sqrt{1 + 0.5 F_\infty^2}} \exp \left(-\frac{F_\infty^2}{4 + 2 F_\infty^2} \right) \right) \right).$$

Формула (22) имеет ограничения применимости. Действительно, подставим в (6) значение $F = 1$ и получим

$$\frac{h}{h_\infty} = \frac{(2 + F_\infty^2)}{3}. \quad (23)$$

Из формул (22), (23) следуют зависимости между $\tilde{c}_p$, h и F_∞ , которые имеют место при формировании вблизи преграды критического режима течения $F = 1$:

$$\tilde{c}_p = 1 - 0.2315 \frac{(2 + F_\infty^2)}{F_\infty^2} \exp \left(\frac{F_\infty^2}{2 + F_\infty^2} \right), \quad (24)$$

$$\frac{h - h_\infty}{h_\infty} = \frac{1}{3} (1 - F_\infty^2). \quad (25)$$

Отрицательные значения $\tilde{c}_p$ ограничены в соответствии с зависимостями (24), (25). При $\tilde{c}_p \geq 1$ зависимость (22) может быть с удовлетворительной погрешностью приближена соотношением

$$\frac{h - h_\infty}{h_\infty} = 0.5 \tilde{c}_p F_\infty^2. \quad (26)$$

Величина возникающей при аппроксимации относительной погрешности ϵ расчета значений $(h - h_\infty)/h_\infty$ вычислена и представлена на рис. 3.

Видим, что в области практически значимых значений чисел Фруда F_∞ ее значение не столь существенно, что позволяет использовать соотношение (26) и сделанные на его основе выводы в инженерных целях.

Основываясь на формуле (26), найдем основные кинематические и динамические параметры, характеризующие взаимодействие открытого потока с преградой. Принимая во внимание условие непроницаемости обтекаемого тела и используя формулы (6) и (26), получим выражение для горизонтальной компоненты скорости, касательной к поверхности преграды u_r :

$$u_r = u_\infty \sqrt{1 - \tilde{c}_p}. \quad (27)$$

Объединяя (3) и (27), приходим к выражению для вертикальной компоненты скорости на поверхности преграды

$$w = 0.5 \frac{z}{h} F_\infty^2 u_\infty h_\infty \sqrt{1 - \tilde{c}_p} \frac{d\tilde{c}_p}{d\tau},$$

где $d\tau$ — элемент контура поперечного сечения преграды.

Траектории частиц жидкости вдоль поверхности преграды описываются уравнением:

$$d\tau / u_\tau = dz / w, \quad (28)$$

интегрирование которого приводит к формуле:

$$\frac{z}{z_0} = \frac{1 + 0.5 \tilde{c}_p(\tau) F_\infty^2}{1 + 0.5 \tilde{c}_p(\tau_0) F_\infty^2}. \quad (29)$$

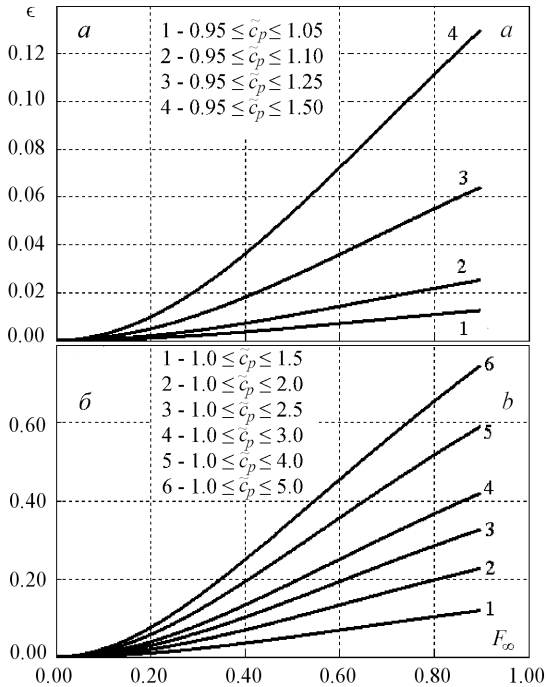


Рис. 3. Относительная погрешность результатов вычислений по формуле (26).
при $\tilde{c}_p \approx 1$ (а) и при $\tilde{c}_p \geq 1$ (б).

Fig. 3. The relative error of the results calculated by the formula (26): for $\tilde{c}_p \approx 1$ (a) and for $\tilde{c}_p \geq 1$ (b).

Объединяя формулы (4) и (26), получим выражение (30) для давления на поверхности преграды

$$p = \rho g h_{\infty} \left(1 + 0.5 \tilde{c}_p F_{\infty}^2 - z / h_{\infty} \right). \quad (30)$$

Действующая на преграду в направлении оси x горизонтальная сила определяется путем интегрирования давления по смоченной части поверхности:

$$Q = a \oint_L n_x \int_0^h p \, dz \, dl, \quad (31)$$

где a — ширина проекции преграды на плоскость, перпендикулярную направлению течения; L — контур поперечного сечения преграды; n_x — проекция вектора внешней нормали к поверхности преграды на ось x ; $l = \tau/a$.

