

УДК 532.592

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНЫ С ПОДВОДНЫМ УСТУПОМ*

А. С. Котельникова^{1†}, В. И. Никишов¹, С. М. Сребнюк²

¹Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03057, Киев, Украина

[†]E-mail: kan5nas@gmail.com

²Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
Первомайский проспект, 24, 36011, Полтава, Украина

Получено 08.11.2016

В работе представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия поверхностных уединенных волн с прямоугольным уступом. Показано, что при переходе с глубокой воды на мелкую над препятствием происходит трансформация волны с ее разделением на отраженную и прошедшую волны. Получены оценки коэффициентов отражения и прохождения. Проведено сравнение результатов с известными аналитическими соотношениями и экспериментальными данными. Продемонстрирована зависимость коэффициентов прохождения и отражения не только от относительной высоты препятствия, но и от амплитуды падающей волны. Это наблюдение выходит за рамки оценок, полученных согласно линейной теории мелкой воды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уединенная волна, подводный уступ, коэффициенты отражения и прохождения

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование характеристик поверхностных уединенных волн, распространяющихся над подводными препятствиями, их отражение и прохождение имеет большое значение в инженерной практике при создании конструкций для защиты береговых сооружений от разрушительного волнового воздействия.

Как известно, уединенные волны достаточно часто наблюдаются в морских и речных условиях, например, волны цунами, длинные волны, генерируемые движущимися

*Посвящается светлой памяти нашего коллеги члена-корреспондента НАН Украины профессора Владимира Ивановича Никишова

в транскритическом режиме судами и др. В открытом океане благодаря относительно малым высотам и большим периодам подобного типа волны не представляют серьезной опасности. Однако при достижении мелководной области, когда глубина воды становится значительно меньше длины волны, начинается трансформация падающей волны. Резко уменьшается скорость распространения волны, передний волновой фронт притормаживается, энергия волны сосредотачивается на более коротком участке, и, как результат, существенно увеличивается амплитуда волны. Соответственно, увеличивается и влияние нелинейных эффектов, что может привести к потере устойчивости и дальнейшему разрушению волны. Дополнительные эффекты на процесс трансформации длинных волн могут создавать и особенности топографии донной поверхности.

Достаточно большое количество работ посвящено изучению взаимодействия уединенных волн с подводными препятствиями. Основное внимание авторов, как правило, фокусируется на процессах трансформации волны над препятствием в зависимости от амплитуды волны и геометрических параметров препятствия [1–8]. При этом используются различные методы исследований.

Комплексное изучение трансформации солитонов на донном уступе, включающее как аналитическую, так и вычислительную часть, выполнено в [1]. Теоретическая модель охватывает линейное потенциальное описание волновой трансформации на уступе и слабо нелинейную теорию длинных волн, основанную на уравнении Кортевега—де Вриза, для отраженных и прошедших волн вдали от уступа. Численное моделирование трансформации уединенной волны на подводном уступе выполнено в рамках расширенной 1D Буссинеск-подобной системы и полностью нелинейных и полностью дисперсионных 2D уравнений Навье—Стокса. Показано, что линейная теория мелкой воды точно описывает прохождение уединенной волны малой амплитуды через уступ с $h/H = 0.2 - 0.5$, где H — глубина воды в канале до уступа, h — глубина воды над уступом. Обнаружено, что амплитуды отраженных и прошедших уединенных волн практически равны. Разница составляет менее 5% для разных моделей.

Взаимодействие между уединенной волной, распространяющейся над горизонтальным дном и порогом, в рамках математической модели потенциального двумерного потока идеальной несжимаемой жидкости со свободной границей рассматривалось в [2]. Вычисления показали, что узкий порог слабо влияет на падающую волну малой амплитуды. В случае широкого порога падающая волна распадается на большое число прошедших волн.

В [3] исследования эволюции уединенной волны на шельфе с использованием численной модели, связывающей уравнения Навье—Стокса осредненные Рейнольдсом и $k-\epsilon$ турбулентную модель, показали, что процесс деления происходит как для неразрушающихся, так и разрушающихся уединенных волн. Отмечено также, что процесс генерации второго и третьего солитонов имеет разный характер для этих видов волн.

Деление уединенной волны над подводным препятствием также исследовалось в [4]. Численные результаты, основанные на усовершенствованных уравнениях Буссинеска, в которых корректно учтены эффекты нелинейности и дисперсии поверхностных волн, находятся в хорошем согласии с аналитическим решением, полученным из уравнения Кортевега—де Вриза на основании линейного приближения длинных волн вблизи подводного препятствия.

Немаловажную роль в оценке эффективности подводных препятствий играют коэф-

коэффициенты отражения и прохождения. Некоторые аспекты данного вопроса представлены в [1, 5–8].

