

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.466

П.В. Мочулин, Н.К. Шелковников

Исследование ветровых уединенных волн в кольцевом аэрогидроканале

В работе выполнено экспериментальное исследование механизмов зарождения и взаимодействия ветровых уединенных волн в кольцевом аэрогидроканале. Рассмотрено влияние флотации (плавающей массы) и поверхностно-активных веществ на время формирования солитона и его параметры. Показано, что увеличение концентрации поверхностно-активных веществ и количества флотации приводит к увеличению времени зарождения ветровой уединенной волны. Выявлено, что в случае малого различия амплитуд взаимодействующих солитонов они ведут себя подобно частицам. Когда же их амплитуды существенно отличаются, больший из них проходит через меньший, что приводит при многократном взаимодействии к образованию единственного солитона.

Введение. Как известно, впервые уединенную волну обнаружил Рассел в 1834 г. [1]. Позже исследования по данному вопросу были продолжены другими авторами. Так, Буссинеск и Рэлей нашли приближенное математическое описание формы и скорости уединенной волны на мелкой воде, а в 1895 г. Кортевег и де Вриз вывели уравнение (КдВ), описывающее слабонелинейные и слабодиспергирующие волны. В теории гравитационных волн на мелкой воде уравнение КдВ часто представляют в следующем виде:

$$u_t + \frac{3}{2} \frac{c_s}{H} uu_\xi = \frac{1}{2} c_s H^2 \left(\frac{\gamma}{\rho g H^2} - \frac{1}{3} \right) u_{\xi\xi\xi},$$

где независимая переменная $\xi = x - c_s t$, $c_s = \sqrt{gH}$, H — глубина жидкости в отсутствии возмущения, γ — поверхностное натяжение воды, а ρ — ее плотность.

Особенно важным является тот факт, что в случае равновесия между нелинейностью uu_ξ и дисперсией $u_{\xi\xi\xi}$ решение уравнения представляет собой уединенную волну, так называемое односолитонное решение КдВ:

$$u = h \operatorname{sech}^2 \left[\left(\frac{3h}{4H^3} \right)^{\frac{1}{2}} (x - ct) \right],$$

где $c = c_s \left(1 + \frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{2}}$, h — максимальная амплитуда солитона. В этом уравнении хорошо заметна связь между амплитудой и скоростью волны, волны большей амплитуды движутся быстрее.

Интенсивные исследования нелинейных процессов в 60-е годы прошлого века в различных областях физики показали, что для некоторых видов нели-

нейных систем уединенная волна является важным устойчивым состоянием. Уединенные волны были открыты в кристаллах, магнитных материалах, в плазме. Эксперименты по численному моделированию нелинейных волн начались с работы Ферми, Паста и Улама (ФПУ) [2], в которой была исследована задача о порождении теплового хаоса в цепочке нелинейно связанных осцилляторов. Результаты данной работы оказались совершенно неожиданными: было обнаружено отсутствие термализации энергии (т.е. распределения энергии по всем модам) и возвращение системы к начальному состоянию с одной возбужденной основной модой. Это так называемый возврат ФПУ. Дальнейшее развитие эта работа получила в статье американских ученых Забуски и Крускала [3]. Они выполнили численный эксперимент, в котором синусоидальные колебания, распространявшиеся в нелинейной диспергирующей среде, со временем превращались в уединенные волны, взаимодействующие между собой. При этом если амплитуды сближающихся солитонов были одного порядка, то после такого взаимодействия солитоны расходились, не изменяя ни размера, ни формы. Забуски и Крускал ввели термин «солитон», подчеркивая, что во многих отношениях уединенные волны ведут себя подобно частицам.

Этот факт нашел подтверждение в ряде экспериментальных работ [4] (солитон создавался, как правило, волнопродукторами специальной формы), а также в теоретических исследованиях [5]. Что касается уединенных волн, возникающих на поверхности жидкости под действием ветра, то они являются одним из этапов развития ветровых волн, которые, как известно, развиваются от капиллярных до трохойдальных. Все эти этапы, в особенности гравитационные и трохойдальные волны, были исследованы В.В. Шулейкиным [6] в «штормовом бассейне». При определенных условиях (параметр Урсела

$U_r = \frac{\alpha}{\beta}$, близкий к единице, где α — параметр нелинейности, β — параметр дисперсии) следующим этапом развития ветровых волн могут быть уединенные волны, что подтверждается работой [7], в которой впервые были описаны уединенные волны в кольцевом аэрогидроканале. Было показано, что процесс формирования солитона происходил следующим образом: под действием ветра на поверхности жидкости возникала рябь, затем — периодические волны, высота h и длина λ которых со временем возрастали, а отношение h/λ уменьшалось, т.е. формировалось условие мелководья. В процессе эволюции образовывалось несколько солитонов, постоянно взаимодействующих друг с другом, в результате чего оставался один из них. Сказанное качественно подтверждается и тем фактом, что одним из стационарных решений уравнения КдВ является уединенная волна [8].

