

6. Давидсон В. Е. Элементы технологической гидрогазодинамики : учеб. пособие / В.Е. Давидсон. – Д., 1987. – 84 с.
7. Давидсон В. Е. Элементы технологической гидрогазодинамики : монография / В.Е. Давидсон // Депонирована. Москва № 7762-В. – 1989. – 140 с.
8. Давидсон В. Е. Вопросы методологии и методики гидрогазодинамики : монография / В.Е. Давидсон. – Д., 1989. – 40 с.
9. Давидсон В. Е. Введение в гидрогазодинамику : учебник. Часть 1 и 2 / В.Е. Давидсон. – Д., 1995 – 481 с.
10. Давидсон В. Е. Задачник по газовой динамике / В.Е. Давидсон. – Д., 1989. – 68 с.
11. Давидсон В. Е. Введение в гидродинамику : учебник / В.Е. Давидсон, Н.Н. Лычагин. – Д., 2002. – 220 с.
12. Давидсон В. Е. Введение в газодинамику : учебник / В.Е. Давидсон, Н.Н. Лычагин. – Д., 2002. – 216 с.
13. Давидсон В. Е. Вступ у гідродинаміку : підручник / В.Є Давидсон, М.М. Личагін. – Д., 2002. – 214 с.
14. Давидсон В. Е. Вступ у газодинаміку : підручник / В.Є. Давидсон, М.М. Личагін. – Д., 2002. – 215 с.
15. Давидсон В. Е. Размышления преподавателя / В.Е. Давидсон. – Д., 2006. – 60 с.
16. Давидсон В. Е. Основы гидрогазодинамики в примерах и задачах : монография / В.Е. Давидсон. – Д., 2006. – 377 с.
17. Давидсон В. Е. Основы гидрогазодинамики в примерах и задачах : монография / В.Е. Давидсон. – М., 2008. – 320 с.

УДК 532.59

А.С. Котельникова*, В.И. Никишов*, В.В. Олексюк*, С.М. Сребнюк**

Институт гидромеханики НАН Украины

***Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН С БЕРЕГОВЫМИ СКЛОНАМИ

Представлено результати експериментальних досліджень розповсюдження та взаємодії поверхневих відокремлених хвиль з вертикальною стінкою та береговими схилами, які мають різні кути нахилу до горизонту. Отримано основні характеристики хвиль, що розповсюджуються в лотку, та коефіцієнти їх відбиття від вертикальної стінки та берегових схилів.

Ключові слова: усамітнена хвиля, накат хвилі, відкат хвилі, коефіцієнт відбиття.

Представлены результаты экспериментальных исследований распространения и взаимодействия поверхностных уединенных волн с вертикальной стенкой и береговыми склонами, установленных под разными углами к горизонту. Получены основные характеристики волн, распространяющихся в лотке, и коэффициенты их отражения от вертикальной стенки и береговых склонов.

Ключевые слова: уединенная волна, накат волны, откат волны, коэффициент отражения.

The results of experimental investigation of the propagation and interaction of surface solitary waves with vertical wall and slopes are presented. Slopes of the different angles in respect to horizon have been considered. Main wave characteristics and reflection coefficients of solitary waves from vertical wall and slopes have been obtained.

Key words: solitary wave, wave run-up, wave rundown, coefficient of reflection.

Введение. При исследовании взаимодействия поверхностных уединенных волн с береговыми склонами основное внимание уделяется, как правило, определению высоты наката волн в зависимости от их амплитуды и угла наклона стенки. Для анализа динамических процессов, происходящих в береговой зоне, важную роль играет отражение волн от склонов и сооружений. Отражение волн от волноломов (плотин) может существенно влиять на режим течения в области перед сооружением или склоном. Вертикальные, или близкие к вертикальным, гидротехнические конструкции практически полностью отражают волны, при этом происходит значительный подъем уровня воды перед конструкцией. Уменьшение угла склона приводит к изменению подъема уровня воды и интенсивности отраженной волны. Указанные особенности взаимодействия волн со склоном оказывают соответствующее влияние на характер течения в области перед склоном, в частности и в придонной области, что может существенно влиять на процессы переноса донных наносов и деформации донной поверхности. С другой стороны, взаимодействие падающих и отраженных волн может порождать волны большей амплитуды. Для гаваней это может быть причиной возникновения трудностей при маневрировании небольших судов. Неблагоприятные эффекты волнового отражения могут приводить к аварийным ситуациям, связанных с потерями в прибрежном материале и дестабилизации береговых конструкций. Поэтому для проектирования береговых сооружений необходимо учитывать коэффициенты отражения.