Используя линейное приближение длинных волн, в [5] выведены аналитические решения для коэффициентов волнового отражения и прохождения над бесконечно длинным уступом. Показано, что коэффициенты зависят от отношения глубин, и для очень мелкой воды ($h/H \ll 1$) амплитуда прошедшей волны может вдвое превышать амплитуду падающей волны. Подобные аналитические решения для прямоугольного волнолома получены в [6].

Характеристики волновой трансформации в слагаемых волновых коэффициентов отражения, прохождения и диссипации для разных комбинаций длины и высоты препятствия численно исследовались в [7]. Выделены главные отличия между волнами, распространяющимися над порогом и над длинным препятствием. Установлено, что для относительно длинного препятствия, диссипация энергии может достигать 60% общей энергии. При этом диссипация энергии в большей степени способствует уменьшению коэффициентов прохождения и слабо влияет на коэффициенты отражения.

Численные и экспериментальные исследования трансформации уединенных волн над шельфом или отдельным препятствием представлены в [8]. Показано, что относительные амплитуды падающей или отраженной волны зависят от нормализованной амплитуды падающей волны.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия уединенной волны с подводным уступом, включая отражение и прохождение волны над препятствием.

Эксперименты проводились в волновом лотке длиной 16 м, шириной 0.3 м и высотой 0.7 м при глубинах воды 8, 11, 17 и 23.4 см. В одном конце лотка был установлен генератор уединенных волн, в другом — модель подводного препятствия типа “уступ”. Длина препятствия составляла 272 см, высота — 6 и 9 см, ширина препятствия соответствовала ширине волнового лотка. Характерные параметры исследования представлены на Рис. 1.

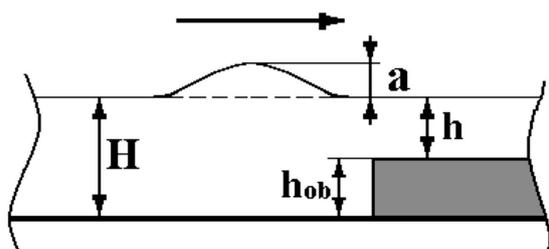


Рис. 1. Схема распространения уединенной волны над подводным уступом: a — амплитуда падающей волны; H — глубина воды в лотке; h — глубина воды над препятствием; $h_{об}$ — высота препятствия. Стрелка указывает направление распространения уединенной волны

разом, чтобы можно было создать цельную картину распространения и трансформации волн вдоль препятствия.

Детальное описание экспериментальной установки представлено в [9].

Регистрация деформации свободной поверхности при прохождении уединенной волны производилась протяженными емкостными датчиками, частично погруженными в воду. Для определения параметров падающей и отраженной волны четыре датчика были установлены до препятствия, два датчика, установленные над препятствием, фиксировали прошедшую волну.

Взаимодействие уединенной волны с подводным уступом также регистрировалось с помощью цифровой видеокамеры. Видеокамера устанавливалась таким образом,

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Было обнаружено, что генерируемые в эксперименте волны являются типичными нелинейными уединенными волнами, теоретический профиль которых описывается выражением [10]:

$$\eta = a \operatorname{sech}^2 \left[\left(\frac{3a}{4H^3} \right)^{1/2} x \right], \quad (1)$$

где a — амплитуда уединенной волны; H — глубина воды в лотке.

При распространении в каналах постоянной глубины H форма и скорость длинных волн меняется слабо. Их движение вдоль канала сопровождается лишь незначительным уменьшением в амплитуде, обусловленным действием диссипативных процессов за счет трения о стенки и дно лотка.

Наличие подводного препятствия на дне канала может оказывать существенное влияние на изменение характеристик распространяющихся волн. Большое значение играет амплитуда падающей волны, глубина воды в канале и геометрические параметры препятствия. В связи с этим в работе [11] был предложен критерий взаимодействия волны с препятствием:

$$K_{\text{int}} = \frac{a}{H - h_{\text{об}}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{об}}$ — высота препятствия.

Когда величина этого критерия больше критического значения, $K_{\text{int}} > K_{\text{int}}^{\text{cr}}$ ($K_{\text{int}}^{\text{cr}} = 1$), происходит сильная трансформация уединенной волны над препятствием. Уединенная волна проходит через процесс деления, в результате которого волна расщепляется над препятствием на две части. Задняя часть захватывается вблизи препятствия, формируя отраженную волну с сопровождающим ее дисперсионным “хвостом”, а передняя часть проходит и распространяется вниз по потоку. Сильное возрастание нелинейных эффектов в этом случае может привести к разрушению переднего фронта волны и образованию турбулентного бора (Рис. 2).

