

Штормовые волны в океане

Н.К. Шелковников*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
 физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
 (Статья поступила 29.06.2017; Подписана в печать 30.06.2017)

Проведено исследование формирования уединенных волн и цугов волн в кольцевом аэрогидроканале. Показано, что при увеличении скорости ветра в условиях глубокой воды в канале формируются цуги волн, а на мелкой воде наблюдались уединенные волны.

PACS: 92.10.H- 92.10.hb.

УДК: 551.466.

Ключевые слова: волны-убийцы, кольцевой канал, цуги волн, уединенные волны.

От уединенной волны в прямом канале (Рассел 1834 г.) до ветровой уединенной волны в кольцевом канале (Шелковников 2005 г.) прошло примерно 170 лет. Как медленно проходит процесс познания. В настоящее время по мнению некоторых зарубежных и российских ученых принято считать, что в отличие от реально существующих штормовых волн, иногда достигающих 12 баллов, якобы существует особый вид волн в виде «волн-убийц» (ВУ), возникающих как бы «ниоткуда» и исчезающих в «никуда».

Такое представление о ВУ с нашей точки зрения является сомнительным, а иногда даже близким к мифическому. С другой стороны известно, что для понимания механизмов формирования морских волн, в том числе приливов, волн цунами и ветровых волн необходимо учитывать причины их вызывающие. Этими причинами являются сейсмические процессы в земной коре, влияние Луны и Солнца, а также воздействие на морскую поверхность турбулизированного потока воздуха (ветра).

Начальное понятие об уединенных волнах (УВ) на воде, используемое в настоящее время, было заложено Расселом, при проведении наблюдений в прямых каналах. В итоге он установил, что имеет место постоянство скорости и неизменность формы отдельной уединенной волны, а так же зависимость ее скорости от глубины канала и высоты волны.

Работой Рассела заинтересовались Эри и Стокс. В частности, Эри подверг критике выводы Рассела об уединенной волне. Он отмечал, что формула Рассела для скорости уединенной волны не получается из теории длинных волн на мелкой воде и что длинные волны в каналах не могут сохранять постоянную форму. Эри был правильно поставлен вопрос о математическом описании с помощью лагранжевой теории «мелкой воды» а не «мелкой волны». Стокс отмечал, что волны не могут сохранять постоянную форму даже в случае пренебрежительно малой вязкости, то есть уединенная волна должна была бы распасться даже в том случае, если не теряла энергию на трение.

Что касается общей теории волн конечной амплитуды, сопровождаемых потенциальным движением жидкости, то первые шаги в этом направлении были сделаны Стоксом в 1847 г. Поскольку динамические уравнения и условия на свободной поверхности являются нелинейными, то получить точное решение задачи Стоксу не удалось. Решая задачу методом последовательных приближений, он получил формулы для подсчета профиля волн и выяснил интересные особенности движения. Ему первому удалось выяснить, что профиль установившихся волн конечной амплитуды выражается не синусоидой, а более сложной кривой. Ограничиваясь учетом членов, содержащих отношение в третьей степени, можно записать уравнение волны в следующем виде:

$$\zeta = a \cos(kx - \omega t) - \frac{1}{2}ka^2 \cos 2(kx - \omega t) + \frac{3}{8}k^2a^3 \cos 3(kx - \omega t). \quad (1)$$

Отсюда можно вывести ряд заключений о форме волны. Такая волна симметрична относительно вертикальных прямых, проходящих через гребни и впадины волн. В то же время она не симметрична относительно плоскости невозмущенного уровня. Гребень этой волны лежит выше этой плоскости на величину

$$\zeta_{\text{греб}} = \left[1 + \frac{1}{2}ak + \frac{3}{8}a^2k^2 \right], \quad (2)$$

а впадина — ниже на величину

$$\zeta_{\text{впад}} = \left[1 - \frac{1}{2}ak + \frac{3}{8}a^2k^2 \right]. \quad (3)$$

При этом впадины имеют более пологое очертание, чем гребни. С увеличением высоты при данной длине гребни волн становятся все более заостренными и приближаются к предельной форме, характеризующейся наличием угловой точки в вершине волны. Угол между касательными в угловой точке равняется 120°. Мичелл провел подробный расчет профиля предельной волны Стокса. Он нашел, что крутизна этой волны

$$\frac{2a}{\lambda} = 0.142. \quad (4)$$

*E-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru

Это значение максимальной крутизны волн соответствует наблюдаемому в природе. Скорость распространения волны

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \left[1 + \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

зависит не только от ее длины, но и от амплитуды. Траектории частиц в волновом движении оказываются незамкнутыми вследствие наличия волнового течения со скоростью

$$V_{\text{вол}} = a^2 k^2 \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \exp 2kz. \quad (6)$$

Скорость этого волнового течения невелика и быстро убывает с глубиной, но существование ее несомненно и является следствием наличия потенциала скоростей у рассматриваемого движения. При распространении волн создается непрерывный перенос жидкости в том же направлении.