Из соотношений (30), (31) следует выражение для коэффициента горизонтальной силы $c = \frac{Q}{0.5 \rho u_{\infty}^2 h_{\infty} a}$:

$$c = \gamma + 0.25 \delta F_{\infty}^2,$$

где $\gamma = \oint_L \tilde{c}_p n_x \, dl$, $\delta = \oint_L \tilde{c}_p^2 n_x \, dl$.

Отметим, что величина γ идентична коэффициенту лобового сопротивления тел, обтекаемых потоком безграничной жидкости в условиях плоской задачи. Величина коэффициента c выше в случае жидкости со свободной границей, чем в случае безграничной жидкости [19].

Полученные соотношения позволяют рассчитать основные характеристики процесса взаимодействия волн цунами с морскими гидротехническими сооружениями призматического профиля. Пример сравнения результатов применения изложенного подхода с результатами эксперимента представлен в работе [5].

Нагрузки от волн цунами на объекты, относящиеся к хорошо проницаемым сооружениям. Величина силы, действующей на элемент стрежневого типа, определяется из соотношения

$$F_0 = 0.5 \rho U^2 C_x r d \sin^2 x + \rho \frac{dU}{dt} (V + a^2 d) \sin x,$$

где ρ — плотность воды; C_x — коэффициент сопротивления формы поперечного сечения стержня, определяемый по методу предыдущего раздела; r — характерный размер поперечного сечения; d — длина смоченной части элемента; x — угол между направлением течения и образующей стержня; V — объем погруженной в поток части стержня; a — ширина проекции элемента на плоскость, перпендикулярную направлению течения.

Значения C_x для элементов стержневого типа приведены в табл. 1, где во втором и третьем столбцах стрелками отмечены направление потока и характерные размеры сооружения.

Нагрузка по смоченной длине элемента стержневого типа распределяется равномерно. Точкой приложения силы F_0 следует считать середину смоченной длины стержня. Составляющая силы F_0 в направлении течения равна ($F_0 \sin x$).

Смещающаяся сила F_x , действующая на конструкцию в целом, находится суммированием сил, приложенных к отдельным элементам

$$F_x = 0.5 \rho U^2 \sum_i C_{x_i} r_i d_i \sin^3 x_i n_i + \rho \frac{dU}{dt} \sum_i (V_i + a_i d_i) \sin^2 x_i n_i,$$

где i — номер группы элементов конструкции, имеющих одинаковые значения C_x , r , d , x , V , a ; n_i — количество элементов в i -ой группе.

Опрокидывающий момент $M_{\text{опр}}$, действующий на элемент конструкции в направлении течения в потоке, находится по формуле

$$M_{\text{опр}} = h_{0F} \cdot F_{0x},$$

где h_{0F} — высота точки приложения силы F_{0x} . Момент $M_{\text{опр}}$ сил, действующих на конструкцию в целом, определяется суммированием опрокидывающих моментов, приложенных к отдельным элементам.

В случае однородных по структуре конструкций точка приложения результирующей смещающей силы F_x находится в центре погруженной в поток их части, и для определения величины $M_{\text{опр}}$ можно пользоваться формулой

Таблица 1

Значения параметра C_x для элементов стержневого типа

Форма объекта	Вид сбоку	Вид сверху	S_c	Размеры	C_x
Призма			Ha	$b = H = a$	1.05
				$b = H/3 = a$	1.30
				$b < H \leq a$	1.20
				$b > 2H \leq 2a$	0.74
				$b > 2H = 7a$	0.48
			$Ha = \sqrt{2} Hb$	$b = H$	0.80
				$b = H/3$	0.95
Цилиндр			Ha	$H = a$	0.64
				$H = 2a$	0.68
				$H = 3a$	0.73
				$H = 5a$	0.76
				$H = 10a$	0.80
Полусфера			$\pi H^2/2$	$a = 2H$	0.43
Полуцилиндр			Ha	$a \geq 10H$	0.30

$$M_{\text{опр}} = h_x \cdot F_x,$$

где h_x — высота точки приложения силы F_x .

Определение нагрузок на плохо проницаемые объекты в стадии квазистационарного обтекания. В стадии квазистационарного обтекания результирующие нагрузки складываются из нагрузок, обусловленных скоростным напором (соответствующие величины имеют индекс «ст») и ускорением потока (индекс «ин»)

$$F_x = F_{x\text{ст}} + F_{x\text{ин}}, P = P_{\text{ст}} + P_{\text{ин}},$$

где P — суммарное давление, оказываемое на объект.

