

УДК 532 59

Р.И. ДЕМЧЕНКО*, П.В. ДИКИЙ*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИДОННОГО ДАВЛЕНИЯ И ЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА В ЗОНЕ ПРИБОЯ И НАКАТА ВОЛН НА БЕРЕГ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев, Украина

Анотація. За період останнього десятиріччя натурні та лабораторні дослідження транспорту намулів піску в напрямку берега підтверджують наявність додаткової сили, обумовленої горизонтальним градієнтом тиску води, що характеризується параметром Сліса, який разом із параметром Шилдса може служити критерієм початку миттєвого зміщення намулів. У представленій роботі на основі даних експериментів був проведений числовий аналіз динаміки хвилі типу солітон у прибережній зоні, долучивши оцінку параметра Сліса за допомогою моделі відкритого доступу SWASH.

Ключові слова: горизонтальний градієнт тиску, параметр Сліса, модель SWASH.

Аннотация. В течение последнего десятилетия натурные и лабораторные исследования транспорта песчаных баров к берегу подтверждают наличие дополнительной силы, обусловленной горизонтальным градиентом давления, характеризующимся параметром Слеса, который совместно с параметром Шилдса может служить критерием начала мгновенного движения седиментов. В настоящей работе на основе экспериментальных данных был проведен численный анализ динамики одиночной волны в прибрежной зоне, включая оценку параметра Слеса с помощью модели открытого доступа SWASH.

Ключевые слова: горизонтальный градиент давления, параметр Слеса, модель SWASH.

Abstract. For the last decade nature and laboratory researches on sandbars onshore migration confirm an additional force existence induced by horizontal pressure gradient characterized by Sleath parameter. The last one jointly with Shields parameter can serve as a criterion for incipient sediment moving. In the presented work numerical analysis of soliton dynamics based on experimental data was carried out in near-shore zone, including Sleath parameter estimation with a help of SWASH open access model.

Keywords: horizontal pressure gradient, Sleath parameter, SWASH model.

1. Введение

Зона наката после прохождения волнами зоны прибоья является ключевой для эволюции береговой линии, где встречается эрозия берега, и поперечной границей для океанических процессов, воздействующих на сушу. Так как волны и штормы реализуют большую часть своей энергии в этой зоне, прогнозирование с определенной точностью транспорта наносов в области береговой линии является важным моментом для берегоукрепительных проектов по уменьшению наводнений и планирования прибрежной инфраструктуры.

Как отмечено в работе D. Foster et al. [1], десятилетия наблюдений показали, что миграция в сторону моря песчаных дюн в прибойной зоне, вызванная большими штормовыми волнами, длится в течение от нескольких часов до суток. Берег восстанавливается более медленно (от недель до месяцев) в результате миграции дюн к берегу при умеренных волнах и малых средних течениях. При выходе на мелкую воду волны, распространяющиеся к берегу, принимают пилообразную форму в прибойной зоне и становятся асимметричными. Причем перед обрушением волновое ускорение достигает максимума

под волновыми гребнями, вызывая движение седиментов в фазе направления потока к берегу [2].

По своему характеру прибойная зона может быть определена с помощью числа Ириберина (например, [3]) $\xi = \beta / \sqrt{H_0 / L_0}$, где β – береговой уклон, H_0 , L_0 – высота и длина волны на глубокой воде. Число Ириберина $\xi < 0,5$ характеризует зону с обрушением типа рассыпания, а для $\xi > 0,5$ – типа буруна.

Лабораторные исследования [1], согласующиеся с теоретическими предположениями О. Мадсена [4] и Д. Слиса [5], показали, что седименты, находящиеся в покое под волновой ложбиной, мобилизуются во время уменьшения скорости следующего за вершиной волнового гребня. При этом в потоке наблюдаются образования взвешенных блоков частиц в течение интенсивного ослабления фазы движения волны к берегу. Эти наблюдения не согласуются с принятой теорией транспорта седиментов [6], предполагающей, что мгновенное движение основано на силе, приложенной придонным сдвиговым напряжением, но соответствуют теории, включающей дополнительную силу, обусловленную горизонтальным градиентом давления [4, 5].

В линейном приближении волновой теории в пограничном придонном слое лабораторных экспериментов [5] для монохроматической волны был определен параметр Слиса в виде

$$S = \frac{\rho U_0 \omega}{(\rho_s - \rho)g}, \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда скорости волны, ω – угловая частота.

В отличие от параметра Шилдса, параметр Слиса не зависит от размера частиц седиментов. Мгновенное движение и транспорт донных наносов, определяемые с помощью параметра Шилдса, представляют отношение мобилизующей силы, вызванной приложенным сдвиговым напряжением, к стабилизирующей силе гравитации [1]:

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd_{50}}, \quad (2)$$

где τ_b – сдвиговое напряжение, ρ_s – плотность седиментов, ρ – плотность воды, g – гравитационное ускорение, d_{50} – размер частиц. В пределе параметр Шилдса представляет вертикальный градиент сдвигового напряжения, приложенный к слою с толщиной, равной размеру частиц.

В работе [1] параметр Слиса обобщен в виде

$$S = \frac{-p_x}{(\rho_s - \rho)g} \quad (3)$$

и характеризуется отношением дестабилизирующей силы, приложенной горизонтальным градиентом давления к стабилизирующей силе гравитации.

Для мелкой воды горизонтальный градиент давления становится равным

$$-p_x = \rho u_t + \rho u_x, \quad (4)$$

где u – волновая скорость потока.