Кортевег и Де Вриз [1] нашли уравнение, наиболее точно описывающее явление, наблюдаемое Расселом. Они получили довольно простое уравнение для определения поведения волн на мелкой воде и нашли его периодические волновые решения. Уравнение Кортевега-де Вриза (КдВ) можно получить исходя из уравнений длинных волн, распространяющихся по поверхности идеальной жидкости путем разложения их по двум малым параметрам: нелинейности $a = \frac{h}{H}$ и дисперсии $\beta = \frac{H^2}{\lambda^2}$, где a — амплитуда волны от невозмущенного уровня жидкости, λ — длина волны, H — глубина жидкости. В первом приближении уравнение КдВ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{3c_0}{2H} \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{c_0 H^2}{6} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3}, \quad (7)$$

где η — возмущение поверхности, $c_0 = \sqrt{gH}$ — Лагранжева скорость волн на воде. Решение представляет собой уединенную волну, движущуюся в положительном направлении оси x с постоянной скоростью c . Это так называемое односолитонное решение КдВ:

$$\eta = \frac{1}{\cosh^2 \left[\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta_0}{H^3}} (x - ct) \right]} \quad (8)$$

η возрастает от 0 при $x = \infty$, достигает максимума, равного η_0 и затем симметричным образом спадает до 0 при $x = -\infty$. Таким образом играет роль безразмерной амплитуды солитона. Решение уравнения КдВ выведено в предположении $a \ll 1$ и фактически оказалось, что для уединенных волн a ограничено сверху. Существующая оценка для экспериментального $a \approx 0.7$, а для теоретического $a \approx 0.78$. Бенджамен и Фейр показали [2], что волны Стокса на глубокой воде неустойчивы по отношению к малым возмущениям определенного вида, так что в реальных условиях, где

всегда присутствуют некоторые возмущения, при распространении волн на большие расстояния они будут искажаться из-за неустойчивости. Эта неустойчивость появляется при длинноволновой модуляции в области волновых чисел возмущения меньше некоторого критического значения. Ее называют неустойчивостью на боковых частотах, поскольку она проявляется в росте пары боковых компонентов $(\omega_0 \pm \omega', k_0 \pm k')$, расположенных около «несущего» компонента (ω_0, k_0) . Если частота и волновое число слегка возмущены и принимают вид $\omega = \omega_0 + \omega'$ и $k = k_0 + k'$, причем $\omega' \ll \omega_0$ и $k' \ll k_0$, то возмущения приводят к модуляции амплитуды и фазы исходной волны: постоянная амплитуда a становится функцией $a(x, t)$, а к фазе прибавляется слагаемое $\theta(x, t)$. В этом случае возмущения способны извлекать энергию из основного волнового движения [3]. Возвышение свободной поверхности записывается в виде

$$\zeta(x, t) = \text{Re}\{A(x, t) \exp [i(k_0 x - \omega_0 t)]\}, \quad (9)$$

где $A(x, t) = a(x, t) \exp [i\theta](x, t)$ — «комплексная огибающая». Уравнение для комплексной огибающей слабонелинейных волн на глубокой воде впервые получил Захаров [4], оно имеет вид:

$$i \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\omega_0}{2k_0} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\omega_0}{8k_0} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \omega_0 k_0^2 A^2 = 0 \quad (10)$$

1 января 1995 г. в Северном море (56.5 градусов с.ш., 3.2 градуса в.д.) на Норвежской нефтяной платформе «Дропнер» была зарегистрирована аномальная волна высотой 26 м, получившей название «новогодней волны». Глубина места в этом районе была 70 м, характерный период новогодней волны был 12 с, а ее длина — порядка 220 м. Наблюдаемую волну можно рассматривать как сильнонелинейную волну в условиях конечной глубины моря.

Следует отметить, что ее длина была больше глубины. Это соответствует понятию конечной глубины и в этом случае волна начинает деформироваться, укрупняться и увеличивать свою амплитуду, то есть происходят процессы, характерные для гидродинамики в условиях мелкой воды. Таким образом «новогодняя волна» не подтвердила представление ученых о том, что она была волной-убийцей.