Инерционная (обусловленная ускорением потока) компонента нагрузок вычисляется следующим образом. Если сооружение имеет в плане форму прямоугольника рис. 4, а, то силы $F_{\text{ина1}}$ и $F_{\text{ина2}}$ инерционного воздействия потока на стороны с шириной соответственно a_1 и a_2 определяются по формулам:

$$F_{\text{инб1}} = \rho \frac{dU}{dt} (0.25 \pi a_1^2 + S_K) \sin \beta_1 \sigma \left(\frac{a_2}{a_1} \right) \mu \left(\frac{2H}{a_1} \right) f,$$

$$F_{\text{инб2}} = \rho \frac{dU}{dt} (0.25 \pi a_2^2 + S_K) \sin \beta_2 \sigma \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \mu \left(\frac{2H}{a_2} \right) f,$$

где S_K — площадь контура сооружения в плане; H — высота сооружения; B — ширина миделевого сечения сооружения, равная в случае прямоугольного сечения $B = a_1 \sin \beta_1 + a_2 \sin \beta_2$, а функции σ и μ соответственно равны

$$\sigma(y) = 2.27 - 1.98 / (1.56 + y),$$

$$\mu(y) = \begin{cases} H \left[1 - (1 - H^2 / h^2) (1 - y) \right] / (1 + 0.5BH / h^2), & H < h, \\ h / (1 + 0.5B / h), & H > h \end{cases}.$$

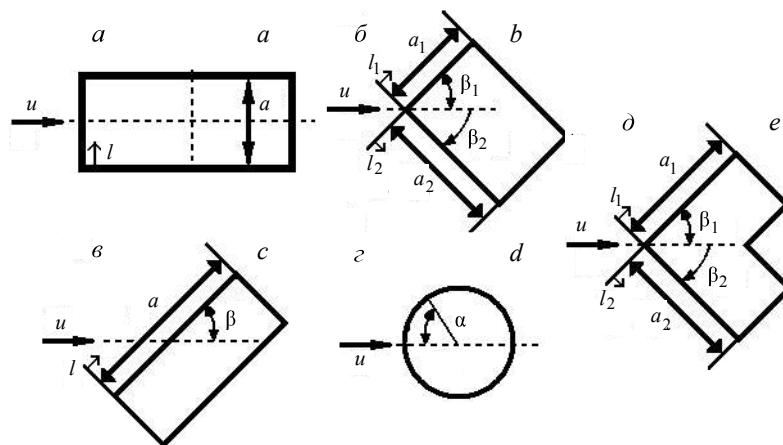


Рис. 4. Основные типы контуров:

прямоугольный контур при фронтальном воздействии (а), при косом подходе волны цунами к углу контура (б), при косом подходе волны цунами к стороне контура (в); круглый контур (г); контур в виде многоугольника (д).

Fig. 4. Main types of contours: rectangular contour under frontal impact of the tsunami waves (a), under waves acting on the contour corner (b), under waves impact on the contour side (c); round contour (d); polygon contour (e).

Среднее давление на внешние стены (знак плюс — для лобовой, а минус — для тыльной стороны сооружения) равно

$$P_{\text{ин}} = \pm F_{\text{ин} a1,2} / 2S_{a1,2}$$

где $S_{a1,2}$ — площадь погруженной в поток части стены, имеющей ширину a_1 или a_2 соответственно.

Смещающая сила определяется при этом из соотношения

$$F_{x \text{ ин}} = F_{\text{ин} a1} \sin \beta_1 + F_{\text{ин} a2} \sin \beta_2.$$

Если сооружение имеет в плане форму окружности с радиусом R , то инерционная компонента смещающей силы определяется по формуле:

$$F_{x \text{ ин}} = 2\rho \frac{dU}{dt} \pi R^2 \mu \left(\frac{H}{R} \right) f.$$

Давление $P_{\text{ин}}$ по периметру внешней стены сооружения вычисляется по зависимости:

$$P_{\text{ин}} = \begin{cases} F_{x \text{ ин}} \cos \alpha / (\pi R H), & H < h, \\ F_{x \text{ ин}} / (\pi R h), & H > h. \end{cases}$$

Нагрузки, обусловленные скоростным напором потока, и различные кинематические характеристики течения во второй стадии воздействия длинных гравитационных волн на объект определяются следующим образом. При $B < h/5$ или $H < h/2$ деформацией свободной поверхности можно пренебречь. Смещающая сила $F_{x \text{ ст}}$ определяется по формуле

$$F_{x \text{ ст}} = 0.5 \rho U^2 C_x S_M f,$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления сооружения, определяемый по табл. 2 (символом r в ее ячейках обозначен характерный размер), S_M — площадь миделевого сечения объекта.

Давление $P_{\text{ст}}$ на лобовой грани объекта можно оценить по формуле

$$P_{\text{ст}} = \rho g (h - z + 0.5 U^2 / g),$$

на остальных гранях: сооружения $P_{\text{ст}} = \rho g (h - z)$. При $B \gg h/5$ и $H > h/2$ следует учитывать деформацию свободной поверхности у объекта. Давление $P_{\text{ст}}$ в произвольной точке смоченной поверхности сооружения вычисляется по зависимости

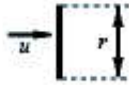
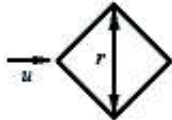
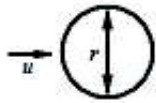
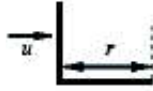
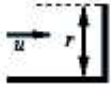
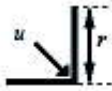
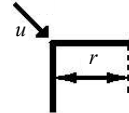
$$P_{\text{ст}} = \rho g (h_k - z).$$