Когда $K_{\text{int}} < K_{\text{int}}^{\text{cr}}$, волна проходит препятствие без заметных изменений высоты волны и формы профиля. Отраженная волна в этом случае либо не наблюдается, либо ее интенсивность мала в сравнении с падающей волной.

Однако следует отметить, что увеличение критерия взаимодействия в случае $K_{\text{int}} < K_{\text{int}}^{\text{cr}}$ при взаимодействии волны с препятствием значительной длины приводит к росту нелинейных эффектов, и, как результат, волна укручается и ее профиль претерпевает существенные изменения (Рис. 3) [11].

Основным параметром гидродинамических процессов, происходящих вблизи волноломов и береговых структур, является коэффициент волнового отражения и прохождения. Амплитуды прошедшей и отраженной волн вблизи уступа описываются достаточно

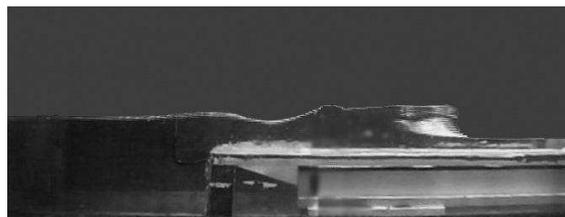


Рис. 2. Фотокадр взаимодействия уединенной волны с прямоугольным уступом высотой $h_{\text{об}}=9$ см при глубине воды в лотке $H=11$ см ($K_{\text{int}} = 1.6$)

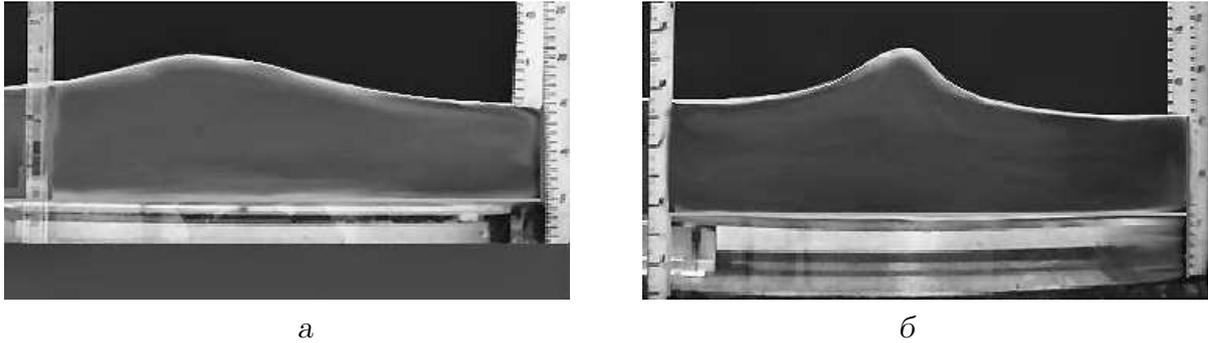


Рис. 3. Фотокадр распространения уединенной волны над уступом при глубине воды в лотке $H=17$ см:

а — высота препятствия $h_{\text{об}}=6$ см, $K_{\text{int}} = 0.35$; б — высота препятствия $h_{\text{об}}=9$ см, $K_{\text{int}} = 0.44$

хорошо известными формулами, основанными на линейной теории мелкой воды [5, 6]

$$T = \frac{a_{\text{tr}}}{a_i} = \frac{2}{1 + \sqrt{h/H}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}},$$

$$R = \frac{a_r}{a_i} = \frac{1 - \sqrt{h/H}}{1 + \sqrt{h/H}} = \frac{1 - \sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}}{1 + \sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}},$$
(3)

где a_{tr} , a_r и a_i — амплитуды прошедшей, отраженной и падающей волны соответственно.

Видно, что эти выражения дают положительные значения коэффициентов прохождения и отражения, изменяющихся в диапазоне $2 \geq a_{\text{tr}}/a_i \geq 1$ и $1 \geq a_r/a_i \geq 0$, и показывают, что если отношение глубин невелико, отражение — также мало, но если h/H стремится к нулю, волна практически полностью отражается от порога. Формально амплитуда прошедшей волны вдвое превышает амплитуду падающей волны, но ее общая энергия стремится к нулю [1].