В приближении линейной теории мелкой воды

$$S(t) = \frac{\rho u_t}{(\rho_s - \rho)g}. \quad (5)$$

В работе [2] моделирование миграции песчаных баров к береговой линии было улучшено включением эмпирически определяемого ускорения в формулу потока седиментов.

Численная оценка параметра Шилдса и параметра Слиса, выполненная в [1] с помощью двумерной модели Навье – Стокса, осредненной по числу Рейнольдса (RANS), подтверждает существование транспорта седиментов, вызванное горизонтальным градиентом давления при предположении, что мгновенное движение возникает, когда сдвиговая составляющая и градиент давления действуют совместно, чтобы достичь некоторого порогового значения.

Экспериментальные исследования [7, 8], выполненные с помощью датчиков современного емкостного профиля концентрации седиментов на побережье с диссипативным уклоном 1/45 и средним размером частиц $d_{50} = 0,33\text{мм}$, показали доминирование воздействия сдвиговых напряжений над градиентами давления при их мобилизации. Учет параметра Слиса в этих экспериментах объясняет большее значение толщины сдвигового слоя во время фазы движения волн к берегу по сравнению с противоположной фазой, оставляя при этом альтернативное объяснение присутствием турбулентности, что требует дальнейшего исследования.

В работах [1, 7, 8] подчеркнута важность как локального ускорения u_t , так и адвективной составляющей uu_x для аппроксимации горизонтального градиента давления. Работа [9] представляет общую диагностику физических процессов, генерирующих импульсивные давления, воздействующие на гравийные побережья и сопровождаемые обрушением типа буруна, предполагая волновое воздействие в качестве ключевого механизма для увеличения мобилизации седиментов. При этом подчеркнута роль третьей составляющей uu_z общего ускорения как для образования градиента давления, так и для мобилизации седиментов во время шторма.

В работе [10], выполненной на основе лабораторных данных динамики волнового поля, было показано, что параметр Слиса может быть использован в качестве индикатора мобилизации седиментов.

Как отмечено в [12], модель, основанная на уравнениях RANS, способна детально моделировать динамику поверхностных волн при использовании метода объемов элементов жидкости (VOF), где каждый такой элемент совпадает с вычислительной ячейкой или является частью ее, обеспечивая поверхность контакта между воздухом и водой. При этом стоимость вычислений может стать относительно большой даже при малых масштабах применения.

Модели типа Буссинеска, применимые для береговой инженерии от слабо-нелинейных и слабодисперсионных до почти полностью дисперсионных и высокого порядка нелинейности [13–16, 19–21], с достаточной степенью точности описывают физические процессы волновой динамики в прибрежной зоне.

Негидростатические, осредненные по глубине модели используют метод разложения общего давления на гидростатическую и динамическую части для более простого получения волновой дисперсии. Этот метод применяется в работах [11, 20–21]. Такие модели являются альтернативными моделям типа Буссинеска и позволяют распространение волн от глубокой воды до мелкой, улучшая точность волновой дисперсии с увеличением числа вертикальных слоев, и в то же время, как и в случае для уравнений Буссинеска, повышая затраты вычислений. Как и модели типа Буссинеска, негидростатические модели используют представление возвышения свободной поверхности в виде единой линии тока жидкости.

В настоящей работе проведено сравнение негидростатической модели открытого доступа SWASH (v.1.10A) [11] и моделей типа Буссинеска при различных условиях обру-

шения на известных экспериментах по взаимодействию солитона с берегозащитными конструкциями типа вертикальной стенки, трансформации одиночной волны в прибрежной зоне на подводном рифе, а также сравнение численных результатов модели SWASH для градиентов горизонтального давления при накате на берег типичного профиля с экспериментальными данными работы [10] для оценки потенциально возможного начала движения седиментов.

1.1. Взаимодействие солитона с вертикальной стенкой при отсутствии обрушения

В этом разделе экспериментальные данные [22] и [23] по взаимодействию солитона с вертикальной стенкой сравниваются с результатами расчетов уравнения Серре – модели типа Буссинеска [17] и негидростатической модели SWASH [11].

Экспериментальный волновой лоток имеет длину $L_x = 12,8 м$, ширину $L_y = 0,77 м$ и глубину $h = 0,32 м$. При численных расчетах ось Ox направлена в сторону восточной границы, где находится вертикальная стенка, расчетная сетка имеет разрешение $dx = 0,05 м$. Начальный профиль солитона и его скорость в момент времени $t = t_0$ записаны в виде

$$\eta(0, x) = a \cosh^{-2} \left[\sqrt{\frac{3\alpha}{4(1+\alpha)}} \frac{x - x_0}{h} \right], \quad (6)$$

$$u(0, x) = \frac{\eta}{h} \sqrt{gh(1+\alpha)}, \quad (7)$$

где $\alpha = a/h$ и $x_0 = 0,3L_x$. Здесь a – амплитуда солитона, $\eta(x, t)$ – возвышение свободной поверхности. На западной границе задано условие свободного пропускания. При вычислениях были использованы однослойная и пятислойная версии модели SWASH.

Распределение максимального наката на вертикальную стенку в зависимости от амплитуды показано на рис. 1.