В этой формуле величина h_k обозначает глубину воды по контуру сооружения в плане, которая находится по формулам

$$h_k = \begin{cases} h (1 + 0.5 F_r^2 C_p) f & \text{при } h < H, \\ h + 0.5 H F_r^2 C_p f & \text{при } h \geq H, \end{cases}$$

Таблица 2

Значения параметра C_x для погруженных объектов

Профиль				
C_x	2.20	2.00	1.50	1.20
Профиль				
C_x	2.00	1.83	2.46	2.00

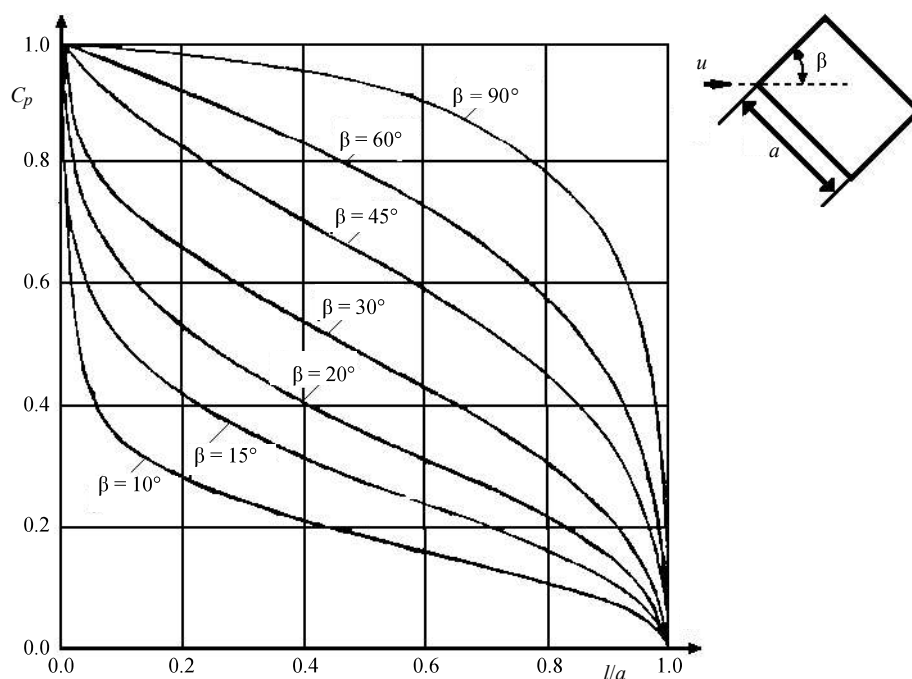
где $F_r = U/\sqrt{gH}$ — число Фруда; C_p — безразмерная функция, определяемая описанным ниже способом.

На тыльной части контура (кроме кругового) $C_p = -1$. На лобовой части контура функция C_p для различных форм объектов в плане находится следующим образом.

Для прямоугольника с отношением длины к ширине менее 5, одна из осей симметрии которого составляет угол с направлением потока не более 10° (рис. 4, а), функция C_p вдоль лобовой стороны определяется по рис. 5 при $\beta = 90^\circ$. Среднее значение вдоль этой стороны равно 0.88. На боковых сторонах прямоугольника $C_p = -1$.

Для прямоугольника с соотношением длины к ширине менее 5, обе оси симметрии которого составляют углы с направлением потока более 10° (рис. 4, б), функция C_p на лобовых сторонах определяется по рис. 6, при этом в качестве угла β берутся β_1 и β_2 соответственно. Средние значения вдоль этих сторон определяются по рис. 7.

Для прямоугольника с соотношением длины к ширине более 5 (рис. 4, в) вдоль длинной лобовой стороны C_p определяется по рис. 5, а среднее значение C_p — по рис. 8. На второй стороне принимается $C_p = 1$.

Рис. 5. Распределение значения C_p по контуру.Fig. 5. Distribution of the C_p value along the contour.

Для окружности вдоль каждой ее половины (рис. 4, з) C_p определяется по рис. 9.

Для сооружений, имеющих в плане форму многоугольника, функция C_p определяется следующим образом.

Если контур сооружения обращен к потоку выпуклой частью (рис. 4, д), функция C_p на этой части

