

С.Ю.Михайличенко, Е.В.Иванча

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН
С ОДИНОЧНЫМ ВОЛНОЛОМОМ**

Проведено исследование взаимодействия поверхностных гравитационных волн с волноломом в виде вертикальной стенки, который расположен в центре модельного бассейна переменной глубины и выступает в роли берегозащитного сооружения. Выполнено шесть численных экспериментов с разным расстоянием от гребня волнолома до уровня невозмущенной поверхности жидкости. Показано, что при взаимодействии поверхностных волн с волноломом во всех численных экспериментах происходит трансформация волнового поля с формированием в бассейне зон как ослабленного, так и усиленного волнения. Рассчитаны величины коэффициента трансформации волн и осредненных по глубине орбитальных скоростей жидкости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *негидростатическая модель SWASH, поверхностные волны, волнолом, высоты волн, коэффициент трансформации, осредненные по глубине орбитальные скорости жидкости*

Введение. Известно, что наиболее интенсивную нагрузку на береговую зону оказывает поверхностное волнение, которое может вызывать размыв берегов и затопление прибрежных районов, что приводит к значительному материальному ущербу. Поэтому защита берегов от разрушительного волнового воздействия остается одной из наиболее актуальных задач сегодняшнего дня. Одним из наиболее распространенных в мировой практике способов защиты побережья от интенсивного поверхностного волнения является строительство волноломов. Исследованию взаимодействия поверхностных волн с волноломами посвящено значительное число научных трудов. В работах [1 – 5] рассматривались двухмерные в вертикальной плоскости задачи эволюционной динамики поверхностных волн при их взаимодействии с препятствиями различной формы, проницаемости и высоты.

В данной работе методом численного моделирования исследовалось взаимодействие монохроматичных гравитационных волн с берегозащитным сооружением в виде вертикальной стенки в модельном бассейне переменной глубины. Расчеты проводились с использованием негидростатической модели *SWASH*, позволяющей проводить моделирование различных нестационарных гидродинамических процессов с быстро изменяющимися потоками, таких как затопление берегов в результате прорыва дамбы или наката цунами, приливов, ветровых нагонов, а также трансформации волн в прибойной зоне [6]. В работах [7 – 9] представлен ряд численных экспериментов, протестированных на лабораторных данных, которые подтверждают эффективность модели *SWASH* при моделировании трансформации волн в приурезовой зоне и при взаимодействии с вертикальной стенкой.

Математическая постановка задачи. Основу гидродинамической модели *SWASH* составляют нелинейные уравнения мелкой воды, включающие слагаемое с негидростатическим давлением [7]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial \pi_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \pi_{xy}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial \pi_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \pi_{yy}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (4)$$

где t – время; x, y, z – декартовы координаты, ось z направлена вверх; $\zeta(x, y, t)$ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня; $h = d + \zeta$ – полная глубина, равная сумме уровня свободной поверхности и глубины при невозмущенном состоянии жидкости; u, v – компоненты вектора скорости течения; $q(x, y, z, t)$ – негидростатическая добавка к давлению; g – ускорение свободного падения; c_f – коэффициент донного трения; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ – компоненты тензора горизонтальных турбулентных напряжений; ν_t – коэффициент турбулентной вязкости.

Коэффициент донного трения рассчитывался по формуле Маннинга:

$$c_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}, \quad (5)$$

где n – параметр шероховатости, $n = 0,019 \text{ м}^{-1/3} \cdot \text{с}$ [6].

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости рассчитывался по гипотезе Прандтля [10]:

$$\nu_t = l_m^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2}, \quad (6)$$

где l_m – длина перемешивания, которая пропорциональна высоте волны.

Численные эксперименты проводились в модельном бассейне квадратной формы. Размер бассейна $L = 600$ м. Первые 50 м мористой части бассейна имеют глубину 10 м. На следующем участке шириной 100 м глубина линейно уменьшается до 5 м и в дальнейшем не меняется. В центре бассейна располагается волнолом в виде вертикальной стенки длиной 200 м и шириной 10 м. В численных экспериментах расстояние от уровня невозмущенной поверхности воды до гребня волнолома менялось от $-2,5$ до $1,5$ м. Использовалась прямоугольная сетка с шагом по пространственным координатам $\Delta x = \Delta y = 1,0$ м. Шаг интегрирования по времени $\Delta t = 0,05$ с.