Исследования, посвященные волновому отражению от береговых конструкций и склонов, довольно малочисленны. Проблема отражения уединенной волны привлекла внимание исследователей при изучении взаимодействия между уединенными волнами.

Столкновение двух одинаковых уединенных волн друг с другом является эквивалентным, при отсутствии вязкости, взаимодействию уединенной волны с вертикальной стенкой. Данному вопросу посвящены работы [1–6]. Экспериментальное исследование столкновения двух уединенных волн представлено в [1]. Показано, что максимальный подъем уровня воды при столкновении волн может превышать удвоенную амплитуду начальной волны. Также обнаружен фазовый сдвиг (замедление распространения волн в течение их столкновения), который не зависит от начальной амплитуды. Проведено сравнение с результатами теоретических зависимостей. В [2] рассматривается лобовое столкновение двух уединенных волн, которые распространяются вдоль поверхности невязкой однородной жидкости. Изучение процесса столкновения основывалось на использовании метода малых возмущений. Обнаружено, что волны, сформировавшиеся в результате столкновения, сохраняют исходные параметры (с точностью до третьего порядка разложения), однако имеет место фазовый сдвиг, кроме того, за каждой уединенной волной возникают вторичные волны. Найдено, что амплитуда волновой группы уменьшается со временем из-за дисперсии. Вычислен максимальный подъем уровня воды при столкновении волн. Численное моделирование столкновения двух уединенных волн представлено в [3]. Основное внимание направлено на изучение генерации вторичных волн. Описано формирование волнового цуга за каждой распространяющейся уединенной волной, который возникает в результате лобового столкновения уединенных волн. После столкновения уединенные волны практически восстанавливают свою первоначальную амплитуду. Результаты расчетов фазового сдвига и зависимости параметров взаимодействующих волн от времени находятся в соответствии с решением уравнения Кортевега–де Вриза. Взаимодействие поверхностных уединенных волн с вертикальной стенкой теоретически исследовано в [4].

Отмечается, что лобовое столкновение двух одинаковых уединенных волн эквивалентно, в отсутствие вязкости, отражению уединенной волны от вертикальной стенки. Установлено, что амплитуда волны после отражения уменьшается. Также показано, что затухание амплитуды, которое наблюдается в эксперименте, объясняется появлением дисперсионного «хвоста». В [5] представлены экспериментальные и теоретические результаты столкновения между распространяющимися параллельно и навстречу друг другу уединенными волнами. Получены экспериментальные данные пространственных волновых профилей для заданного момента времени, проведено сравнение с результатами, полученными на основе математических моделей. В [6] исследуется нелинейное взаимодействие уединенных волн, распространяющихся вдоль свободной поверхности. В результате – найдена зависимость, описывающая изменение амплитуд уединенных волн при их взаимодействии, и проведена оценка энергии, уносимой «остаточной» компонентой. Результаты включают экспериментальные измерения параметров взаимодействующих уединенных волн, численное моделирование процесса столкновений, оценку потерь энергии при «неупругом» взаимодействии волн.

Взаимодействие уединенной волны с вертикальной стенкой также изучалось в работах [7 – 9]. Статья [7] посвящена экспериментальному исследованию генерации, распространения, затухания и отражения уединенной волны от плоской вертикальной стенки. Авторы отметили, что отражение уединенной волны от вертикальной стенки можно рассматривать как столкновение двух подобных волн одинаковой амплитуды, распространяющихся в противоположных направлениях. При взаимодействии со стенкой наблюдалось увеличение амплитуды уединенной волны и уменьшение ее скорости. Согласно данным, амплитуда отраженной волны возле вертикальной стенки меньше, чем у падающей волны; уменьшение амплитуды не превышает 10 %. Также авторы обратили внимание на то, что на некотором расстоянии амплитуда отраженной волны равна амплитуде, которую одиночная волна имела бы, если бы не существовало бы стенки и действовало только вязкое торможение. Отражение наклонно падающей уединенной волны от вертикальной стенки изучено численно с помощью спектрального метода высокого порядка в [8], где основное внимание сконцентрировано на маховском отражении уединенных волн. Численные результаты показали, что с увеличением амплитуды волны маховского отражения не возникает. Столкновение уединенной волны, распространяющейся вдоль свободной поверхности над горизонтальным дном, с вертикальной стенкой также рассмотрено в [9]. Приведены результаты для стадии движения, когда волна находится уже непосредственно в контакте со стеной. Сделана оценка времени взаимодействия волны со стеной. Показано, что время контактирования обеспечивает определение параметров фазового сдвига, возникающего в процессе отражения волн как малой, так и большой амплитуды. Представлены также результаты, касающиеся других особенностей взаимодействия, включая максимальный накат и мгновенную силу воздействия на стену.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований распространения и взаимодействия уединенных волн с береговыми склонами, установленными под разными углами к горизонту: 11° , 17° , 30° , 45° , 60° , 90° .