Изучение уединенных волн на поверхности воды представляет интерес не только в научном плане, но и в практическом. В частности, знание параметров ветровых уединенных волн необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации морских платформ, используемых для добычи нефти и газа. В последние годы в научной литературе появилось понятие метеоцунами [9]. Предполагается, что волны, подобные цунами, могут возникать под действием метеорологических факторов, в том числе под действием ветра. В шельфовой зоне они могут принимать форму уединенной волны, при описании которой часто используют уравнение КдВ, что позволяет определить некоторые параметры

волн цунами и прогнозировать величину заплеска. При этом важно знать, каким образом влияет на зарождение и параметры волн метеоцунами наличие на поверхности воды пакового льда и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Работ в этом направлении явно недостаточно. Это объясняется тем, что в природных условиях измерения связаны с большими техническими трудностями и сложными гидрометеорологическими условиями, а теоретические исследования таких процессов осложнены необходимостью учета влияния ветра, т.е. решения уравнения КдВ с правой частью. В настоящее время нам не известны работы, в которых были бы представлены результаты лабораторных исследований генерации ветровых уединенных волн.

Целью данной работы является исследование генерации и взаимодействия ветровых солитонов, а также влияния на этот процесс флотации и ПАВ.

Методика проведения экспериментов. Нами были проведены серии экспериментов в кольцевом аэрогидроканале (рис. 1) с внутренним диаметром 165 см, внешним диаметром 202 см и высотой 40 см. Канал имел металлическое дно, боковые стенки его были изготовлены из оргстекла, благодаря чему через них можно было вести непосредственное наблюдение и осуществлять видео- и фотосъемку волн. Для создания воздушного потока использовался вентилятор, который нагнетал воздух в пространство между поверхностью воды и крышкой канала через специальные раструбы. Вентилятор имел устройство, позволявшее регулировать поток воздуха, направляемый через рукава в канал со скоростью от 3 до 15 м/с. Регистрация волн велась как при помощи видеосъемки, так и 16 струнными волнографами, расположенными по периметру канала. Каждый волнограф представлял собой два параллельных электрода, изготовленных из нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм, длиной 25 см и закрепленных на жесткой рамке. Волнографы включались в цепь генераторов переменного тока, промодулированные сигналы подавались на плату аналого-цифрового преобразователя компьютера, погрешность измерения волнографами составляла около 5%. Скорость ветра измерялась при помощи анемометрической вертушки, ошибка измерений скорости ветра не превышала 7%.