На глубоководной границе в качестве граничных условий задавался синусоидальный профиль входящих монохроматических волн и начальное значение осредненной по глубине скорости жидкости:

$$\zeta_b = a_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad u_b = \sqrt{\frac{g}{h}}(2\zeta_b - \zeta) \quad \text{при } x = 0, \quad (7)$$

где a_0 – начальная амплитуда входящей волны; T – начальный период входящей волны; ζ_b – отклонение свободной поверхности жидкости на глубоководной границе.

На остальных жидких границах расчетной области задавались условия свободного прохождения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = L, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = 0 \text{ и } y = L. \quad (9)$$

Результаты численных экспериментов. Для анализа влияния расстояния между гребнем волнолома и невозмущенной свободной поверхностью воды Δh на высоты волн было проведено шесть численных экспериментов (табл.1). В первых двух экспериментах вершина волнолома выступала над поверхностью воды, в остальных четырех экспериментах была заглублена. Расчеты проводились по следующему сценарию. В начальный момент времени ($t = 0$) вода в бассейне находится в состоянии покоя. При $t > 0$ в бассейн через глубоководную границу ($x = 0$) входит монохроматическая волна с высотой $H_{w0} = 1,5$ м и периодом $T = 5,0$ с. Волна распространяется в положительном направлении оси x к противоположной границе бассейна ($x = L$). Моделируемый временной интервал составлял 80 с. При больших значениях временного интервала волна, отраженная от препятствия, успевает вернуться к глубоководной границе, где накладывается на входящую волну, приводя к ее деформации.

За интервал времени $t = 80$ с волна проходит расстояние 450 – 470 м от глубоководной границы бассейна. Процесс ее распространения можно разделить на три фазы: приближение волны к препятствию, взаимодействие с волноломом и дальнейшее ее прохождение за волнолом с выходом через жидкие границы. Характерный пример различных фаз распространения волны в эксперименте 2 показан на рис.1.

Волна, распространяясь в части бассейна с переменной глубиной, сохраняет свою регулярность. Однако высота волны уменьшается с 1,5 до 0,7 – 0,8 м вследствие диссипативных эффектов (рис.1, а). При взаимодействии с волноломом часть волновой энергии отражается от препятствия и распространяется в обратном направлении в виде отраженных волн, что приводит к искажению синусоидального профиля волны (рис.1, б). Остальная энергия в виде проходящих волн проникает за волнолом, где структура волнового поля

Т а б л и ц а 1. Варианты численных экспериментов.

номер эксперимента	1	2	3	4	5	6
расстояние от невозмущенной свободной поверхности жидкости до гребня волнолома Δh , м	1,5	0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-2,5

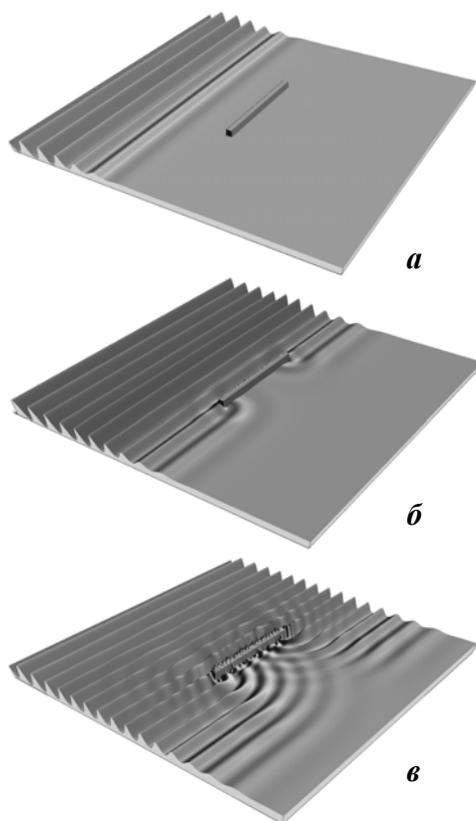


Рис. 1. Поле волн в эксперименте 2 в моменты времени $t = 30$ с (а), $t = 54$ с (б) и $t = 80$ с (в).