Экспериментальная установка. Эксперименты проводились в волновом лотке длиной 16 м, шириной 0.3 м и высотой 0.7 м. Боковые стенки лотка были сделаны из стекла.

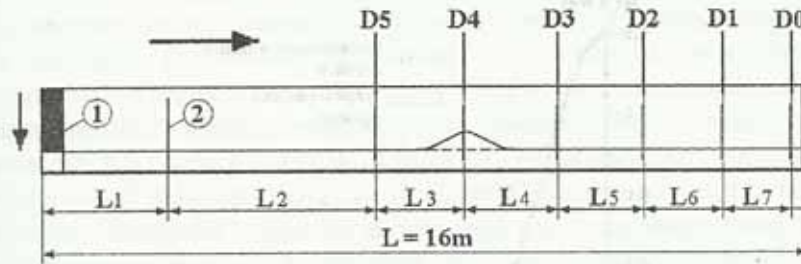


Рис. 1. Схема лабораторного канала:

- 1 – генератор волн;
 - 2 – оборудование для отсекающего дисперсионного «хвоста»;
 - L1 – расстояние от торцевой стенки лотка до отсекающего;
 - L2 – расстояние от отсекающего до датчика D5;
 - L3, ..., L7 – расстояния между датчиками в лотке;
 - D0, ..., D5 – емкостные датчики.
- Стрелка указывает направление распространения уединенной волны

Генерация уединенных волн производилась путем создания локального подъема уровня воды, который возникал при падении тяжелого тела на дно лотка. Генератор волн (1 на рис. 1) имел форму прямоугольной призмы ($0.23 \times 0.3 \times 0.75$ м). Дальнейшая эволюция возмущения приводила к формированию одной уединенной волны. Дисперсионный «хвост», который возникал при генерации волны, отсекался с помощью специального оборудования (2 на рис. 1). Отметим, что эффективность производимого отсекающего уменьшается с увеличением глубины воды в лотке, но, тем не менее, интенсивность дисперсионного «хвоста» остается малой.

В противоположном конце лотка устанавливались модели береговых склонов с разными углами наклона к горизонту. Регистрация деформации свободной поверхности при прохождении уединенной волны производилась протяженными емкостными датчиками (D0 – D5) (рис. 1). Сигнал от датчиков подавался на аналогово-цифровой преобразователь, соединенный с персональным компьютером. Величина временного интервала между регистрируемыми данными составляла 5 мсек для каждого датчика. Более подробно установка описана в [10].

Эксперименты по исследованию взаимодействия уединенной волны с вертикальной стенкой и береговыми склонами проводились для следующих глубин воды в лотке: 8 см, 11 см, 17 см, 23 см. Датчики были частично заглублены в воду. Перед пробегами осуществлялась их тарировка путем заглубления в воду на заданные глубины, в результате чего находилась регрессионная зависимость между сигналом от датчиков и величиной заглубления. В процессе проведения экспериментов датчики располагались вдоль оси лотка, что позволило определить скорость распространения волны, её амплитуду и форму профиля.

Результаты экспериментальных исследований. После генерации волна движется вниз по потоку, и подъем уровня свободной поверхности, вызванный распространяющейся волной, регистрируется датчиками. На рис. 2 приведена типичная форма уединенной волны, полученная в результате обработки данных экспериментов.

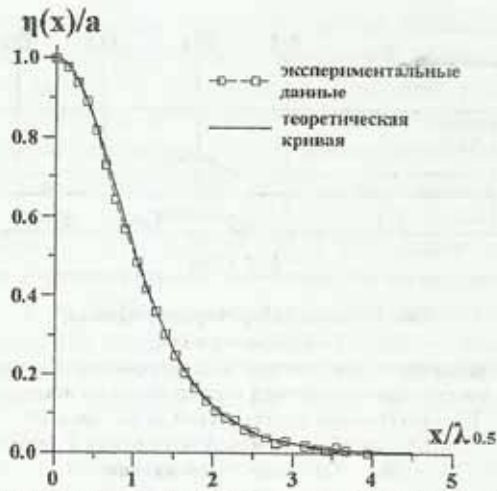


Рис. 2. Форма профиля уединенной волны $\eta(x)/a$ по отношению к $x/\lambda_{0.5}$, $\lambda_{0.5}$ – расстояние от точки, которая отвечает гребню волны, до точки, которая отвечает половине амплитуды волны [11]

Сплошная кривая на рис. 2 соответствует теоретическому профилю уединенной волны (решение уравнения Кортевега–де Вриза) [12]

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

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

Из рис. 2 видно, что волны, которые формируются в эксперименте, являются типичными нелинейными уединенными волнами.

