

СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛН НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПРЕГРАДЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Рогачко С.И. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

У статті розглядається врахування впливу вітрових хвиль на циліндричні перегороди великого діаметру при розрахунку гідротехнічних споруд.

При расчетах гидротехнических сооружений на воздействие ветровых волн цилиндрические преграды большого диаметра занимают промежуточное положение между вертикальной стенкой и обтекаемыми преградами. В основном они представляют опорные части морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в условиях открытого моря, оболочки большого диаметра, используемые для строительства оградительных сооружений, причалов, отдельных палов и маяков.

Расчетные зависимости для определения волновой нагрузки на вертикальные стенки в настоящее время достаточно хорошо апробированы при проектировании оградительных сооружений и представлены в нормативном документе СНиП 2.06.04-82*/1/. При воздействии волн на такие сооружения происходит их полное отражение. Дифракция и обтекание волн возможно лишь у голов сооружений.

К обтекаемым преградам относят сооружения, поперечные размеры которых не превышают 0,1 длины расчетной волны. При этом полагают, что в процессе взаимодействия волн с такими преградами не происходит существенных изменений формы и кинематических характеристик волн. Данному вопросу было посвящено много работ советских ученых, таких как А.А. Каспарсон, Д.Д. Лаппо, Я.Г. Виленский, Б.Х. Глуховский, И.Ш. Халфин, В.П. Фуртенко, Ю.Н. Шестаков, В.В. Каплун, А.В. Соколов, Ю.Б. Майоров, С.С. Мищенко. К зарубежным исследованиям следует отнести работы Morison J.R., O'Brien M.P., Jonson J.W., Shaff S.A. Рекомендации по расчету волновых нагрузок на обтекаемые цилиндрические преграды, разработанные с учетом результатов работ перечисленных авторов, приведены также в СНиП 2.06.04-82*/1/.

Что касается цилиндрических преград большого диаметра ($\lambda > D > 0,2\lambda$), то при взаимодействии с ветровыми волнами преобладает явление дифракции волн, несмотря на то, что крайние участки преграды обтекаются волновыми потоками. В центральной же ее части (по отношению к фронту волны), в зависимости от отношения диаметра цилиндра к длине волны, будет происходить либо частичное, либо полное отражение волн (интерференция). Соотношение данных факторов также зависит от относительной глубины воды d/λ и относительного диаметра цилиндрической преграды D/λ . Рекомендации по расчету волновой нагрузки на цилиндрические преграды большого диаметра представлены в ведомственных нормах бывшего СССР ВСН 41.88/2/ с некоторыми ограничениями относительных параметров при их использовании.

В настоящей работе, при определении волновой нагрузки на цилиндрические преграды большого диаметра, рассмотрено влияние взволнованной поверхности воды над расчетным уровнем и произведено сравнение методов расчета с экспериментальными данными различных исследователей, в том числе выполненных лично автором.

В классическом решении задачи М.Д. Хаскинда /3/ о дифракции волн на вертикальном круговом цилиндре суммарная горизонтальная составляющая волновой нагрузки определяется путем интегрирования поля волнового давления по поверхности цилиндра от статического горизонта до дна. Поскольку явление дифракции приводит к существенному искажению профиля волны длиной $\sim \lambda$ у цилиндрических преград

большого диаметра - D , то возвышение взволнованной поверхности воды над статическим уровнем должно приводить к увеличению волновой нагрузки за счет дополнительного давления от уровня взволнованной поверхности.

В качестве первого приближения, при решении данной задачи, было предположено, что эпюра давления от линии пересечения взволнованной поверхности с контуром цилиндра до статического горизонта распределяется по гидростатическому закону (рис. 1).

В этом случае, если проинтегрировать по контуру цилиндра горизонтальную проекцию силы по эпюре, то получим дополнительную силу ΔF к горизонтальной равнодействующей волновой нагрузки на вертикальный круговой цилиндр относительно большого диаметра ($D/\lambda > 0,2$).

$$\Delta F = \frac{1}{2} \rho g h^2 D \int_0^{\pi} |\chi| \cos \alpha d\alpha \quad (1)$$

где χ - возвышение взволнованной поверхности воды над статическим горизонтом у цилиндрической преграды $/4/$; θ - угол в полярной системе координат; h – высота волны; ρ - плотность воды.