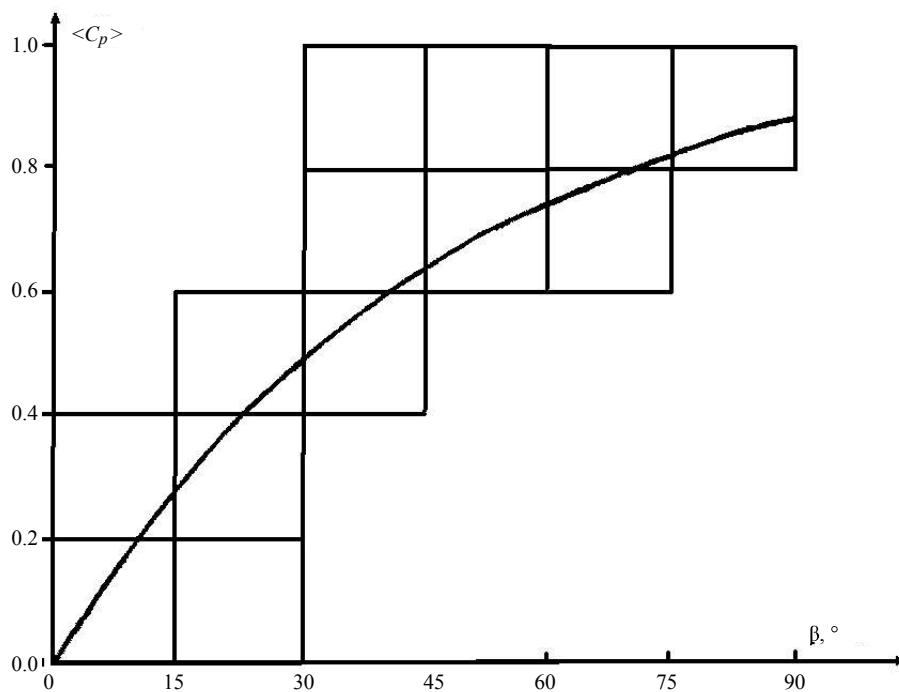


Рис. 6. Зависимость коэффициента $\langle C_p \rangle$ от угла β для прямоугольной преграды с соотношением длины к ширине менее 5.

Fig. 6. Dependence of coefficient $\langle C_p \rangle$ value on the angle β for a rectangular barrier with a ratio of length to width less than 5.

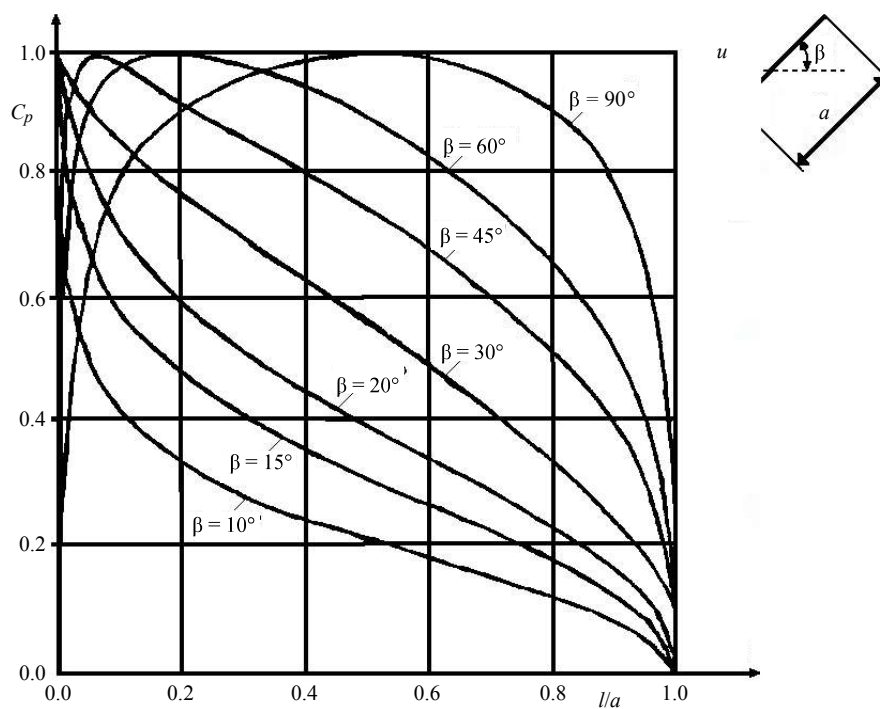


Рис. 7. Распределение коэффициента C_p по контуру пластинки.

Fig. 7. Distribution of coefficient C_p value along the plate contour.

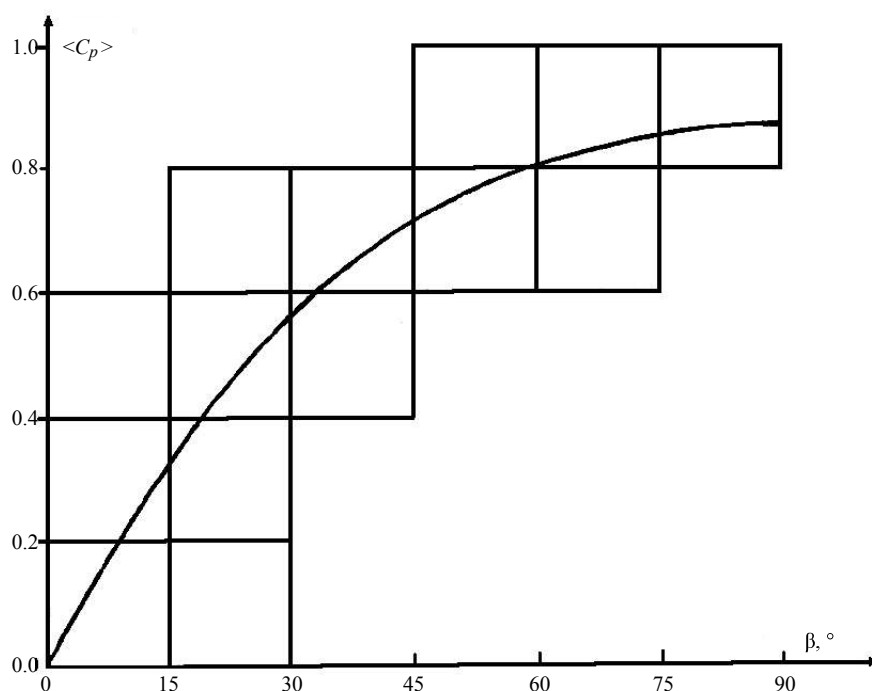


Рис. 8. Зависимость коэффициента $\langle C_p \rangle$ от угла β для прямоугольной преграды с соотношением длины к ширине более 5.