Взаимодействие уединенных волн с береговыми склонами. После генерации уединенная волна с амплитудой a распространяется в волновом лотке по направлению к склону, движется вверх по склону, и в конечном итоге величина наката достигает своего максимального значения R . Результаты исследования величины наката в зависимости от параметров уединенной волны для разных глубин приведены в [10]. В данной работе основное внимание уделено процессу отражения волн.

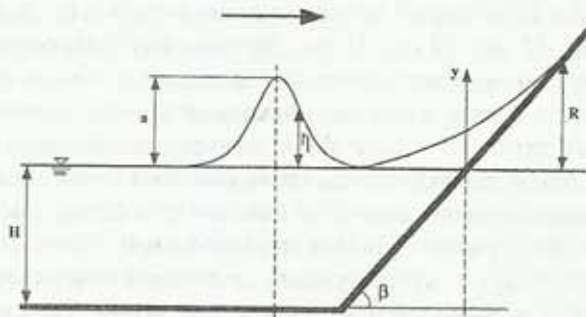


Рис. 3. Эскиз наката уединенной волны

Как известно, существует два режима взаимодействия уединенных волн с береговым склоном: без обрушения и с обрушением волны в процессе наката. Согласно [13], при накате уединенных волн на склон более чем 10° , волны не разрушаются. Так как эксперименты проводились с крутыми и средними склонами, уединенные волны распространяются вдоль лабораторного лотка, заполненного жидкостью постоянной глубины, и движутся вверх по склону без обрушения. На рис. 4,а и 4,б показаны профили свободной поверхности воды, полученные в результате обработки цифровых фотографий процесса наката волн на склон, когда уединенные волны с амплитудой $a = 0.26H$ взаимодействуют с вертикальной стенкой и береговым склоном с углом 30° , соответственно. Глубина потока составляла 11 см. Отметим, что начало координат ($x = 0$) расположено на пересечении невозмущенной поверхности воды (уреза воды) и склона.

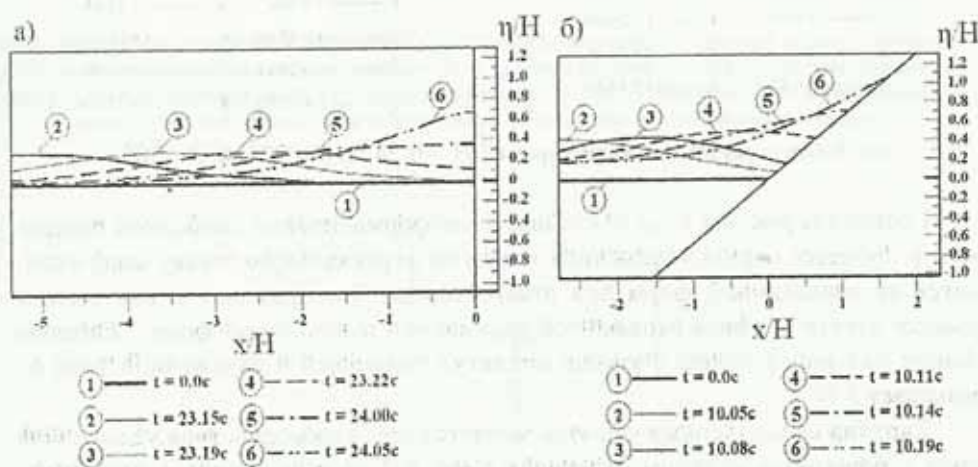


Рис. 4. Накат уединенной волны на береговой склон при $a/H = 0.26$:

а) $\beta = 90^\circ$; б) $\beta = 30^\circ$

Из рисунков видно, что форма свободной поверхности в различные моменты времени является плавной кривой, то есть обрушения волны не происходит. При уменьшении угла склона форма свободной поверхности укрупняется. Анализ результатов экспериментальных исследований [10] показал, что высота наката уединенной волны возрастает при увеличении относительной высоты волны и при уменьшении угла наклона берегового склона до определенных пределов. Аналогичная картина наблюдается и на рис. 4,а и 4,б.