Следуя энергетической концепции [7], уравнения (3) соответствуют сохранению общей энергии между падающей, прошедшей и отраженной волн для линейного волнового “хвоста” ($C_{gd}a_r^2 + C_{gs}a_{\text{tr}}^2 = C_{gd}a_i^2$, где $C_{gd} = \sqrt{gH}$ — скорость распространения волны в канале до уступа; $C_{gs} = \sqrt{g(H - h_{\text{об}})}$ — скорость распространения волны над уступом) и при определении волновых коэффициентов могут быть модифицированы следующим образом:

$$K_{\text{tr}} = \frac{\sqrt{C_{gs}} a_{\text{tr}}}{\sqrt{C_{gd}} a_i} = \frac{2\sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}}{1 + \sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}},$$

$$K_r = \frac{a_r}{a_i} = \frac{1 - \sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}}{1 + \sqrt{1 - h_{\text{об}}/H}}.$$
(4)

Немаловажным является также тот факт, что в рамках линейной теории мелкой воды форма волны не меняется. Поэтому в работе [12] была развита теория граничного слоя для слабо нелинейных волн на мелкой воде, распространяющихся над уступом, и показано, что уравнения (3) могут давать более точную информацию по амплитудам вблизи препятствия. Аналитическое решение коэффициента отражения согласно [12]

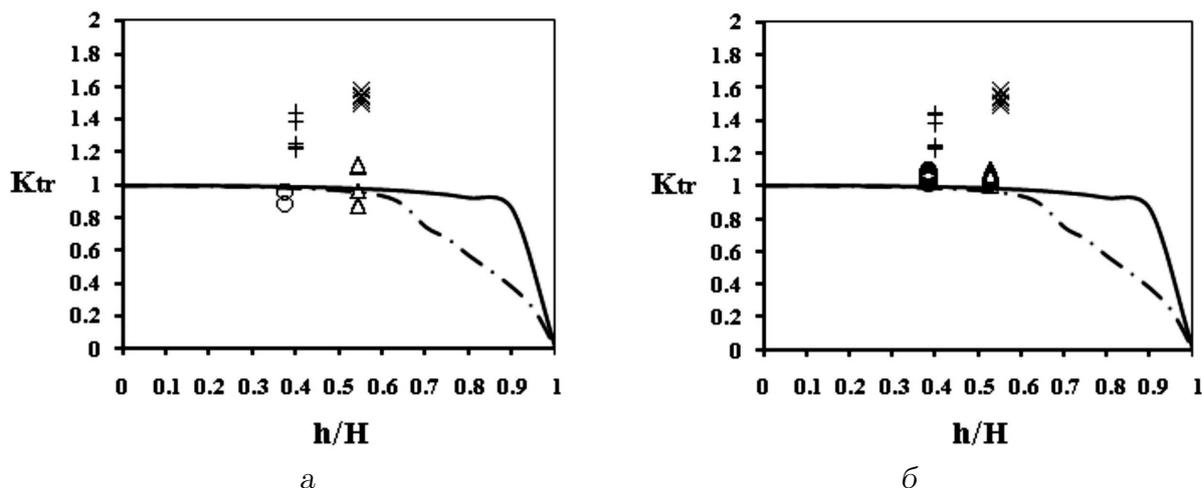


Рис. 4. Коэффициенты прохождения по амплитуде
в зависимости от отношения высоты уступа к глубине воды в лотке:

a — высота уступа $h_{об}=6$ см (Δ , \circ — экспериментальные данные для $H=11$ см и $H=16$ см, соответственно); *б* — высота уступа $h_{об}=9$ см (Δ , \circ — экспериментальные данные для $H=17$ см и $H=23.4$ см, соответственно); \times , $+$ — экспериментальные данные [8] для высоты препятствия $h_{об}=10$ см при глубине воды $H=18.1$ см и $H=25$ см, соответственно; *сплошная* — аналитическое решение (4) [5]; *штрих-пунктир* — численные результаты [7]

имеет вид:

$$K_{tr} = \frac{a_r}{a_i} = \frac{1}{4} \left\{ \sqrt{1 + 8 \left(\frac{1 - \sqrt{1 - h/H}}{1 + \sqrt{1 - h/H}} \right)} - 1 \right\}^2. \quad (5)$$

Важно отметить, что линейная теория мелкой воды [5,6] и теория граничного слоя [12] дают аналитические выражения для величин a_{tr}/a_i , a_r/a_i , в которые не входит амплитуда падающей волны. Эти величины оказываются зависимыми лишь от отношения высоты уступа к глубине жидкости перед уступом [13].

В данной работе коэффициенты прохождения и отражения определялись по данным, полученных от датчиков, как отношение амплитуд волн прошедшей к падающей и, соответственно, отраженной к падающей:

$$K_{tr} = \frac{a_{tr}}{a_i}, \quad K_r = \frac{a_r}{a_i}. \quad (6)$$

Следует отметить, что поскольку датчики располагались на некотором расстоянии от фронтальной части препятствия, для получения более точных волновых коэффициентов учитывалось затухание волны, распространяющейся в канале.

Графики зависимости коэффициентов прохождения и отражения от относительной высоты препятствия представлены на Рис. 4 и 5, соответственно. Данные проведенных исследований изображены кружочками, треугольниками и ромбами; результаты экспериментов, приведенные в [8], — прямыми и косыми крестиками. Сплошная линия отображает аналитические решения (4) [5], штрих-пунктирная — численные данные [7]. Штриховая линия на Рис. 5 соответствует выражению (5) [12].