На рис.2 приведены величины коэффициента трансформации волн для случая, когда волнолом возвышается над свободной поверхностью (рис.2, а), и для случая, когда волнолом заглублен (рис.2, б). Для мористой части бассейна характерно постепенное уменьшение высот волн. Здесь величины коэффициента трансформации снижаются от $K_{trs} = 0,85 - 0,95$ вблизи глубоководной границы до $K_{trs} = 0,5 - 0,8$ на расстоянии от 150 до 100 м от препятствия. В случаях, когда волнолом выступает над водой, вследствие взаимного наложения подходящей волны и отраженных волн, перед ним формируется зона интенсификации волнового поля. Здесь коэффициент трансформации возрастает до $K_{trs} = 1,05 - 1,25$, т.е. высоты волн превосходят начальную высоту волны (рис.2, а). В случаях с заглубленным волноломом области усиления волн не прослеживаются. Непосредственно вблизи от волнолома $K_{trs} = 0,75 - 0,9$ (рис.2, б).

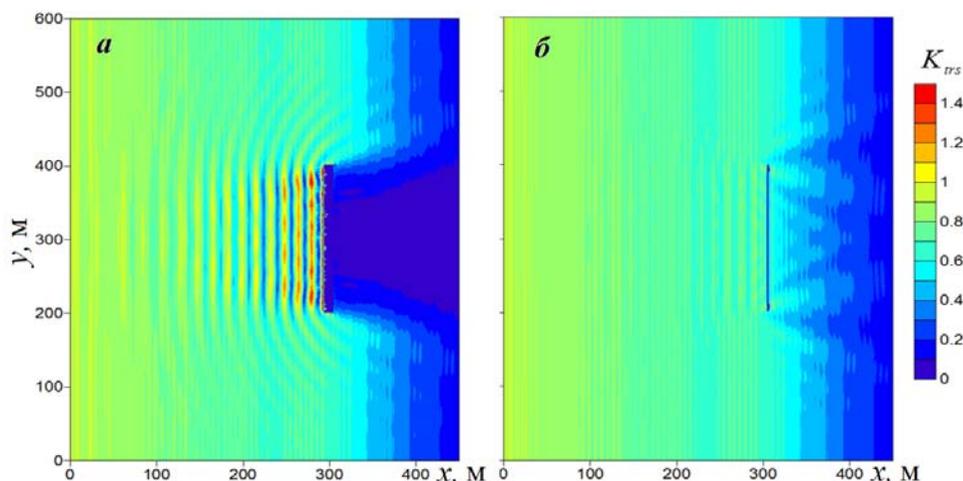
Во всех случаях за волноломом формируется зона ослабления. Максимальное ослабление волн характерно для ситуаций с волноломом, гребень которого расположен выше уровня свободной поверхности. В зоне волновой тени преобладают волны с высотами от $0,05 - 0,12$ м ($K_{trs} = 0,03 - 0,08$) для случая, когда гребень волнолома выше уровня невозмущенной поверх-

определяется совокупностью двух факторов: интерференцией волн и локальными эффектами, обусловленными перекатом и последующим обрушением волн (рис.1, в). Эксперименты показали, что в области шириной 150 – 200 м за волноломом происходит существенное ослабление набегающей волны.

Оценка эффективности ослабляющих свойств волнолома. Для оценки влияния препятствия на волновое поле был рассчитан коэффициент трансформации волнения в виде отношения высоты волны в заданной точке к высоте входящей в бассейн волны:

$$K_{trs} = \frac{H_w}{H_{w0}}. \quad (6)$$

Высоты волн в точке расчетной области определялись как разница между соседними локальными максимумами и минимумами возвышений свободной поверхности. Для анализа были взяты высоты волн, соответствующие временному интервалу, предшествующему моменту времени $t = 80$ с.



Р и с . 2 . Величины коэффициента трансформации волн в эксперименте 1 (а) и эксперименте 6 (б).

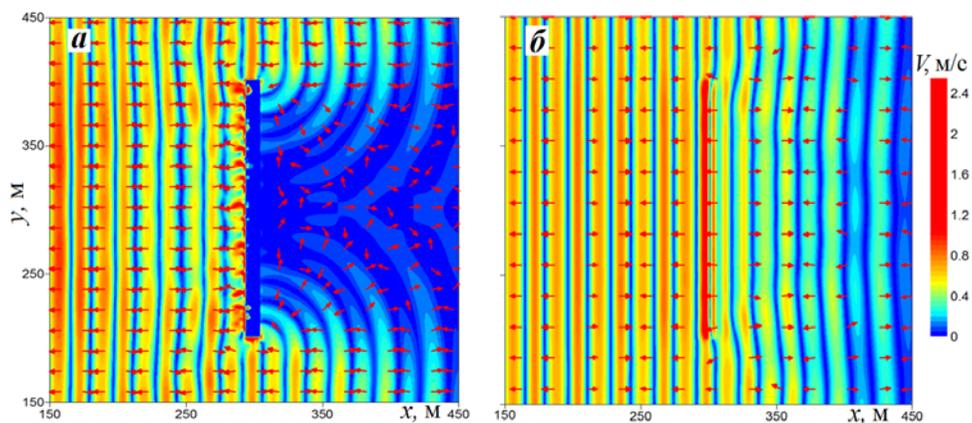
ности на 0,5 м, до 0,02 – 0,05 м ($K_{trs} = 0,014 – 0,030$) для случая, когда высота волнолома над невозмущенной поверхностью составляет 1,5 м (рис.2, а). Для вариантов с заглубленным волноломом ослабление интенсивности волн на порядок меньше ($K_{trs} = 0,1 – 0,5$) (рис.2, б).