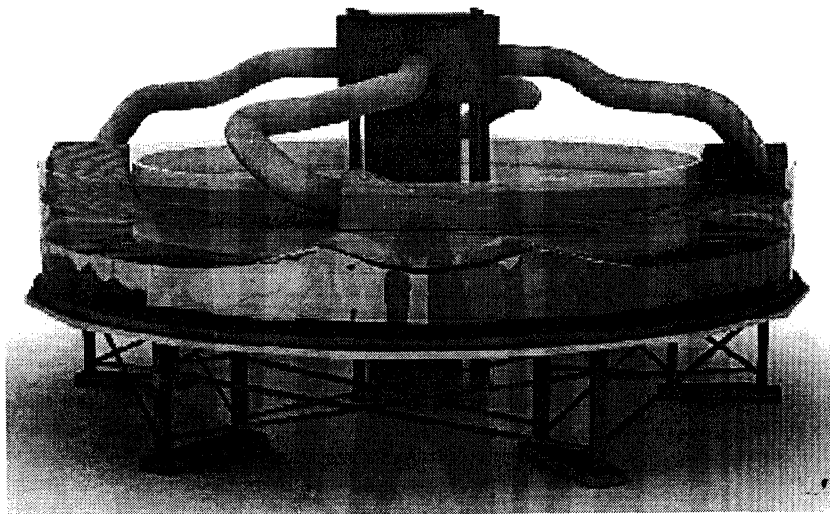


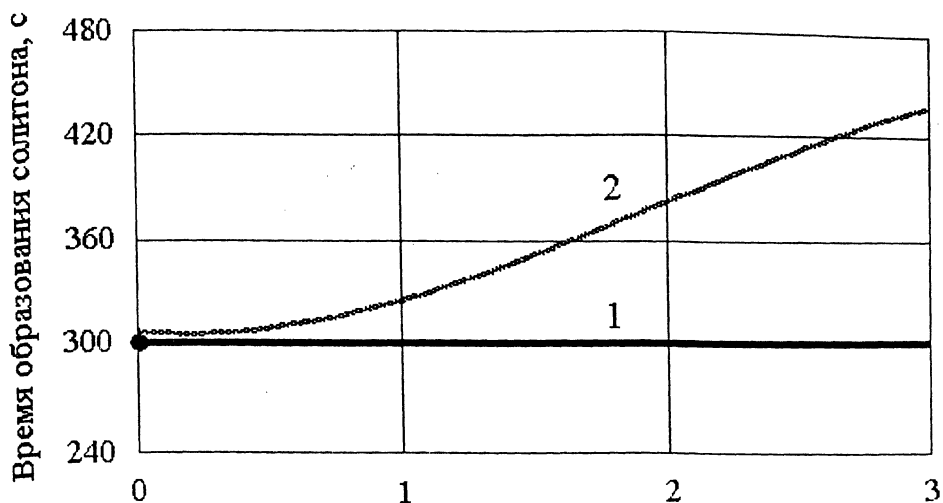
Рис. 1. Лабораторный кольцевой аэрогидроканал (видны два взаимодействующих солитона)

Во время экспериментов канал заполнялся водой до заданной глубины и, при выбранном режиме, включалась ветровая установка. Непрерывная регистрация волн позволила детально проследить механизм зарождения ветровых уединенных волн. Как было отмечено выше, под действием ветра возникало несколько уединенных волн, в результате взаимодействия которых формировался единственный солитон.

Влияние поверхностно-активных веществ. Для исследования влияния ПАВ на процесс формирования ветровых уединенных волн нами были проведены измерения в кольцевом аэрогидроканале при фиксированном значении ПАВ, при котором коэффициент поверхностного натяжения уменьшался более чем на 50% по сравнению с чистой жидкостью. Полученные данные сопоставлялись с результатами измерений в чистой воде. Наличие ПАВ на поверхности жидкости приводило к гашению мелкомасштабных волн, при этом происходило развитие так называемого длинноволнового механизма формирования ветровых уединенных волн. Под ним понимается процесс, когда на начальном этапе наблюдались только длинноволновые колебания, сравнимые с длиной канала, с амплитудой до 1 см. При увеличении амплитуды волн происходило формирование нескольких уединенных волн с последующим их взаимодействием и образованием единственного солитона. На рис. 2 приведен график изменения длины волн в канале на начальной стадии (первые 25% времени процесса) зарождения ветрового солитона. Видна разница в развитии волн. В чистой воде на этом этапе наблюдалось непрерывное увеличение длины ветровых поверхностных волн, а при наличии ПАВ — их уменьшение. Необходимо отметить, что наблюдалась существенная разница в длительности процесса зарождения уединенных волн на чистой воде и при наличии ПАВ. В последнем случае длительность фазы зарождения солитона занимала примерно в десять раз больше времени. При значительном увеличении концентрации ПАВ образование уединенных волн вообще не происходило.