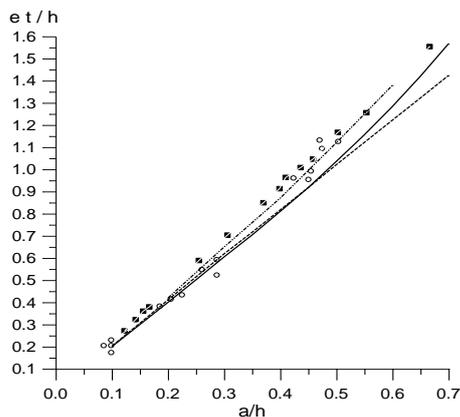


Рис. 1. Максимальное возвышение свободной поверхности у стенки

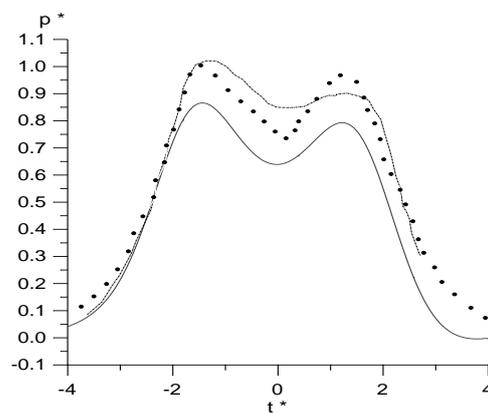


Рис. 2. Распределение давления по времени $t^* = t / \sqrt{g/h}$, $\alpha = 0,7$

Здесь экспериментальные данные (■) и (°) относятся соответственно к работам [22] и [23]. Численные результаты, обозначенные кривыми (—) и (---), соответствуют одно- и пятислойной модели SWASH. Штрихпунктирной линией (- . -) обозначены численные результаты для уравнения Серре – модели типа Буссинеска, полученные в [17], где были рассмотрены эти же эксперименты.

В работах [11, 21] общее гидродинамическое давление разделено на гидростатическую p_h и динамическую q компоненты:

$$p = p_h + q, \quad (8)$$

где по определению

$$\frac{\partial p_h}{\partial z} = -\rho g \quad \text{или} \quad p_h = p_a + \rho g(\eta - z), \quad (9)$$

и атмосферное давление p_a предполагается равным нулю.

Согласно [11], [21], негидростатическое давление $q(z)$ может быть записано в следующем виде:

$$q(z) = \frac{2}{3} \tilde{q} \left[1 - \left(\frac{z+h}{H} \right)^3 \right], \quad (10)$$

где $\int_{-h}^{\eta} q(z) dz = \frac{1}{2} H \tilde{q}$, $H = h + \eta$.

Численные результаты для давления на дне $z = -h$, полученные с помощью модели SWASH, позволяют получить значения в придонном слое для общего давления p_b и динамического q_b отдельно. Из соотношения (10) для $z = -h$ имеем:

$$q_b = (2/3) \tilde{q}. \quad (11)$$

Тогда для уровня $z = 0$ в случае однослойной модели мы можем получить, принимая во внимание (10) и (11), выражение для динамического давления в следующем виде:

$$q = q_b \left[1 - \left(\frac{h}{H} \right)^3 \right]. \quad (12)$$

Сравнение численных результатов общего давления $p^* = p / (\rho gh)$ на стенку с экспериментальными данными для уровня $z = 0$ и $a/h = 0,7$ представлено на рис. 2. Здесь (•••) – экспериментальные данные [23], (- . -) – численные значения, полученные с помощью модели типа Буссинеска [17], и (_ _ _) – численные результаты модели SWASH для однослойной версии этой модели. Более значительное расхождение с экспериментальными данными давления на стенке для модели SWASH (v.1.10A) по сравнению с уравнением Серре [17] может быть связано с отбрасыванием адвективных слагаемых вертикального ускорения в работах [11, 21].

1.2. Трансформация солитона на рифе

Чтобы обеспечить устойчивость численного процесса моделирования без добавления диссипативных членов при учете процесса обрушения, следующий алгоритм использован в работе [25] для уравнений типа Буссинеска. Основной идеей, предложенной в данной работе, является преобразование этих уравнений в нелинейное уравнение мелкой воды (NSWE) при условии, когда дисперсионные члены становятся пренебрежимо малы по сравнению с нелинейными. При этом уравнения типа Буссинеска записываются в консервативной гибридной Boussinesq/NSWE форме, включающей зависящую от времени дисперсионную составляющую [25, 26]. В каждой вычислительной ячейке проверяется параметр нелинейности $\varepsilon = a/h$. Если $\varepsilon < 0,8$, то решаются уравнения Буссинеска, в противном случае дисперсионные члены отключаются и решается уравнение NSWE. Численные

результаты, полученные в работах [26] и [27], дали хорошее совпадение с экспериментальными данными [28] по трансформации одиночной волны в прибрежной зоне при условии обрушения типа буруна и использовании этого алгоритма.

Результаты SWASH моделирования, представленные в [12], показывают, что при условиях обрушения типа рассыпания (береговой уклон $1/30$, число Ириберена $\xi < 0,5$) рассматриваемая негидростатическая модель с представлением возвышения свободной поверхности в виде однозначной функции может обеспечить с достаточной степенью точности определение статистических параметров волны в диссипативной зоне прибоя. В [12] был также использован переход к гидростатической аппроксимации аналогично [25], [26]. При этом волновой фронт предполагался гидростатическим (динамическое давление $q = 0$), если скорость изменения возвышения свободной поверхности достигала определенного порогового значения $\eta_t / \sqrt{gh} > \alpha_0$. Как отмечено в [12], предельное значение α_0 зависит от волновой динамики обрушения, что приводит к учету того или иного числа вертикальных слоев, используемых в модели SWASH.

В этом разделе проведено сравнение численных результатов двухслойной модели SWASH (v.1.10A) с результатами численного моделирования уравнения Нвогу, представленными в [26], на экспериментальных данных [28] в случае обрушения типа буруна при прохождении одиночной волны над выступающим подводным рифом.