При взаимодействии уединенных волн с береговыми склонами после достижения положения максимального наката начинается процесс отката (wave run-down) – язык наката отступает вниз по склону, и в этот момент начинается генерация отраженной волны, распространяющейся от берегового склона. В течение этого процесса, часть энергии отражается от склона, а часть энергии диссипирует [14]. На рис. 5,а и 5,б представлены результаты обработки цифровых фотографий процесса

отката уединенной волны при взаимодействии с вертикальной стенкой и береговым склоном с углом 30° , соответственно. Глубина потока была та же, что и на рис. 4.

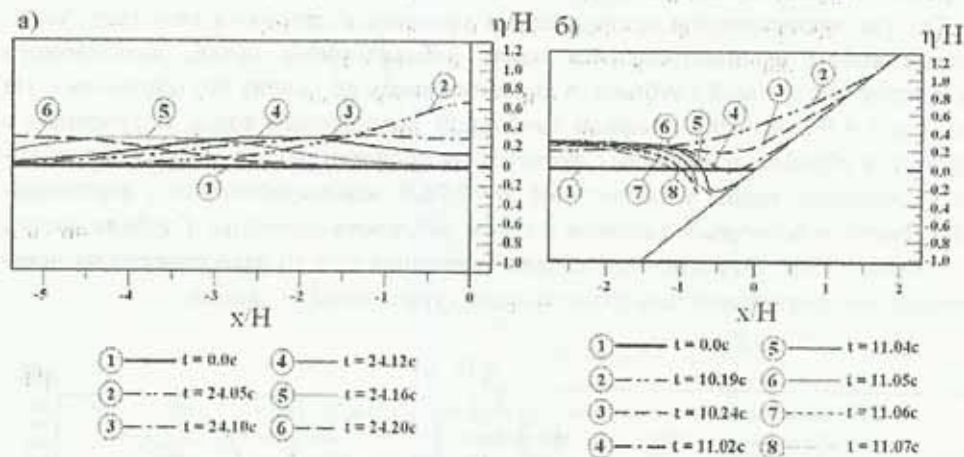


Рис. 5. Откат уединенной волны при $a/H = 0.26$: а) $\beta = 90^\circ$; б) $\beta = 30^\circ$

Сравнение рис. 4,а и 5,а показывает, что формы кривых свободной поверхности в процессе наката уединенной волны на вертикальную стенку мало отличаются от аналогичных форм при откате волны. Это приводит к тому, что в процессе отката профиль отраженной уединенной волны имеет форму, близкую к форме падающей волны. Разница амплитуд падающей и отраженной волн не превышает 5 %.

Картина существенно образом меняется при взаимодействии уединенной волны с береговым склоном, имеющим угол 30° по отношению к горизонту. При откате волны возникает значительное локальное понижение свободной поверхности. В это же время происходит генерация отраженной волны, но заметно меньшей амплитуды. Локальное понижение уровня свободной поверхности, в данном случае, обуславливает генерацию волн относительно малой длины волны, которые распространяются от склона вслед за отраженной уединенной волной в виде цуга волн (дисперсионного «хвоста»).

На рис. 6 и 7 представлены записи данных, полученных одним из датчиков (D3) на протяжении одного пробега при глубине воды в лотке 11 см при взаимодействии уединенной волны с вертикальной и наклонной стенками, соответственно. Сначала датчик записывает возмущение свободной поверхности, вызванное падающей волной (1, рис. 6 и 7). Потом датчик регистрирует волну, которая отразилась от вертикальной стенки (2, рис. 6) и волну, которая отразилась от берегового склона с углом 30° (2, рис. 7). Затем волна движется вверх по потоку и отражается от пластины, которая отсекает дисперсионный «хвост», и распространяется вниз по потоку (3, рис. 6 и 7).