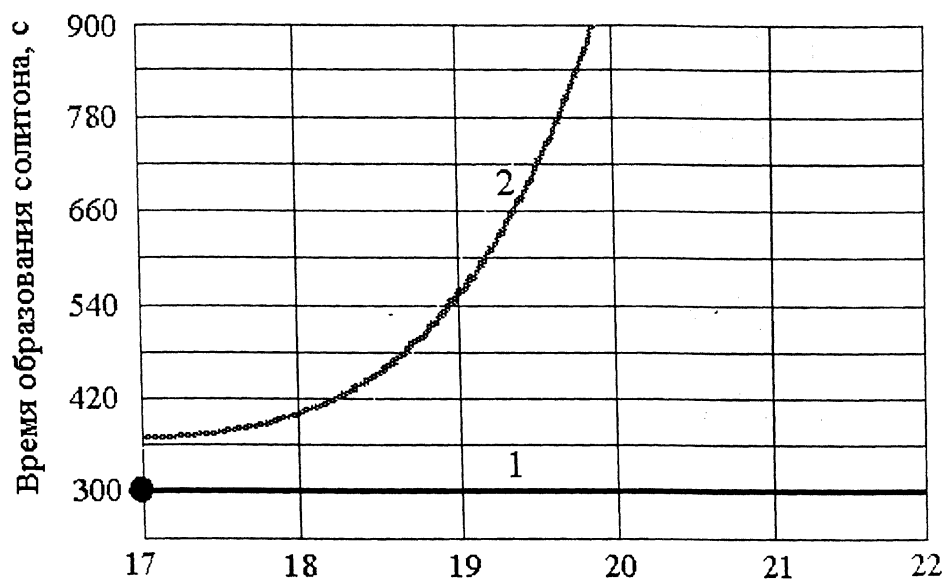


Р и с. 2. Влияние поверхностно-активных веществ на механизм зарождения ветрового солитона (1 — чистая вода, 2 — при наличии ПАВ)



Отношение массы флотации к массе сформировавшегося солитона, %

a



Отношение массы флотации к массе сформировавшегося солитона, %

б

Р и с. 3. Влияние флотации на время зарождения ветрового солитона: *a* – количество флотации до 3% от массы сформировавшегося солитона, *б* – более 17% (1 – чистая вода, 2 – при наличии ПАВ; при флотации, соответствующей затемненной области, солитоны не образуются)

Влияние флотации. Для исследования процессов зарождения уединенных волн с учетом флотации (плавающей массы) были проведены серии экспериментов вначале при чистой поверхности жидкости, а затем — при дискретном увеличении флотации. В качестве флотирующего вещества использовались кусочки льда или их заменители из соответствующих материалов, которые во время экспериментов равномерно размещались на поверхности жидкости. После включения ветра процесс развития волнения происходил без формирования капиллярных и гравитационно-капиллярных волн. Развитие гравитационных волн происходило существенно медленней, чем при отсутствии флотации. Это приводило к увеличению времени формирования солитона. Результаты экспериментов показаны на рис. 3, где приведена зависимость времени образования уединенной волны от количества флотации на верхней границе жидкости. Видно, что даже малое количество флотации (до 5% от массы сформировавшегося солитона) приводило к увеличению времени образования солитона (рис. 3, *а*) — до значения, в полтора раза большего, чем при чистой поверхности жидкости. При увеличении массы флотации амплитуда солитона уменьшалась, а его длина увеличивалась. При этом процесс формирования солитона замедлялся. Так, например, флотация массой 20% от массы сформировавшейся уединенной волны увеличивала время ее образования более чем на 10 мин (рис. 3, *б*), т.е. в 3 раза, по сравнению с чистой жидкостью. При еще больших значениях количества флотации, как и в экспериментах с ПАВ, образование ветрового солитона не происходило. Полученные данные могут быть полезны для понимания процессов, происходящих в условиях морей северных широт, акватория которых покрыта паковым льдом.