Fig. 8. Dependence of coefficient $\langle C_p \rangle$ value on the angle β for a rectangular barrier with a ratio of length to width more than 5.

контура определяется по графикам рис. 6. Если контур сооружения обращен к потоку вогнутой частью (этому случаю соответствует смена направления течения на противоположное, то на этой части контура значение C_p принимается равным 1. На тыльной части контура также $C_p = -1$. Средняя по контуру глубина воды $\langle h_k \rangle$ находится по соотношению

$$\langle h_k \rangle = \begin{cases} h(1 + 0.5 F_r^2 \langle C_p \rangle) f & \text{при } h < H, \\ h + 0.5 F_r^2 \langle C_p \rangle H f & \text{при } h \geq H, \end{cases}$$

где $\langle C_p \rangle$ — среднее значение функции C_p вдоль контура объекта в плане.

Значение $\langle C_p \rangle$ рассчитывается следующим образом: для круговой формы контура оно равно (-0.79) ; для прямоугольной и многоугольной формы контура

$$\langle C_p \rangle = \frac{1}{\bar{l}} \sum_i \langle C_p \rangle_i \cdot b_i,$$

где i — номер стороны контура объекта; $\langle C_p \rangle_i$ — среднее значение C_p вдоль i -й стороны; b_i — длина i -й

стороны; $\bar{l} = \sum b_i$ — периметр контура объекта в плане.

Нагрузка на единицу ширины контура объекта $P_{\text{ст}}$ вычисляется по соотношениям

$$P_{\text{ст}} = \begin{cases} 0.5 \rho g h^2 k f & \text{при } h < H, \\ 0.5 \rho H (2h_k - H) f & \text{при } h \geq H. \end{cases}$$

Смещающая сила $F_{\text{хст}}$, действующая на объект в направлении течения, составляет

$$F_{\text{хст}} = \begin{cases} 0.5 \rho g h^2 F_r^2 B C_x f_2 & \text{при } h < H, \\ 0.5 \rho H^2 F_r^2 B C_x f_2 & \text{при } h \geq H, \end{cases}$$

где значение коэффициента C_x берется из табл. 1 при $h < H$ и из табл. 2 при $h \geq H$.

Другие силовые характеристики воздействия квазистационарного потока на объект определяются следующим образом.

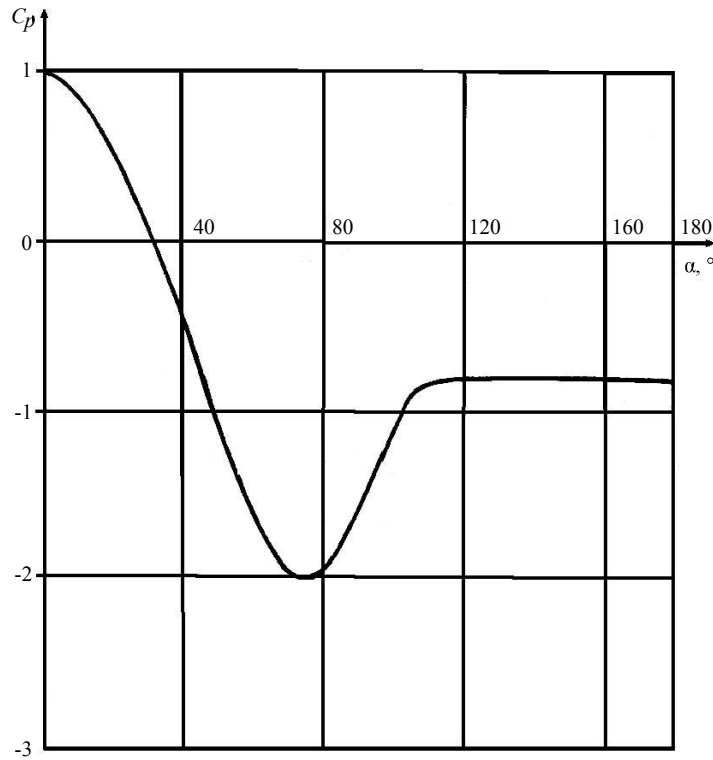


Рис. 9. Распределение значений коэффициента C_p по контуру пластинки.

Fig. 9. Distribution of coefficient C_p value along the plate contour.

Взвешивающая сила N , действующая на непроницаемое сооружение, рассчитывается по формуле

$$N = \begin{cases} \rho g H S_k & \text{при } h \geq H, \\ \rho g \langle h_k \rangle S_k & \text{при } h < H, \end{cases}$$

где S_k — площадь контура сооружения в плане.