Волновой экспериментальный лоток Университета шт. Орегон [28] имеет длину $L_x = 104\text{ м}$, ширину $L_y = 3,66\text{ м}$ и высоту $L_z = 4,57\text{ м}$ (рис. 3).

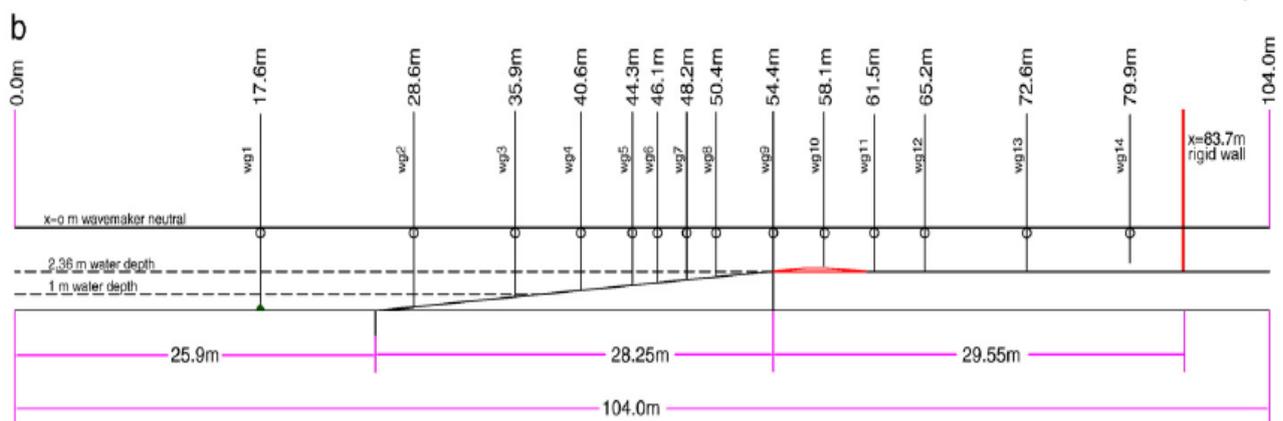


Рис. 3. Схема экспериментального лотка с рифом [28]

Лоток снабжен волнопродуктором для генерации волн типа солитона и использует емкостные и акустические приборы измерения волновых параметров. Экспериментальные данные возвышения свободной поверхности измерялись с помощью 14 волновых регистраторов, расположенных в сечениях, указанных на рис. 3.

В расчетной области $x \in [0, 83,7\text{ м}]$ батиметрия включает риф, передняя часть его имеет уклон $1/12$ и высоту хребта $0,2\text{ м}$, выступающая часть которого над водой равна $0,06\text{ м}$. Максимальная глубина воды $h = 2,5\text{ м}$. Граничные условия жесткой стенки были приняты на обоих концах расчетной области согласно условиям эксперимента.

В этом тесте относительная амплитуда волны $a/h = 0,3$, шероховатость дна принята равной $n = 0,012$. Начальные условия для возвышения свободной поверхности и скорости солитона в форме (6), (7) соответствуют $t_0 = 27,8\text{ с}$ ($t^* = t / \sqrt{g/h} = 55,03$) и $x_0 = 17,6\text{ м}$ в соответствии с экспериментальными данными [28, 27]. Регулярная сетка с шагом

$dx = 0,05 м$ была выбрана для расчета с помощью двухслойной модели SWASH, параметр обрушения $\alpha_0 = 0,6$.

Сравнение трансформации вычисленных относительных профилей возвышения свободной поверхности на рифе было проведено для тех же моментов времени, что и для эксперимента [28] в статье [26] для уравнения Нвогу (штрихпунктирная линия, рис. 4).

При переходе солитона через основание уклона в точке $x = 25,9 м$ (рис. 3) его симметричный в начальный момент времени профиль начинает наклоняться в сторону волнового фронта, образуя вертикальный профиль бора (рис. 4а). В лабораторном эксперименте волна начинает обрушаться около $t = 33,8 с$, развивая обрушение типа буруна на вершине хребта рифа, которое полностью завершается к моменту времени $t = 35 с$ [26].