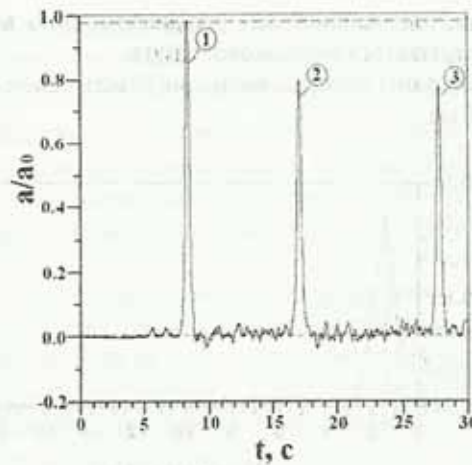


Рис. 6. Возмущение свободной поверхности при распространении уединенной волны в лотке с вертикальной стенкой при глубине воды $H = 11$ см (датчик D3, рис.1): 1 – возмущение свободной поверхности, вызванное распространением волны; 2 – волна, отраженная от вертикальной стенки; 3 – волна, отраженная от пластины, отсекающей дисперсионный «хвост»

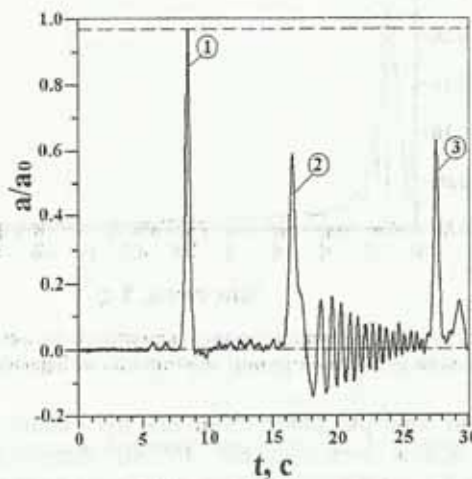


Рис. 7. Возмущение свободной поверхности при распространении уединенной волны в лотке с береговым склоном 30° при глубине воды $H = 11$ см (датчик D3, рис.1): 1 – возмущение свободной поверхности, вызванное распространением волны; 2 – волна, отраженная от берегового склона с углом 30° ; 3 – волна, отраженная от пластины, отсекающей дисперсионный «хвост»

Из рис. 6 видно, что уединенная волна, распространяющаяся вдоль канала, отражается от вертикальной стенки без каких-либо изменений, кроме незначительного уменьшения амплитуды. При взаимодействии уединенной волны с береговым склоном, установленным под углом 30° (рис. 7), наблюдается заметное уменьшение амплитуды отраженной волны, искажение формы заднего фронта отраженной волны и образование дисперсионного цуга волн. Согласно [15], волна, отраженная от стенки, уже не является солитоном; на малом расстоянии от склона за гребнем следует ложбина, на большом – гребень превращается в солитон, за которым тянется осциллирующий хвост. Так как скорость уединенной волны больше скорости дис-

персионного «хвоста», при дальнішому розповсюдженні волна буде сбрасувати лишню енергію і отриватися від хвосту.

На рис. 8 і 9 показані спектри хвосту (дисперсійного «хвосту») для глибини води в лотку 11 см.



Рис. 8. Спектр амплітуд дисперсійного хвосту волни, утвореного при відбитті хвосту хвилі від берегового схилу 60°

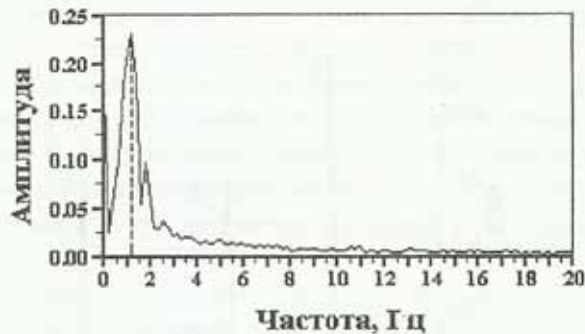


Рис. 9. Спектр амплітуд дисперсійного хвосту волни, утвореного при відбитті хвосту хвилі від берегового схилу 17°

Виявлено, що спектри дисперсійного хвосту волни, утвореного при відбитті хвосту хвилі від схилів 60° , 45° , 30° , близькі за формою, їх максимуми спостерігаються при 1,4 – 1,5 Гц, коли глибина води в лотку дорівнює 11 см. З підвищенням глибини води основна частота хвосту падає, і, зокрема, становить 1,2 – 1,3 для глибини 17 см. Відзначимо, що для берегового схилу з кутом 17° максимум спектра зсувається до 1,1 Гц – для 11 см, до 1,0 Гц – для 17 см. Це граничні значення кутів берегових схилів, досліджені в роботі. Далі зменшення кута призводить до того, що при відбитті хвосту хвилі не формується, і відбиті хвилі представляють собою пакет хвосту, розповсюджуються вгору по потоку.

Аналіз результатів показує, що суттєва зміна кута схилу надає невелике вплив на основну частоту хвосту в дисперсійному «хвості». Але, з іншого боку, зміна глибини води призводить до помітного зміни основної частоти хвосту. Це свідчить про те, що основна частота хвосту в дисперсійному «хвості», по-видимому, визначається дисперсійним співвідношенням.