Анализ сравнения полей высот волн в зависимости от расстояния от невозмущенной поверхности жидкости до гребня волнолома показал, что в условиях проведенных численных экспериментов уменьшение высоты волнолома на каждые 0,5 м приводит к возрастанию высот волн в области, расположенной непосредственно за препятствием, на 0,15 – 0,25 м.

Поле волновых скоростей. Была проанализирована структура поля осредненных по глубине орбитальных скоростей жидкости. Анализ результатов численных экспериментов показал, что при взаимодействии волны с волноломом структура поля существенно меняется только в области, расположенной сразу за волноломом. На рис.3 показаны величины и направления векторов скоростей в экспериментах 1 и 6 при $t = 80$ с. Стрелками показаны направления векторов, величины отражены с помощью цветового градиента.

Как видно, когда гребень волнолома заглублен на 2,5 м, в области, расположенной за гидротехническим сооружением, вектора волновых скоростей в основном параллельны оси x , за исключением небольших областей вблизи концевых участков волнолома, а также на границах зоны ослабленного волнения на расстояниях от 150 до 200 м от волнолома (рис.3, б). По мере увеличения высоты волнолома вектора скоростей за препятствием все больше отклоняются от своего первоначального направления. Когда гребень волнолома выступает из воды, за волноломом формируются вихревые структуры (рис.3, а), вызванные огибанием волновым фронтом краев препятствия.

Анализ результатов численных расчетов показал заметное влияние волнолома на величины осредненных по глубине орбитальных скоростей жидкости. На входе в бассейн величины скоростей для всех вариантов высоты волнолома меняются в пределах от 0,05 до 0,55 – 0,65 м/с через каждые 12 – 15 м (рис.3).



Р и с . 3 . Величины и направления векторов осредненной по глубине орбитальной скорости жидкости в эксперименте 1 (а) и эксперименте 6 (б) при $t = 80$ с.

На расстоянии 80 – 100 м от волнолома скорости жидкости возрастают. В случаях, когда гребень волнолома заглублен на 2,5 и 2,0 м, они достигают значений 0,75 – 0,85 м/с. Еще бóльшими ($V = 0,9 – 1,0$ м/с) величины скоростей становятся при надводном расположении гребня.

В непосредственной близости к волнолому величины скоростей достигают своего максимума (1,5 – 1,8 м/с) вследствие наложения набегающих и отраженных волн. В области за волноломом скорости значительно меньше: $V = 0,35 – 0,45$ м/с в случаях, когда гребень волнолома заглублен на 2,0 – 2,5 м (рис.3, б), и $V = 0,05 – 0,08$ м/с при надводном положении гребня (рис.3, а).

Выводы. С использованием негидростатической модели *SWASH* проведено моделирование взаимодействия поверхностных гравитационных волн с одиночным волноломом, имеющим форму вертикальной стенки, расположенным в центре модельного бассейна переменной глубины. Было проведено шесть численных экспериментов, в которых варьировалась высота препятствия. Влияние берегозащитного сооружения на волновое поле оценивалось с помощью коэффициента трансформации K_{trs} , характеризующего отношение высоты волны в каждой точке расчетной области к высоте входящих в бассейн волн.

Анализ результатов расчета показал, что взаимодействие поверхностных волн с волноломом приводит к изменению пространственной структуры колебаний свободной поверхности и формированию в бассейне зон как ослабленного, так и усиленного волнения. Перед волноломом на расстоянии 100 – 150 м от препятствия формируется зона ослабления волн вследствие диссипативного влияния донного трения. Вблизи препятствия в случаях с надводным волноломом в результате наложения падающих и отраженных от гидротехнического сооружения волн происходит их усиление ($K_{trs} = 1,05 – 1,25$).