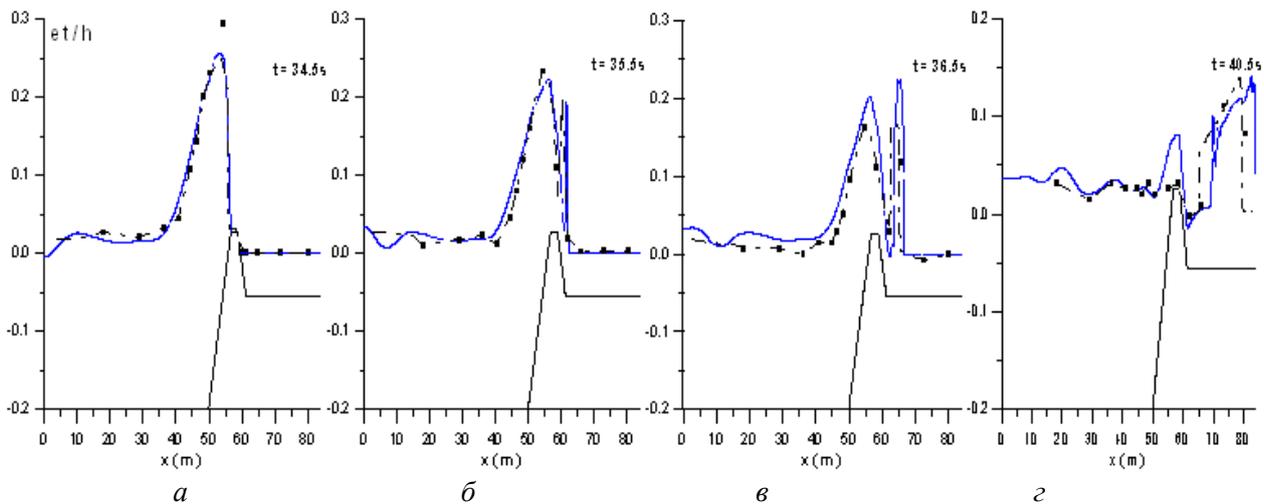


Рис. 4 а–в. Трансформация солитона на рифе с выступом над водой

Численные результаты модели SWASH показывают, что к моменту времени $t = 35,5 с$ разрушенная волна начинает спускаться по теневому склону хребта, генерируя в области этого склона гидравлический прыжок с последующим движением вниз бора (рис. 4 б, в, г).

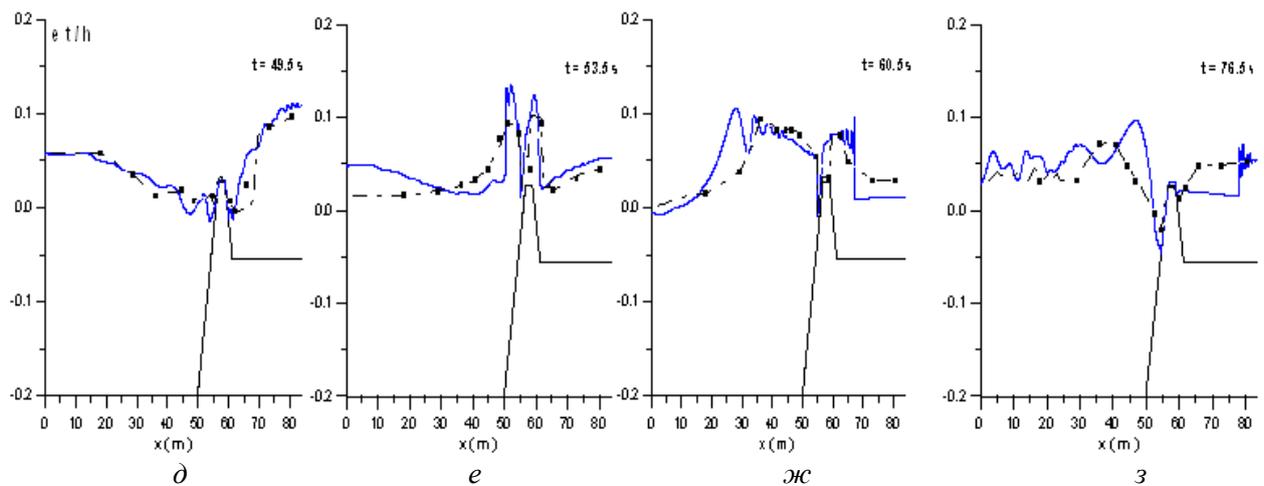


Рис. 4 д–ж. Трансформация солитона на рифе с выступом над водой

Для $t > 40,5c$ бор продолжает распространяться вниз по теневому склону, уменьшая относительное возвышение свободной поверхности на вершине рифа от 0,25 (рис. 4б), $t = 35,5c$ (рис. 4в), $t = 36,5c$ до 0,1 (рис. 4з), $t = 40,5c$ и 0,05 (рис. 4д), $t = 49,5c$.

В последующий момент времени стенка на правом конце рассматриваемой области отражает бор в противоположную сторону, который к моменту времени $t = 53,5c$ переливается через хребет рифа, образуя как гидравлический прыжок на переднем его склоне, распространяющийся в сторону левого конца расчетной области, так и бор, отраженный от теневого склона и движущийся вновь вниз по этому склону (рис. 4е), $t = 53,5c$ (рис. 4ж), $t = 60,5c$.

К моменту времени $t = 76,5c$ (рис. 4з) волны отражаются от обоих концов расчетной области в соответствии с граничными условиями в этих точках.

Как показали численные результаты, двухслойная модель SWASH в этом тесте дает более согласованные с экспериментом результаты в моменты времени до повторного переливания волны через хребет ($t = 53,5c$), уступая численным результатам уравнения Нвугу [26]. Можно предположить, что применение версии модели SWASH с учетом полного вертикального ускорения позволит улучшить результаты численного моделирования для условий обрушения типа буруна при естественной открытой границе в сторону моря для реальной мотивации применения этой модели.

2. Численная диагностика градиента давления в придонном слое, вызванного обрушением волны на берег типичного профиля

Имеющая разрешение по фазе и глубине модель распространения волн COBRAS была использована в работе [10] для тестирования дисперсии потока на экспериментальных данных в случае трансформации солитона в береговой зоне с «типичным» профилем (рис. 6). Для замыкания модели используется $k-\varepsilon$ схема, где k – турбулентная кинетическая энергия и ε – скорость диссипации турбулентности. Для определения свободной поверхности так же, как и в модели RANS, используется метод объемов элементов жидкости (VOF).

Все эксперименты были выполнены в Центре по прикладному исследованию побережья (Университет шт. Делавер), используя волновой лоток с высокоточным оборудованием. Лоток имеет общую длину 33м, при этом в эксперименте была использована длина $L_x = 22,6m$. Схема берегового откоса с переменным уклоном показана на рис. 5.