Отражение уединенных волн. Волновое движение в передней части отражающей конструкции, в основном, определяется коэффициентами отражения по амплитуде $K_a = a_r / a_i$, и по энергии $K_E = E_r / E_i$. Здесь a_r и a_i – амплитуда отраженной и падающей волны, соответственно; E_r – энергия отраженной волны, E_i – энергия падающей волны, соответственно. В свою очередь коэффициент отражения для наклонной плоскости зависит от угла наклона, шероховатости поверхности и пористости. Также волновое отражение зависит от крутизны падающей волны и ее длины.

На рис. 10 представлены значения коэффициента отражения по амплитуде, полученные при обработке данных экспериментальных исследований для глубин 11 см и 17 см, в зависимости от угла наклона берегового склона к горизонту. Отметим, что амплитуда волн составляла $a = 0.3H$ для опытов с глубиной воды 11 см и $a = 0.21H$ – с глубиной 17 см. Анализ результатов показал, что изменение амплитуды уединенной волны слабо влияет на величину коэффициента отражения при фиксированных значениях глубины H и угла склона.

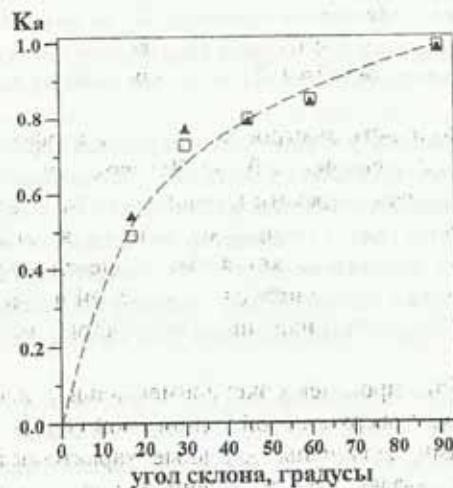


Рис. 10. Значение коэффициента отражения K_a по амплитуде уединенной волны по отношению к углу наклона берегового склона к горизонту:
 \blacktriangle – для глубины воды 11 см, \square – для глубины воды 17 см

Для определения коэффициента отражения по энергии необходимо проводить оценку энергии уединенных волн. Известно, что для уединенных волн относительно небольшой амплитуды величина кинетической энергии близка к величине потенциальной энергии и для оценки общей энергии волны можно использовать следующую зависимость [14]:

$$E = \rho \cdot g \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2 dx ,$$

где ρ – плотность жидкости.

На рис. 11 представлены рассчитанные значения коэффициента отражения по энергии для глубин воды в лотке 11 см и 17 см при тех же параметрах волн, которые описаны выше.

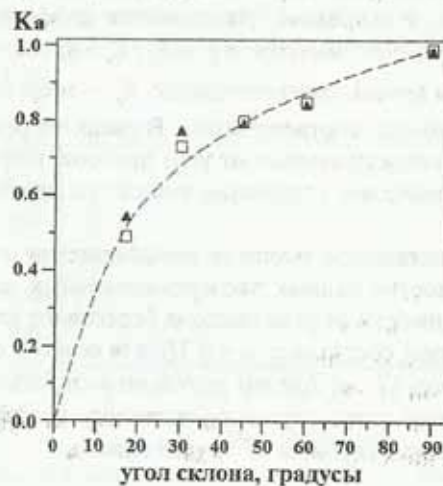


Рис. 11. Значение коэффициента отражения K_E по энергии уединенной волны по отношению к углу наклона берегового склона к горизонту:
▲ – для глубины воды 11 см, □ – для глубины воды 17 см

На рис. 10 и 11 можно видеть быстрое возрастание коэффициента отражения с изменением угла берегового склона от 0° до 30° , затем при дальнейшем увеличении угла рост заметно замедляется (режим насыщения). При определении коэффициента отражения по энергии (рис. 11) характер поведения кривой, построенной по результатам вычисления, немного меняется. Это свидетельствует о том, что величина энергии зависит не только от амплитуды уединенной волны, но и от ее скорости и длины. Отметим также, что с уменьшением угла склона интенсивность отраженной волны падает.