Если непроницаемое сооружение имеет герметичное основание, т.е. под нижнее покрытие вода не проникает, то выталкивающая сила N равна нулю, взвешивающая сила, действующая на проницаемое сооружение, определяется по соотношению

$$N = \begin{cases} K_\gamma G \langle h_k \rangle / H & \text{при } h \leq H, \\ K_\gamma G & \text{при } h > H, \end{cases}$$

где G — вес сооружения; K_γ — коэффициент, равный отношению удельных весов воды и материала сооружения. Сдвиг сооружения с основания в случае нежесткой их связи произойдет при условии

$$F_x > (G - N) K_{\text{тр}},$$

где $K_{\text{тр}}$ — безразмерный коэффициент трения сооружения по основанию. Нескрепленное с основанием сооружение всплывает при условии $N > G$. Опрокидывающий момент $M_{\text{опр}}$ от воздействия смещений и взвешивающей силы находится по формуле

$$M_{\text{опр}} = h_F F_x + 0.5 L N,$$

где L — размер объекта по потоку; h_F — высота точки приложения силы F_x над основанием сооружения, которая находится по соотношению

$$h_F = \begin{cases} 0.5 \langle h_k \rangle & \text{при } h < H, \\ 0.5 H & \text{при } h \geq H. \end{cases}$$

Определение нагрузок от воздействия фронта потока на плохо проницаемые объекты. Нагрузки при воздействии на объект фронта потока в виде языка определяются по следующим зависимостям.

Тангенс среднего угла наклона поверхности фронта $\text{tg}\theta$ определяется по величине параметра $\eta = 1.1 \cdot 10^3 \cdot n^3 / C_{\text{фр}}$.

Распределение давления P по высоте z i -й лобовой грани сооружения при $0 \leq z \leq C_{\text{фр}}(3 - \text{tg}\theta) \cdot \text{tg}\theta \cdot t$ и $0 < t < t_{\text{max}}$ находится по формуле

$$P = 0.5 \rho C_{\text{фр}}^2 \exp(1.4 \text{tg}\theta) [1 - z^2 / (C_{\text{фр}}^2 (3 - \text{tg}\theta)^2 \text{tg}^2\theta \cdot t^2)] (1 - t/t_{\text{max}}) \sin^2\beta_i + \rho g (C_{\text{фр}} \text{tg}\theta t - z),$$

где t — время; t_{max} — момент времени наибольшего поднятия уровня воды перед сооружением; β_i — угол между направлением распространения фронта $C_{\text{фр}}$ и i -й лобовой гранью объекта.

Индекс «+» означает, что второй член суммы в этой формуле обращается в нуль при

$$z \geq C_{\text{фр}} \text{tg}\theta t.$$

Нагрузка на каждый метр ширины i лобовой грани сооружения P находится из выражения

$$P = (1/3) \rho C_{\text{фр}}^3 \exp(1.4 \text{tg}\theta) \text{tg}\theta (3 - \text{tg}\theta) t (1 - t/t_{\text{max}}) f \sin^2\beta_i + 0.5 \rho g C_{\text{фр}}^2 \text{tg}^2\theta \cdot t^2 f.$$

Смещающая сила F_x , действующая на объект призматической формы, вычисляется по формуле

$$F_x = \sum_i p_i a_i \sin\beta_i,$$

где a_i — ширина i -й лобовой грани.

Для объекта цилиндрической формы смещающая сила находится по формуле

$$F_x = 0.22 \rho C_{\text{фр}}^3 \exp(1.4 \text{tg}\theta) B f \text{tg}\theta (3 - \text{tg}\theta) t (1 - t/t_{\text{max}}) + 0.5 \rho g C_{\text{фр}}^2 B f \text{tg}^2\theta \cdot t^2,$$

где B — ширина миделевого сечения объекта.

Смещающая сила при воздействии на объект фронта потока в виде языка достигает максимума в момент времени, приблизительно равный

$$t = 0.75 t_{\text{max}}.$$

Нагрузки при воздействии на объект фронта потока в виде бора определяются следующим образом.

Глубина воды в боре h_1 находится по формуле

$$h_1 = \sqrt{0.25 h_0^2 + 2 h_0 C_{\text{фр}}^2 / g} - 0.5 h_0.$$

Давление на лобовой грани объекта при воздействии бора P вычисляется из соотношения

$$P = \rho g (h_{\text{отр}} - z),$$

где $h_{\text{отр}}$ — уровень, возникший в результате удара бора, определяемый по рис. 10, в относительных единицах он равен h_2 .

Величина смещающей силы F_x находится по формуле

$$F_x = 0.5 \rho g h_{\text{отр}}^2 B f.$$

Длительность воздействия бора t_* , в течение которой нагрузки линейно по времени переходят к их значениям в стадии квазистационарного обтекания, определяется по соотношению

$$t_* = B / \sqrt{g h_{\text{отр}}}.$$

В данной работе представлена расчетная схема определения основных характеристики силового воздействия волн цунами на преграды простой и сложной формы, размещенные как в прибрежной, так и в береговой зоне. Изложена математическая модель, позволяющая определять основные параметры такого воздействия. Представлены формулы и соотношения, позволяющие выполнить необходимые расчеты при проектных проработках при строительстве в цунамиопасных районах.