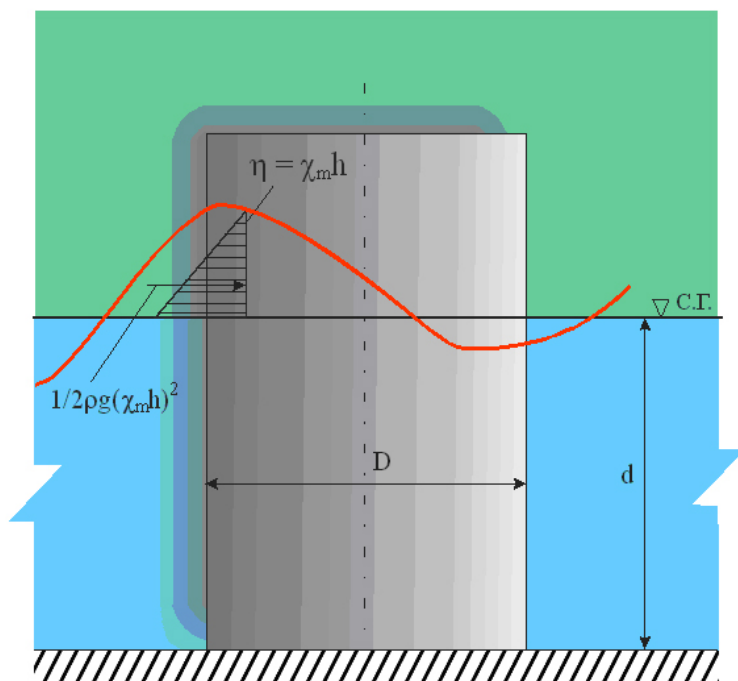


Рис. 1. Схема расчета дополнительной нагрузки на цилиндр от воздействия взволнованной поверхности воды

Поскольку горизонтальную равнодействующую волновой нагрузки F_D на вертикальный круговой цилиндр, пересекающий свободную поверхность воды, можно представить как $/4/$:

$$F_D = \frac{1}{8} \rho g h \pi C_i D^2 t h k d \quad (2)$$

где C_i - коэффициент, зависящий от D/λ , $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, d – глубина воды, то суммарная волновая нагрузка примет следующий вид

$$F = F_D + \Delta F \quad (3)$$

Разделив каждый член уравнения (3) на F_D , получим выражение для коэффициента k_n , учитывающего добавку к горизонтальной нагрузке F_D от возвышения свободной поверхности воды у цилиндрической преграды:

$$k_n = \frac{F}{F_D} = 1 + \frac{\Delta F}{F_D} \quad (4)$$

или

$$k_n = 1 + \frac{\frac{1}{2} \rho g h^2 D \int_0^\pi |\chi| \cos \theta d\theta}{\frac{1}{8} \rho g h \pi C_i D^2 t h k d} = 1 + \frac{4h/D}{C_i \pi t h k d} \int_0^\pi |\chi| \cos \theta d\theta = 1 + \frac{h/D}{t h k d} \cdot \alpha, \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{4}{\pi C_i} \int_0^\pi |\chi| \cos \theta d\theta.$

Значение α в зависимости от безразмерного параметра $\frac{\pi D}{\lambda}$ представлены в таблице 1, а его графическая интерпретация на рис. 2

Таблица 1

Значения α в зависимости от безразмерного параметра $\pi D/\lambda$

$\pi D/\lambda$	0,589	0,673	0,857	1,178	1,208	1,571	1,885	2,356
α	0,321	0,404	0,573	0,804	0,823	1,084	1,447	1,936

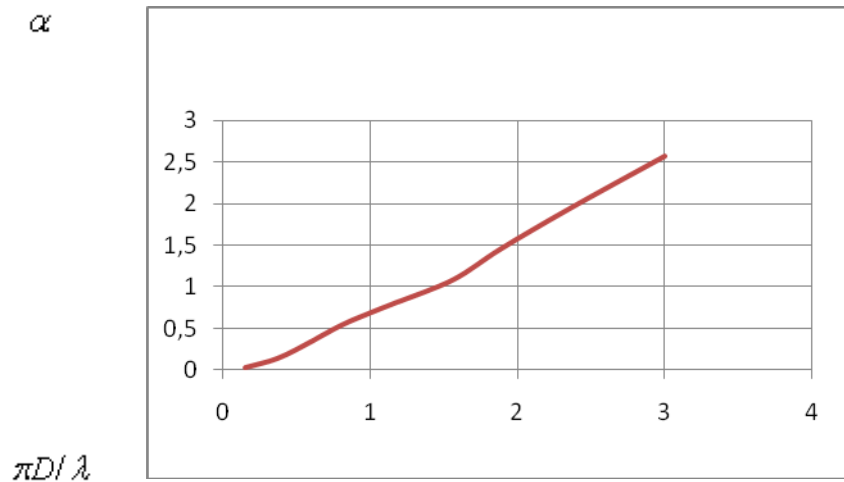


Рис. 2. График зависимости значений α от безразмерного параметра $\pi D/\lambda$

Таким образом, благодаря данному решению стало возможным осуществить коррекцию величины волновой нагрузки на морские гидротехнические сооружения, опорные части которых представлены цилиндрическими преградами большого диаметра.

$$\frac{\pi D}{\lambda}$$

В настоящей работе представлено сравнение рассчитанных значений волновых нагрузок по изложенной выше методике и по действующим нормативным документам /1,2/, с экспериментальными значениями, полученными автором, а также другими исследователями в широком диапазоне определяющих параметров.