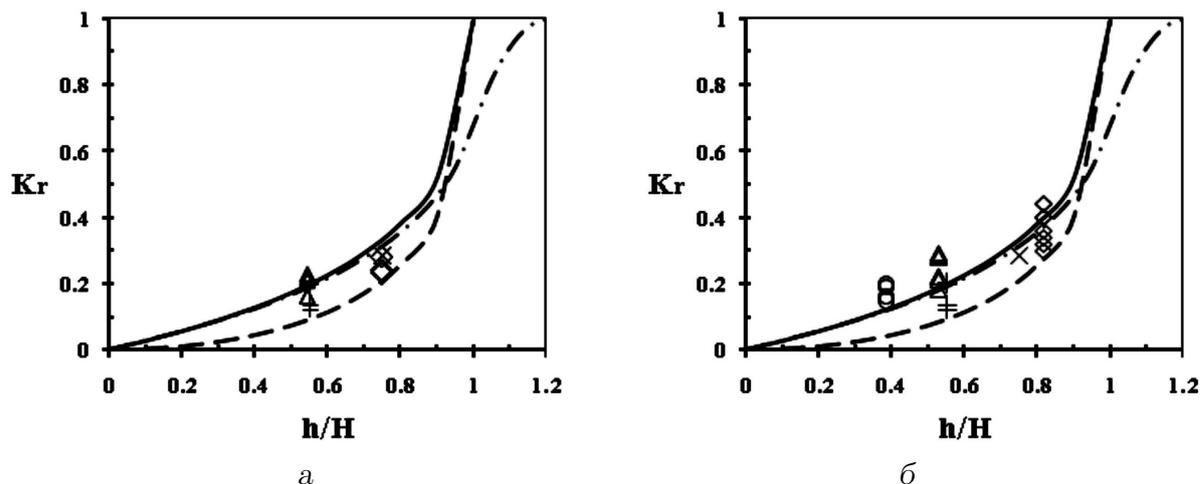


Рис. 5. Коэффициенты отражения по амплитуде

в зависимости от отношения высоты уступа к глубине воды в лотке:

а — высота уступа $h_{об}=6$ см (\diamond , \triangle — экспериментальные данные для $H=8$ см и $H=11$ см, соответственно); б — высота уступа $h_{об}=9$ см (\diamond , \triangle , \circ — экспериментальные данные для $H=11$ см, $H=17$ см и $H=23.4$ см, соответственно); \times , $+$ — экспериментальные данные [8] для высоты препятствия $h_{об}=10$ см при глубине воды $H=13.3$ см и $H=18.1$ см, соответственно; сплошная и штриховая — аналитические решения (4) и (5) [5, 12]; штрих-пунктир — численные результаты [7]

Видно достаточно хорошее согласование наших данных с теоретическими [5, 12] и численными результатами [7] как по коэффициентам прохождения, так и по коэффициентам отражения. В то время как результаты экспериментальных исследований [8] по коэффициентам прохождения (Рис. 4) дают несколько завышенные значения.

Сравнение данных, полученных в ходе экспериментов, с результатами других авторов в зависимости от относительной амплитуды волны на Рис. 6 и 7 показало, что приближенная теория дает постоянные значения $a_{тр}/a_i$, a_r/a_i , в то время как эксперименты показывают, что коэффициенты прохождения и отражения зависят от амплитуды падающей волны. Данные экспериментов представлены кружочками и квадратиками; прямые и косые крестики отображают результаты исследований [8]. Сплошная линия соответствует выражениям (3) [5, 6], пунктирная и штрихпунктирная линии — численным данным [7].

Из Рис. 6 видно, что данные по коэффициентам прохождения в зависимости от относительной высоты волны, взятые из [8], также несколько завышены. Результаты, полученные при численном исследовании трансформации волны над длинным препятствием [7], имеют более низкие значения в сравнении с теоретической кривой, построенной по уравнениям (3), и показывают, что при увеличении высоты препятствия коэффициенты прохождения уменьшаются (Рис. 6а), а коэффициенты отражения, соответственно, увеличиваются (Рис. 7а). Это объясняется тем, что увеличение высоты препятствия приводит к увеличению нелинейных эффектов, в результате чего уединенная волна при взаимодействии с длинным препятствием разрушается. Подобные результаты получены при исследовании трансформации уединенной волны над длинным препятствием в экспериментальном канале.