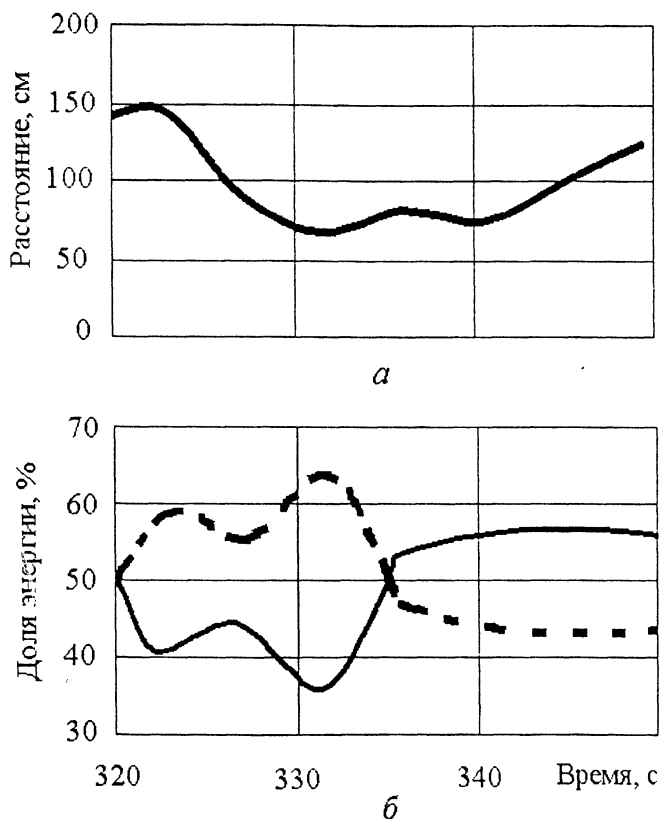
Взаимодействие двух солитонов. Во всех проведенных нами экспериментах наблюдалось развитие двух уединенных волн, взаимодействующих в течение длительного времени под влиянием ветра. Механизм этого взаимодействия можно описать следующим образом: поскольку скорость солитона прямо пропорциональна его амплитуде, то возникала ситуация, когда больший, второй, солитон догонял меньший, первый. В итоге происходило их взаимодействие, в результате которого первый солитон получал дополнительный импульс и смещался вперед, а второй, отдав часть энергии, — назад. Таким образом, происходил частицеподобный процесс взаимодействия двух уединенных волн. Это свойство является одним из параметров, характеризующих солитон, поэтому вместо термина «уединенная волна» мы иногда использовали термин «солитон». Возвращаясь к вопросу взаимодействия солитонов, отметим, что по мере сближения второй солитон увеличивал экранирование первого от воздействия ветра, вследствие чего первый солитон уменьшался, а второй продолжал увеличиваться. После взаимодействия и последующего отталкивания солитоны расходились на расстояние примерно 1,5 м, затем амплитуда второго солитона начинала увеличиваться, поскольку поступающая от ветра энергия была больше энергии, теряемой на диссипацию и движение солитона. Первый же солитон сохранял свои параметры. В результате солитоны начинали сближаться и выходили на позицию повторного взаимодействия.

Описанный механизм взаимодействия двух уединенных волн можно дополнить графиками, полученными в лабораторных условиях. Как видно из

рис. 4, а, сближение и удаление солитонов друг от друга происходило в пределах от 70 до 150 см. Кроме того, энергия каждого из солитонов определялась по формуле Буссинеска

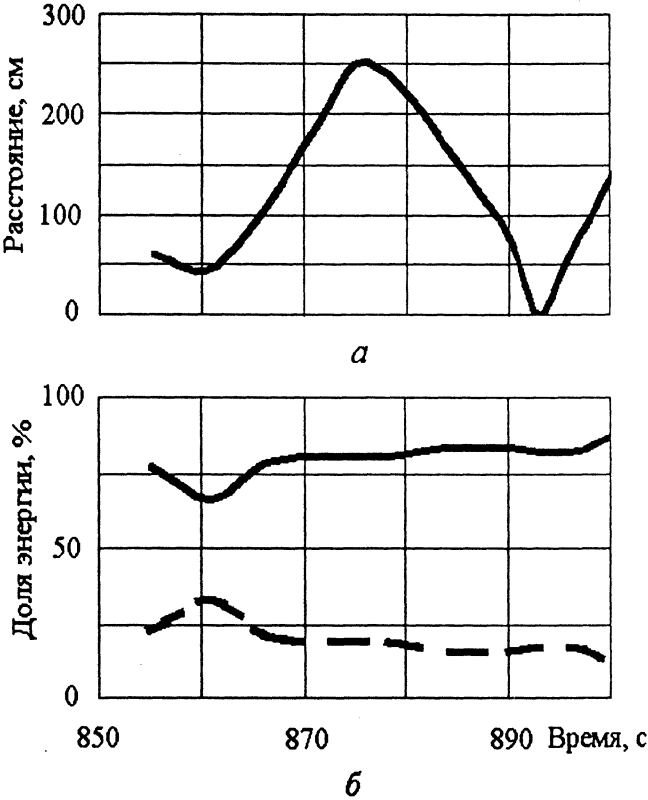
$$E = \frac{8}{3} \rho g H^2 h \left(\frac{h}{3H} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где h — амплитуда солитона, H — глубина жидкости, ρ — плотность воды, g — константа ускорения свободного падения. Далее бралось отношение энергии каждого солитона к их суммарной энергии. Соответствующий график зависимости представлен на рис. 4, б. Показана доля суммарной энергии в процентах, приходящаяся на каждый из взаимодействующих солитонов. Сплошная линия на графиках соответствует параметрам первого солитона, штриховая — второго. Отчетливо видна перекачка энергии от второго солитона к первому. Такое поведение уединенных волн на качественном уровне во многом совпадает с описанием взаимодействия солитонов в численных экспериментах Забуски и Крускала. Можно подтвердить их заключение, что при малом различии параметров взаимодействующие ветровые уединенные волны проявляют частицеподобные свойства.