Расчетные и экспериментальные значения волновых нагрузок для последующего графического сравнения приведены к безразмерному виду в соответствии с нижеследующим выражением:

$$F' = \frac{F}{\rho \cdot g \cdot (h/2) \cdot b^2 \cdot \tanh(k \cdot d)} \quad (6)$$

в зависимости от $\pi D/\lambda$, где F – значения волновой нагрузки; b – радиус цилиндрической преграды ($D/2$).

Результаты сравнения представлены на рис.3. Расчетные значения волновой нагрузки по рекомендациям СНиП 2.06.04-82* /1/ и ВСН 41.88 /2/ определялись как для условий глубокой воды, так и для относительного мелководья (кривые 1; 1' и 2'; 2 соответственно на рис. 3). Кривая 1 была построена в соответствии с рекомендациями /1/ для глубокой воды при $d/\lambda \geq 0,5$ с использованием опытных параметров волн для цилиндрических преград диаметром 0,13; 0,25 и 0,35 м. Дифракционный параметр находился в пределах $0,14 \leq \pi D/\lambda \leq 0,9$, а крутизна волн – $0,02 \leq h/\lambda \leq 0,01$. С целью анализа применимости рекомендаций СНиП 2.06.04-82* /1/ эта кривая была продлена до предельных для этих норм значений $\pi D/\lambda = 1,2$ при $h/\lambda = 1/40$. Кривая 1' построена в соответствии с рекомендациями /1/ для условий относительного мелководья ($d/\lambda = 0,15$) при $0,3 \leq \pi D/\lambda \leq 1,2$ и $h/\lambda = 0,1$. Следует отметить, что выбранное значение относительной глубины d/λ фактически является предельным для данного нормативного документа. Это утверждение относится и к принятой в расчетах крутизне волны h/λ .

Представленная на рис. 3 кривая 2 построена в соответствии с рекомендациями /2/ с использованием параметров волн, зарегистрированных в опытах. С целью анализа применимости рекомендаций ведомственных норм /2/, была построена и расчетная зависимость 2', которая соответствует применимости этих норм на глубокой воде. При этом дифракционный параметр находился в пределах $1,0 \leq \pi D/\lambda \leq 1,5$, а крутизна волн – $0,03 \leq h/\lambda \leq 0,04$.

На этом же рис.3 представлена расчетная зависимость 3, соответствующая концепции теории дифракции волн. При ее расчете были использованы опытные значения параметров волн. Следует отметить, что построение кривой 3 в интервале $0,9 \leq \pi D/\lambda \leq 1,5$ проводилось при следующих безразмерных параметрах: $d/\lambda \geq 0,5$; $0,03 \leq h/\lambda \leq 0,04$. Учет возвышения гребня волны по контуру цилиндрической преграды при использовании теории дифракции приводит к увеличению волновой нагрузки и соответствующему смещению расчетной зависимости 3' вверх.

В работе Мас Саму, R.C. и Fuchs, R.A. /5/ эксперименты проводились, как условиях глубокой воды, так и относительного мелководья, а в работе О.А. Гайдука /6/ - в условиях мелководья при $0,1 \leq d/\lambda \leq 0,3$ и $0,04 \leq h/\lambda \leq 0,11$.

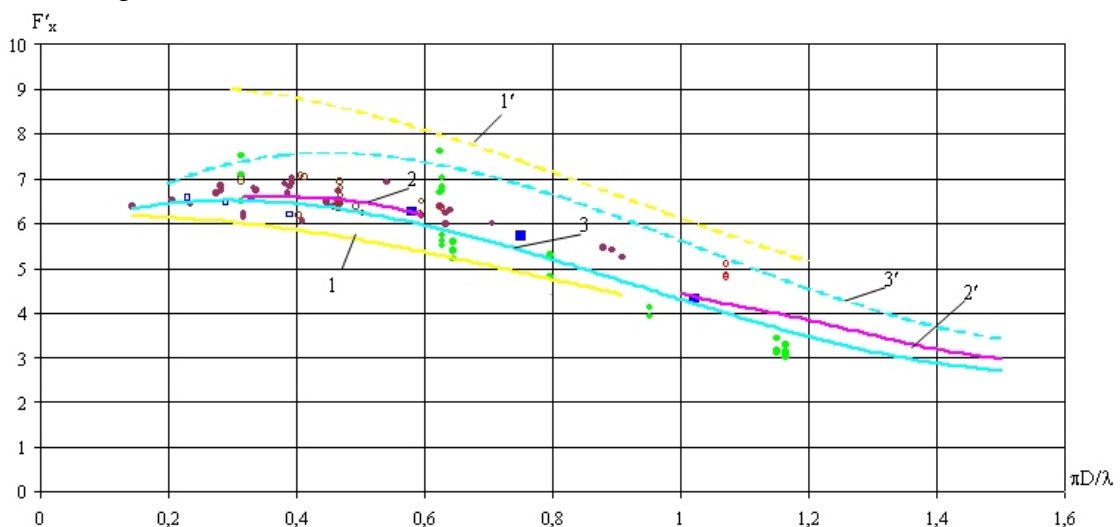


Рис. 3. Сравнение опытных и расчетных значений волновой нагрузки на цилиндрические преграды.