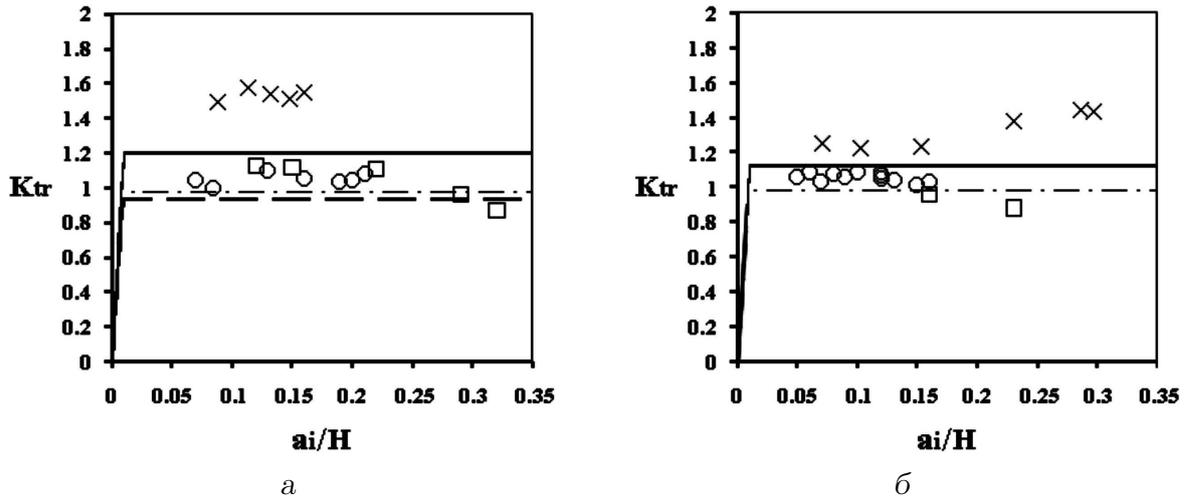


Рис. 6. Коэффициенты прохождения по амплитуде в зависимости от высоты волны: а – $h_{ob}/H = 0.55$; б – $h_{ob}/H \approx 0.38$ (\square, \circ – экспериментальные данные для высоты уступа $h_{ob} = 6$ см и $h_{ob} = 9$ см, соответственно; \times – экспериментальные данные [8] для $h_{ob}/H = 0.55$; сплошная – аналитическое решение (3) [5,6]; штрих-пунктир – численные результаты [7] для $h_{ob}/H = 0.5$ (а) и $h_{ob}/H = 0.4$ (б) штриховая – $h_{ob}/H = 0.6$ [7])