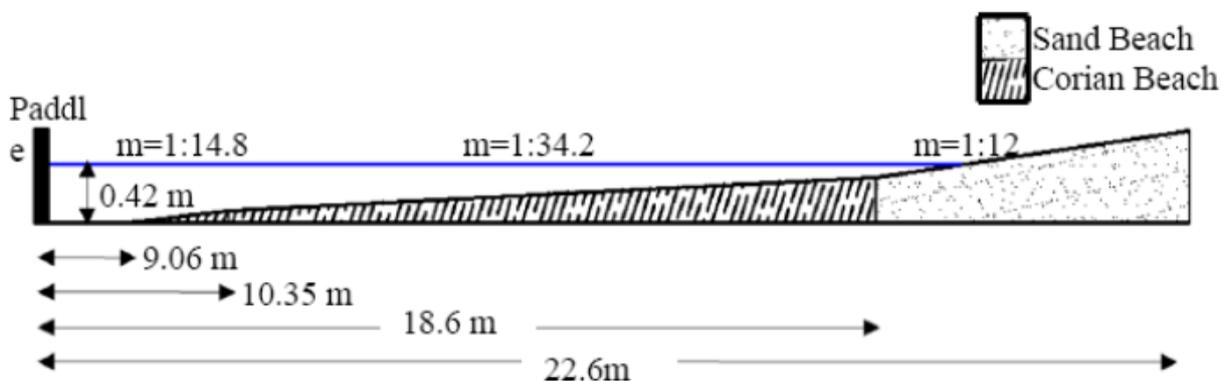


Рис. 5. Схема волнового лотка Центра прикладного исследования побережья [10]

Максимальная глубина воды лотка $h = 0,42\text{ м}$. Для экспериментов был выбран солитон, так как такой тип волн является достаточно сильным, чтобы вызвать транспорт седиментов внутри прибойной зоны и в зоне наката. Амплитуда волны была принята равной $a = 0,15\text{ м}$. В момент времени $t_0 = 6,45\text{ с}$ расположение солитона в расчетной области выберем соответствующим волновому датчику WG1, расположенному на расстоянии $x = 8,55\text{ м}$ от волнопродуктора ($x = 0$) [10]. Форма солитона и распределение его скорости имеют вид (6), (7).

Волновые датчики WG2 – WG5 и датчики давления PS1 – PS4 расположены, начиная от точки $x = 16,55\text{ м}$ до $x = 16,85\text{ м}$ на расстоянии $0,1\text{ м}$ друг от друга.

Осредненная по глубине (однослойная) версия модели SWASH (v.1.10A) и сеткой с шагом $dx = 0,005\text{ м}$ была использована для численных исследований. Сравнение результатов моделирования для возвышения свободной поверхности и общего придонного давления с экспериментальными данными показано соответственно на рис. 6 и рис. 7 в точке расположения волнового датчика WG2 и датчика давления PS1 ($x = 16,55\text{ м}$) в зоне обрушения. Следует отметить, что в эксперименте [10] точка обрушения волны соответствует $x_p = 16,1\text{ м}$ и совпадает с полученной при численном расчете с помощью модели SWASH.

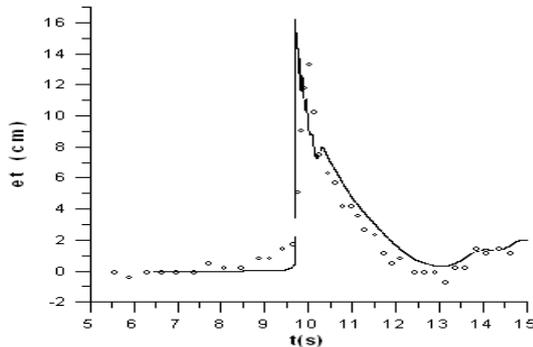


Рис. 6. Возвышение свободной поверхности

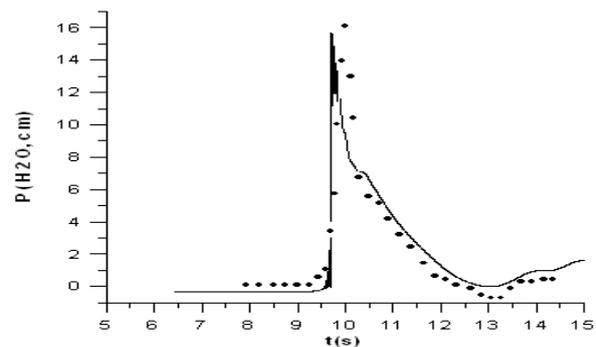


Рис. 7. Общее давление на дне

Единицы измерения относительного давления (вычтено гидростатическое давление, соответствующее начальному неподвижному уровню воды) представлены в см для более удобного сравнения с изменениями свободной поверхности. Экспериментальные данные ($^{\circ} \text{ } ^{\circ} \text{ } ^{\circ}$) соответствуют изменению уровня воды в точке WG2 ($x = 16,55\text{ м}$) (рис. 7), а ($\bullet\bullet\bullet$) – данным давления PS1 ($x = 16,55\text{ м}$) в придонном слое (рис. 8) [10] в этом же интервале времени. В точках расположения датчиков WG3 – WG5 и PS2 – PS4 имеем аналогичные результаты (здесь не приведены).

При движении волны к берегу существует значительная сила в этом направлении, вызванная горизонтальным градиентом придонного давления и способствующая вкладу переноса седиментов в этом направлении, индикатором которой является параметр Слиса [1]. В работе [10] для анализа придонного горизонтального градиента давления рассмотрена функция, аналогичная параметру Слиса, определенного по формуле (3), в следующем виде:

$$S_p = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (13)$$

Функция S_p так же, как и параметр Слиса, не зависит от плотности седиментов ρ_s и имеет противоположный ему знак.