Выводы. В работе проведено экспериментальное исследование распространения и взаимодействия поверхностной уединенной волны с вертикальной стенкой и береговыми склонами. Получены основные характеристики волн, распространяющихся в лотке. Показано, что уединенные волны описываются уравнением Кортевега-де Вриза, то есть ль волны совпадает с классическим профилем, который описывается законом « $sech^2$ ». Модифицированный метод генерации уединенных волн, используемый в исследованиях, позволяет генерировать солитоны с малой интенсивностью дисперсионного «хвоста». Использование этого метода позволило найти коэффициенты отражения уединенных волн от склонов, определение которых при наличии «хвостов» дает значительную ошибку. Обнаружено, что после отражения часть энергии уединенной волны затрачивается на формирование дисперсионного цуга и, естественно, на трение жидкости о дно. В результате – амплитуда волны падает, что приводит к уменьшению скорости распространения отраженной волны. Основная частота волн в дисперсионном «хвосте» слабо зависит от угла склона, в то же время увеличение глубины воды вызывает существенное уменьшение частоты волн. Сделан вывод о том, что частота определяется, в основном, дисперсионным соотношением. Показано, что отражение уединенной волны падает с уменьшением угла склона.

Библиографические ссылки

1. Maxworthy T. Experiments on collisions between solitary waves / T. Maxworthy // J. Fluid Mech. – 1976. – 76. – P. 177–185.
2. Su C. H. On head-on collisions between two solitary waves / C.H. Su, M. Mirie Rida // J. Fluid Mech. – 1980. – 98, part 3. – P. 509–525.
3. Rida M. Mirie. Collisions between two solitary waves. Part 2. A numerical study / M. Mirie Rida, C.H. Su // J. Fluid Mech. – 1982. – 115. – P. 475–492.
4. Byatt-Smith J. G. B. The reflection of a solitary wave by a vertical wall / J. G. B. Byatt-Smith // J. Fluid Mech. – 1988. – 197. – P. 503–521.
5. Hammack J. Solitary-wave collisions / J. Hammack, P. Guyenne, D. Henderson, M. Yi // A Symposium to honor Theodore Yao-Tsu Wu, OMAE 2004, June 21–22, 2004, Vancouver, BC Canada. – P. 1–12.
6. Craig W. Solitary water wave interactions / W. Craig, P. Guyenne, J. Hammack, D. Henderson, C. Sulem // Physics of Fluids. – 2006. – 18, 057106. – P. 1–25.
7. Renouard D.P. Experimental study of the generation, damping, and reflexion of a solitary wave / D.P. Renouard, F. J. Seabra Santos, A. M. Temperville // Dynamics of Atmospheres and Oceans. – 1985. – 9. – P. 341–358.
8. Tanaka Mitsuhiro. Mach reflection of a large-amplitude solitary wave / Mitsuhiro Tanaka // J. Fluid Mech. – 1993. – 248. – P. 637–661.
9. Cooker M. J. Reflection of a high-amplitude solitary wave at a vertical wall / M. J. Cooker, P. D. Weidman and D. S. Bale // J. Fluid Mech. – 1997. – 342. – P. 141–158.
10. Городецький О.В. Генерація, розповсюдження та накат відокремлених хвиль на берегові схили / О.В. Городецький, А.С. Котельнікова, В.І. Нікішов, В.В. Олексюк та ін. // Прикладна гідромеханіка. – 2010. – 12 (84), N1. – С. 40–47.
11. Koop C.G. An investigation of internal solitary waves in a two-fluid system / C.G. Koop, G. Butler // J. Fluid Mech. – 1981. – 112. – P. 225–251.
12. Hammack J.L. The Korteweg–de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments / J.L. Hammack, H. Segur // J. Fluid Mech. – 1974. – 65. – P. 289–314.
13. Street R.L. Observations and experiments on solitary wave deformation / R.L. Street, F.E. Camfield // Proc. 10th Conference Coastal Engineering. – 1966. – P. 284–301.
14. Li Ying. Energy Balance Model for Breaking Solitary Wave Runup / Ying Li, Fredric Raichlen // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. – 2003. – 47. – P. 47–59.
15. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский // ИПФ РАН. Нижний Новгород, – 1996. – 276 с.

Надійшла до редколегії 11.10.10

УДК 523.2 +532.5

11 В.І. Перехрест

10 Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

12 ЗАКОН ПЛАНЕТНИХ ВІДСТАНЕЙ У ВИХРОВІЙ ТЕОРІЇ ПЛАНЕТАРНИХ СИСТЕМ

21 На основі теоретичного аналізу математичної вихрової моделі планетарних систем отримано аналітичний вираз для планетних відстаней у сформованих планетарних системах. Ці відстані є функціями координат центрів вихрових кілець первинного планетарного вихору. Порівняння теоретичних і реальних відстаней планет Сонячної системи показує їх добре узгодження.