Р и с. 4. Процесс взаимодействия двух солитонов в кольцевом аэрогидроканале: а – зависимость расстояния между солитонами от времени, б – зависимость распределения энергии между солитонами от времени (сплошная линия – первый солитон, штриховая – второй)

В случае, если у второго солитона после очередного взаимодействия существенно уменьшалась амплитуда и он отставал настолько, что оказывался впереди большего (удалялся на расстояние свыше 3 м), то последний проходил через него. Меньший солитон при этом уменьшался, замедлялся еще сильнее и, через несколько таких прохождений, полностью затухал. В результате оставался один солитон. На рис. 5 представлены графики количественных данных этого процесса. Из графика зависимости расстояния между солитонами от времени (рис. 5, а) видно, что солитоны в процессе своего движения после взаимодействия (850 – 875 с) расходились на такое расстояние, что больший солитон оказывался позади меньшего и проходил через него (875 – 900 с). При этом энергии (рис. 5, б) каждого из солитонов различались по величине в 3 – 4 раза. В результате формировался единственный солитон. Он существовал до тех пор, пока работал вентилятор, после выключения которого солитон затухал. В отличие от Забуски и Крускала в наших экспериментах явление рекуррентности не наблюдалось.



Р и с. 5. Процесс прохождения большего солитона через меньший: а – зависимость расстояния между солитонами от времени, б – зависимость распределения энергии между солитонами от времени (сплошная линия – первый солитон, штриховая – второй)

Выводы. По результатам проведенных исследований в кольцевом аэро-гидроканале можно сформулировать следующие выводы.

1. Обнаружены частицеподобные свойства ветровых уединенных волн с близкими по значению амплитудами, наблюдающиеся при взаимодействии их друг с другом. Этот вывод позволяет вместо термина «уединенная волна» использовать термин «солитон».

2. В случае большой разности амплитуд взаимодействующих ветровых уединенных волн наблюдалось прохождение большего солитона через меньший. После нескольких таких прохождений меньший солитон исчезал и формировался единственный солитон.

3. Показано, что увеличение ПАВ приводит к росту времени зарождения ветрового солитона и даже к невозможности его формирования.

4. Выявлено, что наличие флотации влияет на процесс образования солитона, приводя к увеличению времени его формирования. Солитон существует, если флотация не превышает 20% от массы сформировавшегося солитона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Russell J.S.* Report on waves // Rep. 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science.— London: John Murray, 1844.— P. 311 – 390.
2. *Fermi A., Pasta J., Ulam S.* Studies of Nonlinear Problems. I.— Los Alamos Report, LA. 1955.
3. *Zabusky N.J., Kruskal M.D.* Interaction of «solitons» in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // Phys. Rev. Lett.— 1965.— 15.— P. 240 – 243.
4. *Renouard D.P., Seabro-Santos F. J., Temperville A. M.* Experimental study of the generation, damping and reflexion of a solitary wave // Dyn. Atm. and Oceans.— 1985.— 2.— P. 341 – 358.
5. *Новикова С.П., Манакова С.В.* Солитоны.— М.: Мир, 1983.— 408 с.
6. *Шулейкин В.В.* Физика моря.— М.: Наука, 1968.— 1084 с.
7. *Шелковников Н.К.* Ветровые уединенные волны в кольцевом аэрогидроканале // Депон. рукопись № 2283-B2002.— М.: ВИНТИ, 2002.— 9 с.
8. *Korteweg D.J., de Vries G.* On the change of long waves advancing in a rectangular canal and on a new type of long stationary waves // Phil. Mag. Ser. 5.— 1895.— 39.— P. 197–212.
9. *Пелиновский Е.Н.* Гидродинамика волн цунами.— Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996.— 276 с.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва

Материал поступил
в редакцию 11.11.04
После доработки 12.01.05

ABSTRACT Mechanisms of origin and interaction of solitary waves in a ring basin are investigated. Influence of floating material and surface-active substances upon the period of soliton formation and its parameters is considered. It is shown that increase of concentration of surface-active substances and flotation quantity results in growth of the origin time of a wind solitary wave. It is revealed that in case of small difference between the amplitudes of the interacting solitons their behavior is similar to that of the particles. When their amplitudes differ essentially a larger of them passes through a smaller one that, after multiple interaction, results in formation of a sole soliton.