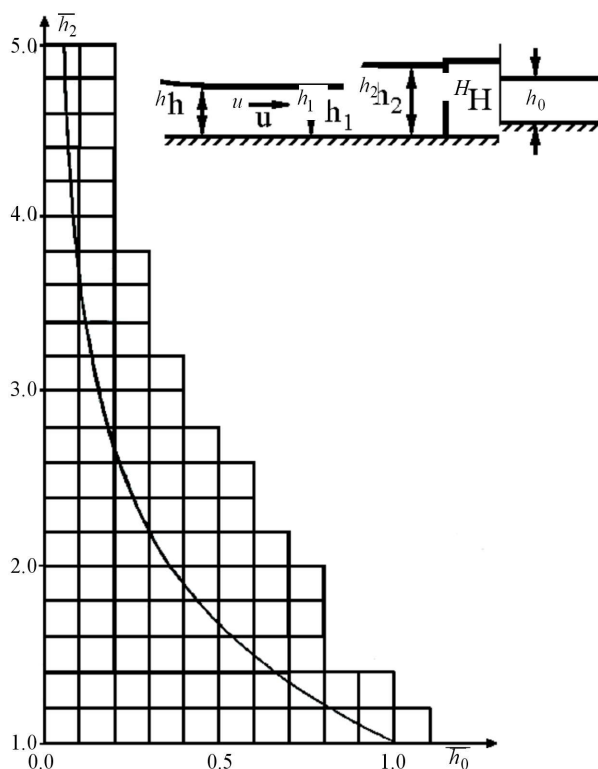


Рис. 10. График значений h_2 в зависимости от h_0 .

Fig. 10. Dependence of h_2 values on h_0 .

Литература

1. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н., Беляков В. В., Макаров В. С., Зезюлин Д. В. Новые тенденции в обследовании цунами // Инженерная физика. 2016. № 5. С. 96—106.
2. Kihara N., Niida Y., Takabatake D., Kaida H., Shibayama A., Miyagawa Y. Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall // Coastal Engineering. 2015. V. 99. P. 46—63.
3. Ramsden J. D. Forces on a vertical wall due to long waves, bores, and dry-bed surges // Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering. 1996. V. 122, N 3. P. 134—141.
4. Wijatmiko I., Murakami K. Tsunami bore pressures and forces acting on structure surrounded by weir // Journal of Japan Society of Civil Engineers. Ser. B3 (OceanEngineering). 2011. V. 67, N. 2. P. I_625—I_630.
5. Нуднер И. С., Максимов В. В. Воздействие волн цунами на морские гидротехнические сооружения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2008. Т. 1, № 2. С. 45—56.
6. Arnason H., Petroff C., Yeh H. Tsunami bore impingement onto a vertical column // Journal of Disaster Research. 2009. V. 4, N. 6. P. 391—403.
7. Букреев В. И., Зыков В. В. Силовое воздействие волн типа бора на вертикальную пластину // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 6. С. 45—54.
8. Nakamura T., Mizutani N., Fujima K. Three-dimensional numerical analysis on deformation of run-up tsunami and tsunami force acting on square structures // Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, ASCE. 2010. V. 1. P. 1—10.
9. Al-Faehly T., Palermo D., Nistor I., Cornett A. Experimental modeling of extreme hydrodynamic forces on structural models // International Journal of Protective Structures. 2012. V. 3, Iss. 4. P. 477—505.
10. Алешиков Ю. З. Воздействие длинных волн на группу вертикальных цилиндров // Вестник ЛГУ. Сер.: Матем. и мех. 1987. № 1. С. 43—46.
11. Nouri Y., Nistor I., Palermo D. Experimental investigation of tsunami impact on free standing structures // Coastal Engineering Journal. 2010. V. 52, N. 1. P. 43—70.
12. Araki S., Kunimatsu W., Nishiyama S., Furuse T., Aoki S.I., Kotake Y. Experimental study on tsunami wave load acting on storage tank in coastal area // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.10.004.
13. Fujima K., Achmad F., Shigihara Y., Mizutani N. Estimation of tsunami force acting on rectangular structures // Journal of Disaster Research. V. 4, N. 6. P. 404—409.
14. Ghosh D., Mittal A. K., Bhattacharyya S. K. Multiphase modeling of tsunami impact on building with openings // The Journal of Computational Multiphase Flows. 2016. V. 8, N. 2. P. 85—94.
15. Lindt J. W., Gupta R., Garcia R. A., Wilson J. Tsunami bore forces on a compliant residential building model // Engineering Structures. 2009. V. 31, N. 11. P. 2534—2539.
16. Дорфман А. А., Печенин С. А. Взаимодействие открытого потока с вертикальной призматической преградой // Распространение цунами и накат на берега. М.: Наука, 1981. С. 156—163.
17. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 618 с.
18. Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука, 1966. 448 с.
19. Звягин А. В., Смирнова М. Н. Движение тонкого тела вблизи свободной поверхности сжимаемой жидкости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1: Математика. Механика. 2009. № 2. С. 35—44.