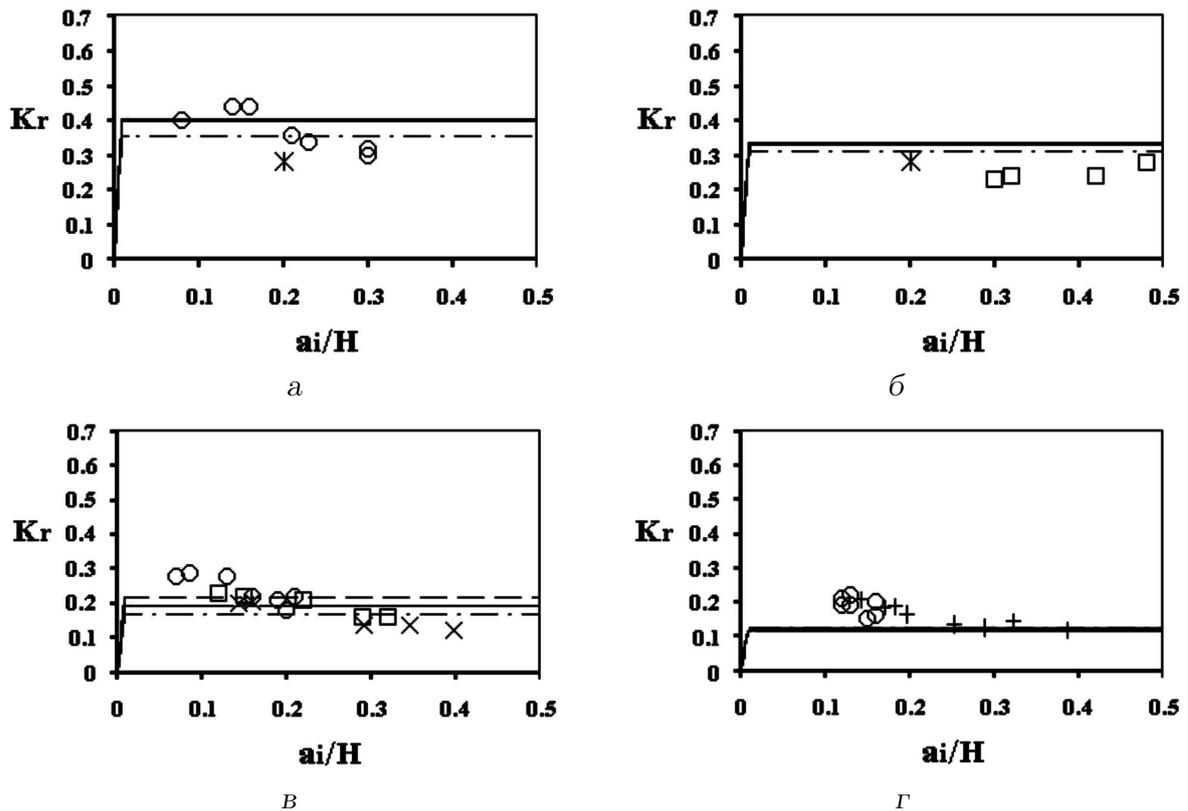


Рис. 7. Коэффициенты отражения по амплитуде в зависимости от высоты волны: а – $h_{ob}/H = 0.82$; б – $h_{ob}/H = 0.75$; в – $h_{ob}/H = 0.55$; г – $h_{ob}/H = 0.38$; (\square, \circ – экспериментальные данные для высоты уступа $h_{ob} = 6$ см и $h_{ob} = 9$ см, соответственно; *, +, \times – экспериментальные данные [8] для $h_{ob}/H = 0.75$ (а, б), $h_{ob}/H = 0.55$ (в) и $h_{ob}/H = 0.5$ (г), соответственно; сплошная – аналитическое решение (3) [5,6]; штрих-пунктир – численные результаты [7] для $h_{ob}/H = 0.8$ (а), $h_{ob}/H = 0.75$ (б), $h_{ob}/H = 0.5$ (в) и $h_{ob}/H = 0.4$ (г) штриховая – $h_{ob}/H = 0.6$ [7])

3. ВЫВОДЫ

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по взаимодействию поверхностной уединенной волны с подводным препятствием типа “уступ”. Обнаружено, что при переходе с глубокой воды H на мелкую h происходит трансформация волны над препятствием с дальнейшим делением на отраженную и прошедшую волну. Сделана оценка коэффициентов отражения и прохождения над подводным препятствием. Проведено сравнение результатов с известными аналитическими зависимостями и экспериментальными данными. Показано, что значения a_{tr}/a_i и a_r/a_i согласно линейной теории мелкой воды [5, 6] определяются относительной высотой препятствия, в то время как эксперименты демонстрируют, что коэффициенты прохождения и отражения зависят также от амплитуды падающей волны. В целом результаты проведенных исследований находятся в достаточно хорошем согласовании с результатами других авторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Solitary wave transformation on the underwater step: Asymptotic theory and numerical experiments / E. Pelinovsky, B. H. Choi, T. Talipova et al. // Applied Mathematics and Computation. — 2010. — Vol. 217. — P. 1704–1718.
- [2] Khakimzyanov G. S., Khazhoyan M. G. Numerical simulation of the interaction between surface waves and submerged obstacles // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling. — 2004. — Vol. 19, no. 1. — P. 17–34.
- [3] Liu P. L. F., Cheng Y. A numerical study of evolution of a solitary wave over a shelf // Physics of Fluids. — 2001. — Vol. 13, no. 6. — P. 1660–1667.
- [4] Ji L., Xi-Ping Y. Numerical study of solitary wave fission over an underwater step // Journal of Hydrodynamics. — 2008. — Vol. 20, no. 3. — P. 398–402.
- [5] Ламб Г. Гидродинамика. — М.-Л. : ОГИЗ, 1947.
- [6] Mei C. C., Stiassnie M., Yue D. K. P. Theory and applications of ocean surface waves: in 2 vols. — Singapore : World Scientific, 2005.
- [7] Lin P. A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles // Coast. Eng. — 2004. — Vol. 51. — P. 35–51.
- [8] Sebra-Santos F. J., Renouard D. P., Temperville A. M. Numerical and experimental study of the transformation of a solitary wave over a shelf or isolated obstacle // Journal of Fluid Mechanics. — 1987. — Vol. 176. — P. 117–134.
- [9] Генерація, розповсюдження та накат відокремлених хвиль на берегові схили / О. В. Городецький, А. С. Котельнікова, В. І. Нікішов та ін. // Прикладна гідромеханіка. — 2010. — Т. 12(84), № 1. — С. 40–48.
- [10] Hammack J. L., Segur H. The Korteweg—de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments // Journal of Fluid Mechanics. — 1974. — Vol. 65. — P. 289–314.

- [11] Котельнікова А. С., Нікішов В. І., Срібнюк С. М. Взаємодія поверхневих поодиноких хвиль з підводними перешкодами // Доповіді НАН України. — 2012. — № 7. — С. 54–59.
- [12] Sugimoto N., Nakajima N., Kakutani T. Edge-layer theory for shallow-water waves over a step — reflection and transmission of a soliton // Journal of Physical Society of Japan. — 1987. — Vol. 56, no. 5. — P. 1717–1730.
- [13] Рузиев Р. А., Хахимзянов Г. С. Численное моделирование трансформации уединенной волны над подводным уступом // Вычислительные технологии. — 1992. — Т. 1, № 1. — С. 5–21.