- - экспериментальные данные Гайдука О.А./6/ (относительное мелководье); 1 - СНиП /1/ (глубокая вода);
- - экспериментальные данные автора (глубокая вода); 1' - СНиП /1/ (относительное мелководье);
- - экспериментальные данные автора (относительное мелководье); 2 - ВСН /2/ (относительное мелководье);
- - MacCamy R.C. и Fuchs R.A./5/ (глубокая вода); 2' - ВСН /2/ (глубокая вода);
- - MacCamy R.C. и Fuchs R.A. (относительное мелководье); 3 - дифракция /3/; 3' - дифракция /3/ с ΔF .

Сравнение опытных и расчетных значений волновой нагрузки на модели цилиндрических преград показало, что расчетная зависимость 1 по рекомендациям СНиП 2.06.04-82* /1/ для глубокой воды находится на нижней границе поля экспериментальных точек. Можно отметить, что на глубокой воде использование рекомендаций /1/ приводит к однозначному занижению волновой нагрузки в исследованном диапазоне. С увеличением дифракционного параметра до 1.2 зависимость 1 стремится к расчетной зависимости 3. Аналогичная зависимость в условиях мелководья (кривая 1') смещается вверх и значительно превышает верхнюю границу поля всех экспериментальных точек. Причем наибольшие расхождения наблюдаются при $0,3 \leq \pi D/\lambda \leq 0,5$ и $h/\lambda \rightarrow 0,1$. Это связано с трансформацией профиля волны на относительном мелководье и крутизной волн. Таким образом, применение расчетных зависимостей всероссийских норм /1/ для определения волновой нагрузки на цилиндрические преграды больших диаметров на глубокой воде приводит к ее занижению, а в условиях относительного мелководья к завышению.

Сравнение опытных значений волновой нагрузки с расчетными по рекомендациям ведомственных норм /2/ (зависимость 2), показало удовлетворительное совпадение результатов в условиях относительного мелководья. Следует отметить, что зависимость 2 практически совпадает с расчетом, основанным на дифракционной теории (кривая 3). Что касается условий глубокой воды, то в соответствии с указаниями норм /2/ относительно их применимости ($D/\lambda > 0,4$ и $d/\lambda > 0,175$), представленная на рис.3 кривая 2' также тяготеет к зависимости 3.

Выводы

Анализ сопоставления опытных и расчетных значений волновой нагрузки показал, что расчетные зависимости, основанные на теории дифракции волн на цилиндрах большого диаметра, справедливы для различных глубин. Представленные на рис.3 опытные значения волновых нагрузок автора и других исследователей наилучшим образом согласуются с зависимостью 3. Тем не менее, кривая 3' учитывающая возвышение свободной поверхности по контуру цилиндрической преграды, является верхней границей поля всех экспериментальных точек. По этой причине, в качестве расчетной зависимости для определения волновых нагрузок на цилиндрические преграды большого диаметра может быть рекомендовано к использованию в проектной практике выражение, основанное на теории дифракции с учетом влияния возвышения свободной поверхности по контуру цилиндрической преграды в соответствии с выражениями (3), (4) и (5).

Summary

In article is described the calculation of hydrotechnical structures by putting into account the influence of the wind waves on cylinder bars with large diameters.

Литература

1. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) М. 1995.
2. ВСН 41.88. Проектирование ледостойких стационарных платформ. Миннефтепром СССР, М. 1988.
3. Хаскинд М.Д. Дифракция бегущих волн вокруг вертикальной преграды в тяжелой жидкости. Известия АН СССР, ОТН, М, 1957.
4. Бухтоярова М.В. "Взаимодействие гравитационных волн с опорами гидротехнических сооружений в виде вертикальных цилиндров большого диаметра." - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. МИСИ, 1981.
5. MacCamy R.C. and Fuchs R.A. Wave forces on piles: a diffraction theory. – US Army Corps of Eng. Techn. Memorandum, Washington, Dec., 1954, No. 69, p.17.
6. Исследовать нагрузки от волн на опорные части ледостойких платформ различных типов, проектируемых для о. Сахалин. Отчет о НИР ОНИЛ МНГС, МИСИ, М., 1987.