На рис. 9 согласно работе [10] обозначено кружками (●●●) распределение градиентов горизонтального давления, полученных экспериментально в точках расположения датчиков давления. При этом лабораторные данные на рис. 8 *a–в* соответствуют разности показаний датчиков: *PS4, PS3* ($\delta x = 0,1 м$), *PS3, PS1* ($\delta x = 0,2 м$) и *PS4, PS1* ($\delta x = 0,3 м$).

Численные результаты показаны кривыми (...) (модель COBRAS, [10]) и (—) (модель SWASH).

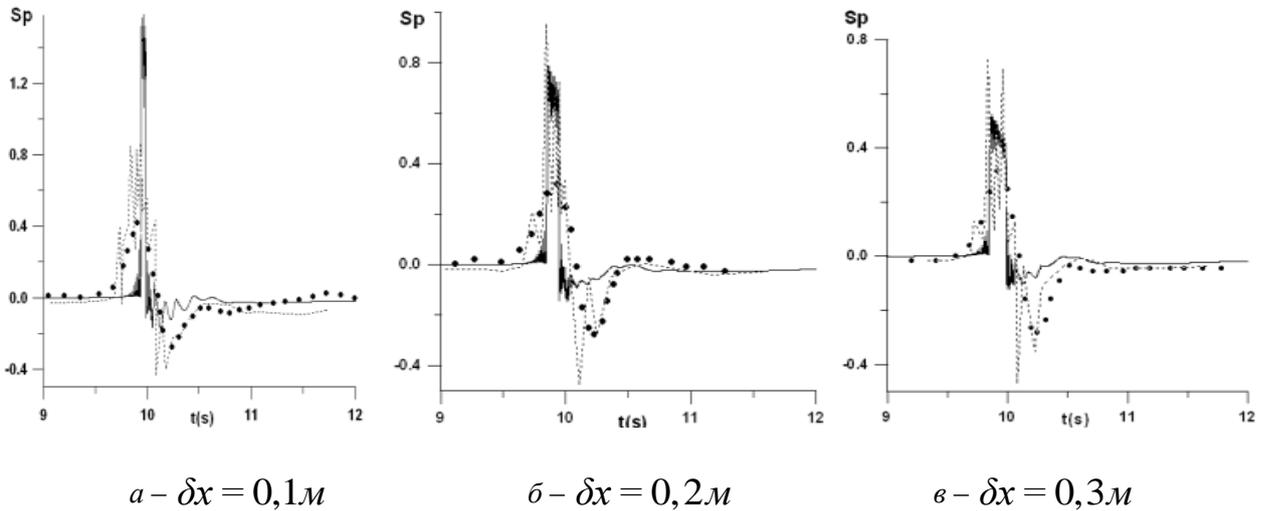


Рис. 8. Распределение горизонтального градиента давления (параметр *Sp*).

Сравнение численных и экспериментальных данных

Как видно из сравнения с численными результатами моделей и экспериментальными данными [10], изменение градиента давления в зоне обрушения, полученного с помощью модели SWASH, является более резким, а в области изменения с противоположным знаком значительно отличается от экспериментальных данных. Как отмечено в [29], градиент негидростатического давления на границе обрушения волн растет, предотвращая трансформацию формы волны в пилообразную, наблюдаемую в зоне прибоя. При этом одной из причин завышенного значения градиента давления и его резкого изменения в области обрушения является представление возвышения свободной поверхности в виде единой линии тока жидкости, что приводит к погрешности при переходе к гидростатическому режиму волнового распространения [29].

3. Заключение

Применение метода перехода к гидростатическому распределению давления, аналогичного для случая моделей типа Буссинеска и используемого в модели SWASH, показало эффективность этой как однослойной, так и многослойной модели на экспериментальных данных по накату одиночной волны на берег и трансформации ее на подводном рифе при условии обрушения типа буруна, а также при взаимодействии с вертикальной стенкой. Учет адвективных слагаемых вертикального ускорения, сохраняемых в моделях типа Буссинеска, позволит улучшить согласование с экспериментами.

Численные результаты, полученные моделью SWASH по данным эксперимента [10] наката одиночной волны на берег типичного профиля, подтверждают тот факт, что градиенты давления возрастают с уменьшением ускорения при движении волны к берегу. Однако завышенное значение градиента давления и резкое его изменение в зоне обрушения приводят к поиску дополнительных условий для градиента горизонтального давления в

момент перехода к гидростатическому режиму при использовании модели SWASH для оценки параметра Слиса с учетом плотности седиментов ρ_s .