REFERENCES

- [1] E. Pelinovsky, B. H. Choi, T. Talipova, S. D. Woo, and D. C. Kim, “Solitary wave transformation on the underwater step: Asymptotic theory and numerical experiments,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, pp. 1704–1718, 2010.
- [2] G. S. Khakimzyanov and M. G. Khazhoyan, “Numerical simulation of the interaction between surface waves and submerged obstacles,” *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling*, vol. 19, no. 1, pp. 17–34, 2004.
- [3] P. L. F. Liu and Y. Cheng, “A numerical study of evolution of a solitary wave over a shelf,” *Physics of Fluids*, vol. 13, no. 6, pp. 1660–1667, 2001.
- [4] L. Ji and Y. Xi-Ping, “Numerical study of solitary wave fission over an underwater step,” *Journal of Hydrodynamics*, vol. 20, no. 3, pp. 398–402, 2008.
- [5] H. Lamb, *Hydrodynamics*. New York: Dover, 1947.
- [6] C. C. Mei, M. Stiassnie, and D. K. P. Yue, *Theory and applications of ocean surface waves: in 2 vols.* Singapore: World Scientific, 2005.
- [7] P. Lin, “A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles,” *Coast. Eng.*, vol. 51, pp. 35–51, 2004.
- [8] F. J. Sebra-Santos, D. P. Renouard, and A. M. Temperville, “Numerical and experimental study of the transformation of a solitary wave over a shelf or isolated obstacle,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 176, pp. 117–134, 1987.
- [9] O. V. Gorodetsky, A. S. Kotelnikova, V. I. Nikishov, V. V. Oleksuk, P. Y. Romanenko, L. V. Selezova, G. P. Sokolovsky, and S. M. Sribnuk, “Generation, propagation and run-up of solitary waves on slopes,” *Applied Hydromechanics*, vol. 12(84), no. 1, pp. 40–47, 2010.
- [10] J. L. Hammack and H. Segur, “The Korteweg—de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 65, pp. 289–314, 1974.

- [11] A. S. Kotelnikova, V. I. Nikishov, and S. M. Srebnyuk, “On the interaction of surface solitary waves and underwater obstacles,” *Dopovidi NAN Ukrainy*, no. 7, pp. 54–59, 2012.
- [12] N. Sugimoto, N. Nakajima, and T. Kakutani, “Edge-layer theory for shallow-water waves over a step — reflection and transmission of a soliton,” *Journal of Physical Society of Japan*, vol. 56, no. 5, pp. 1717–1730, 1987.
- [13] R. A. Ruziev and G. S. Khakimzyanov, “Numerical modeling of a solitary wave transformation over an underwater ledge,” *Vychislitelnye Tehnologii*, vol. 1, no. 1, pp. 5–21, 1992.

А. С. Котельнікова, В. І. Нікішов, С. М. Срібнюк
**Експериментальне дослідження взаємодії поверхневої поодинокі
хвилі з підводним уступом**

У роботі представлено результати експериментальних досліджень взаємодії поверхневих усамітнених хвиль з прямокутним уступом. Показано, що при переході з глибокої води на мілку над перешкодою відбувається трансформація хвилі з її розділенням на відбиту й прохідну хвилі. Отримані оцінки коефіцієнтів відбиття й проходження. Проведено порівняння результатів з відомими аналітичними співвідношеннями та експериментальними даними. Продемонстровано залежність коефіцієнтів проходження й відбиття не тільки від відносної висоти перешкоди, але й від амплітуди падаючої хвилі. Це спостереження виходить за рамки оцінок, отриманих згідно з лінійною теорією мілкої води.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: усамітнена хвиля, підводний уступ, коефіцієнти відбиття й проходження

A. S. Kotelnikova, V. I. Nikishov, S. M. Sribnyuk
**Experimental study of interaction of a surface solitary wave with an
underwater step**

The results of experimental studying of the interaction process of solitary waves with a rectangular step are presented. In the process of transition from deep water to shallow, wave transformation above the obstacle is shown with further its separation into the reflected and transmitted waves. The estimations of reflection and transmission coefficients are obtained. The results are compared with known analytical relationships and experimental data. The transmission and reflection coefficients demonstrate the dependence not only on the relative height of the obstacle, but also on the amplitude of the incident wave. This observation is beyond the bounds of estimates obtained according to the linear theory of shallow water.

KEY WORDS: solitary wave, underwater step, reflection and transmission coefficients