Во всех вариантах расчета за препятствием находится область, где волны существенно ослаблены. Наибольшее ослабление волн происходит в случаях, когда гребень волнолома расположен выше уровня свободной поверхности ($K_{trs} = 0,03 – 0,12$). В случаях, когда гребень волнолома был заглублен, ослабление менее существенно ($K_{trs} = 0,1 – 0,5$). В проведенных численных

экспериментах уменьшение высоты препятствия на каждые 0,5 м приводит к увеличению высот волн сразу за препятствием на 0,15 – 0,25 м.

Расчет осредненных по глубине орбитальных скоростей жидкости показал, что наличие волнолома меняет как их направления, так и величины. Максимальные величины скоростей наблюдаются непосредственно перед волноломом ($V = 1,5 - 1,8$ м/с). За волноломом скорости жидкости уменьшаются до 0,3 – 0,4 м/с для случаев с заглубленным гребнем и до 0,05 – 0,08 м/с в тех вариантах, где гребень волнолома находился выше уровня невозмущенной поверхности.

Полученные результаты можно рассматривать как оценочные, они будут использованы в дальнейших, более расширенных, исследованиях трансформации волнения в прибрежной области, а также взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями с использованием реальных входных данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и грид-технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mellink B.A.* Numerical and experimental research of wave interaction with a porous breakwater / Master's thesis. A basis for numerical modelling of the notional permeability P.– Netherlands: Delft University of Technology, 2012.– 106 p.
2. *Liang, B., Wu G., Liu F., Fan H., Li H.* Numerical study of wave transmission over double submerged breakwaters using non-hydrostatic wave model // *Oceanologia.* – 2015.– v.57.– P.308-317.
3. *Losada I.J., Lara J.L., Guancho R., Gonzalez-Ondina J.M.* Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters // *Coastal Engineering.*– 2008.– v.55.– P.47-62.
4. *Briganti R., Van der Meer J.W., Buccino M., Calabrese M.* Wave transmission behind low-crested structures // *Coastal Structures.*– 2003.– P.580-592.
5. *Lara J.L., Losada I.J., Guancho R.* Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model // *Ocean Engineering.*– 2008.– v.35.– P.1388-1400.
6. *SWASH User Manual / The SWASH team.*– Netherlands: Delft University of Technology, 2012.– v.1.10A.– 91 p.
7. *Zijlema M., Stelling G.S., Smit P.* SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // *Coastal Engineering.*– 2011.– v.58.– P.992-1012.
8. *Suzuki T., Verwaest T., Hassan W., Veale W., Reyns J., Trouw K., Troch P., Zijlema M.* The applicability of SWASH model for wave transformation and wave overtopping: A case study for the Flemish coast // 5th Intern. Conf. on Advanced Computational Methods in ENgineering (ACOMEN 2011), (Belgium, 14-17 November 2011).– Belgium, 2011.– P.1-10.
9. *Демченко Р.И.* Применение открытого кода SWASH для моделирования волновых полей и быстро изменяющихся потоков в прибрежной зоне и области наката волны // *Математичні машини і системи.*– 2013.– № 3.– С.131-141.
10. *Доронин Ю.П.* Физика океана.– Л.: Гидрометеониздат, 1978.– 294 с.

Материал поступил в редакцию 28.09.2017 г.
После доработки 1.11.2017 г.

S.Ju.Mihajlichenko, E.V.Ivanča

NUMERICAL SIMULATION OF INTERACTION OF SURFACE GRAVITATIONAL WAVES WITH A SINGLE BREAKWATER

The paper is dedicated to interaction of surface gravitational waves with a breakwater in the form of a vertical wall located in the center of a model basin of variable depth. The basin bottom relief schematically represents the coastal zone, the breakwater acts as a coast protection structure. Six numerical experiments were made with different distances from the crest of the breakwater to the level of the unperturbed liquid surface. It was shown that when surface waves interact with a breakwater in all numerical experiments, the wave field transforms and zones of both weakened and enhanced waves form in the basin. The values of wave transformation coefficient and orbital velocities of the fluid averaged over the depth were calculated.

KEYWORDS: non-hydrostatic SWASH model, surface waves, breakwater, wave heights, transformation coefficient, orbital velocities averaged over depth