Полученные оценки горизонтального градиента давления на подводном уклоне с помощью параметра S_p , аналогичного параметру Слиса [10], и выводы по экспериментальным данным в работах [1, 7–9] относительно параметра Слиса как меры горизонтального градиента давления, представляющего дополнительную силу, вызывающую транспорт седиментов при условии обрушения, предполагают последующие численные исследования с помощью моделирования задач морфодинамики с учетом этого параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Field evidence of pressure gradient induced incipient motion / D.L. Foster, A.J. Bowen, R.A. Holman [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111, C05004. – P. 1 – 8.
2. Hoefel F. Wave-induced sediment transport and sandbar migration / F. Hoefel, S. Elgar // *Science.* – 2003. – N 299. – P. 1885 – 1887.
3. Holthuijsen L.H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters* / Holthuijsen L.H. – Cambridge Univ. Press, 2007. – 387 p.
4. Madsen O.S. Stability of a sand bed under breaking waves / O.S. Madsen // *Proc. of 14th Conference on Coastal Engineering.* – New York, 1974. – P. 776 – 794.
5. Sleath J. Conditions for plug formation in oscillatory flow / J. Sleath // *Cont. Shelf Res.* – 1999. – Vol. 19, N 13. – P. 1,643 – 1,664.
6. Bagnold R. A. An approach to the sediment transport problem from general physics / R.A. Bagnold // *U.S. Geological Survey. Professional Paper Rep, 422-I.* – Washington, 1966. – 37 p.
7. Field measurements of sheet flow sediment transport in the swash zone / T. Lanckriet, J. Puleo, G. Maselink [et al.] // *International Conference on Coastal Engineering.* – Bath, UK, 2012. – Vol. 33. – 7 p.
8. Lanckriet T. Near-bed hydrodynamics and sediment transport in the swash zone. Thesis / Lanckriet T. – Newark: University of Delaware, 2014. – 154 p.
9. Diagnostic investigation of impulsive pressures induced by plunging breakers impinging on gravel beaches / A. Pedrozo-Acuña, A. Torres-Freyermuth, Q. Zou [et al.] // *Coastal Engineering.* – 2010. – Vol. 57. – P. 252 – 266.
10. Kidwell A. Pressure gradients in the inner surf and outer swash zone. A laboratory and numerical investigation. Thesis / Kidwell A. – Newark: University of Delaware, 2011. – 95 p.
11. Zijlema M. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters / M. Zijlema, G. Stelling, P. Smit // *Coastal Engineering.* – 2011. – Vol. 58. – P. 992 – 1012.
12. Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics / P. Smit, T. Janssen, L. Holthuijsen [et al.] // *Coastal Engineering.* – 2014. – Vol. 83. – P. 36 – 48.
13. Madsen P. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly varying bathymetry / P. Madsen, O. Sørensen // *Coast. Eng.* – 1992. – Vol. 18. – P. 183 – 204.
14. Nwogu O. An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation / O. Nwogu // *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.* – 1994. – Vol. 119. – P. 618 – 638.
15. Wei G. A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations / G. Wei, J. Kirby // *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.* – 1995. – Vol. 120. – P. 251 – 261.
16. Lynett P. A two-layer approach to water wave modeling / P. Lynett, P. Liu // *Proc. of the Royal Society of London.* – 2004. – Vol. 460. – P. 2637 – 2669.
17. Железняк М. И. Физико-математические модели наката цунами на берег / М.И. Железняк, Е.Н. Пелиновский // *Накат цунами на берег: сб. научн. тр. ИПФ АН СССР.* – Горький, 1985. – С. 8 – 33.
18. Демченко Р. И. Нелинейно-дисперсионная модель типа Буссинеска с улучшенной дисперсией / Р.И. Демченко, П.В. Дикий, М.И. Железняк // *II научно-практ. конф. с междунар. участием “Математическое и имитационное моделирование систем. МОДС '2007”*, (Киев, 25–29 июня 2007). – Киев: ИПММС НАНУ, 2007. – С. 23 – 26.

19. Демченко Р.И. Об уравнениях типа Буссинеска полностью нелинейных и одного порядка дисперсии: вывод и сравнительный анализ / Р.И. Демченко, П.В. Дикий // Математичні машини і системи. – 2009. – № 2. – С. 8 – 27.
20. Yamazaki Y. Depth-integrated, nonhydrostatic model for wave breaking and run-up / Y. Yamazaki, Z. Kowalik, K. Cheung // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2009. – Vol. 61, N 5. – P. 473 – 497.
21. Cui H. Improved efficiency of a non-hydrostatic, unstructured grid, finite volume model / H. Cui, J. Pietrzak, G. Stelling // Ocean Modelling. – 2012. – Vol. 54 – 55. – P. 55 – 67.
22. Maxworthy T. Experiment on collisions between solitary waves / T. Maxworthy // J Fluid Mech. – 1976. – Vol. 76. – P. 177 – 185.
23. Zagriadskaia N. Action of long waves on the vertical obstacle / N. Zagriadskaia, S. Ivanova // Izv VNIIG. – 1980. – Vol. 138. – P. 94 – 101.
24. Rijnsdorp D. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves under laboratory conditions / D. Rijnsdorp, P. Smit, M. Zijlema // Coastal Eng. – 2014. – Vol. 85. – P. 30 – 42.
25. Tonelli M. Hybrid finite-volume finite-difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations / M. Tonelli, M. Petti // Coast. Eng. – 2009. – Vol. 56. – P. 609 – 620.
26. Kazolea M. A well-balanced shock-capturing hybrid finite volume-finite difference numerical scheme for extended 1D Boussinesq models / M. Kazolea, A. Delis // Preprint submitted to Applied Numerical Mathematics. – 2013. – Vol. 67. – P. 167 – 186.
27. Roeber V. Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments / V. Roeber, K. Cheung // Coastal Engineering. – 2012. – Vol. 70. – P. 1 – 20.
28. Roeber V. Shock-capturing Boussinesq-type model for near shore wave processes / V. Roeber, K. Cheung, M. Kobayashi // Coast. Eng. – 2010. – Vol. 57. – P. 407 – 423.
29. Smit P. Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin / P. Smit, G. Stelling, M. Zijlema // Fifth International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering. – Delft, The Netherlands, 2011. – P. 1 – 10.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2015