Поверхностные ветровые волны в океане являются яркой иллюстрацией процесса взаимодействия атмосферы и океана. Параметры таких волн изменчивы и определяются в основном средней скоростью ветра U и продолжительностью его действия, с увеличением которого высота волн h , их период T и длина λ растут. Однако, темпы роста параметров волн незначительны, так что типичные времена раскачки энерго-несущих компонент волн превышают периоды самих волн на несколько порядков. Для типичного в океане диапазона значений фазовая скорость таких волн $c \approx U$, а их длина и высота по данным измерений имеют следующие значения : $T \approx 50-20$ с, $h \approx 2-10$ м.

Ветровое волнение очень мало похоже на идеализированную картину. Ветер силой 12 узлов, действующий несколько часов подряд, разовьет столь крупные волны, что гребни их начнут разрушаться, образуя «барашки». При любой скорости ветра, однако, достигается некое равновесное состояние, выражавшееся в явлении полностью развитого волнения, когда энергия, передаваемая ветром волнам, равняется энергии, теряемой при разрушении волн. Но для того, чтобы образовалось полностью развитое волнение, ветер должен быть продолжительное время и на большом пространстве. Пространство, подвергающееся воздействию ветра, называется областью разгона. Чтобы создать полностью развитое волнение, сильному ветру нужно быть дольше, чем слабому. Если область разгона недостаточно велика, волны могут выйти за ее пределы, прежде чем ветер завершит их развитие [4]. Прогнозы волнения — хорошо разработанный раздел океанографии. Установлена зависимость между минимальным временем ветрового действия и разгоном, которые необходимы для появления полностью развитого волнения при разных скоростях ветра. Ясно, что условия для полностью развитого волнения на большей части океана, как правило, не выдерживаются либо из-за недостаточности суммарной энергии, либо из-за того, что максимум энергии приходится на более короткие периоды, или же потому, что наличная энергия распределяется в более широком диапазоне частот.

Для более детального исследования механизмов формирования цугов волн в условиях глубокой воды и уединенных (одиночных) волн в условиях мелкой воды нами были проведены эксперименты в лабораторном кольцевом аэрогидроканале [5, 6]. Внешний и внутренний его диаметры составляли соответственно 202 см и 165 см, высота — 40 см. Регистрация волн проводилась с помощью АЦП-платы компьютера. Были определены основные параметры волн, а также критерии, характеризующие условия, необходимые для возникновения ветровых уединенных волн. Уединенные волны возникали при начальных глубинах невозмущенной жидкости (что соответствует высоте воздушного коридора меньшей или равной 15.5 см). Конструктивные особенности канала ограничивали допустимые значения величиной в 14 см, таким образом, нами наблюдались уединенные волны, возникавшие при глубине жидкости в диапазоне от 11.5 до 14 см.

Было показано, что при увеличении скорости ветра до определенной величины при условии глубокой воды сначала формируются группы волн с одной максимальной по высоте (аналог девятого вала). Затем, по мере их развития, в условиях мелкой воды, когда длина волны больше глубины жидкости, возникает несколько уединенных волн (УВ), иногда до четырех, взаимодействие между которыми приводит к последовательному уменьшению их числа. В итоге формируется одна уединенная волна, высота которой периодически изменяется (примерно на 10

Анализ результатов экспериментов позволил вы-

явить следующие закономерности процесса генерации и трансформации ветровых уединенных волн: время образования уединенной волны зависит от скорости ветра в канале и уменьшается при ее увеличении, скорость распространения уединенной волны возрастает при увеличении глубины жидкости, а также при увеличении скорости ветра. Таким образом, скорость распространения наблюдавшихся уединенных волн зависела от глубины жидкости и скорости ветра и, в наших экспериментах, изменялась в пределах от 144 см/с до 164 см/с.

При развитии волны в результате действия ветра было проведено сравнение профилей уединенных волн с расчетом по формуле КдВ. Оно дает лишь качественное совпадение. Профиль ветровых волн деформирован: подветренных склон волны укручен, а наветренный — растянут. Эта деформация волны тем сильнее, чем больше значение скорости ветра. На рис. 1. приведено сравнение профилей ветровой уединенной волны при глубине 13.5 см и скорости ветра 10.5 см/с (толстая линия) и солитона КдВ (тонкая линия).



Рис. 1: Сравнение профиля ветровой уединенной волны в кольцевом канале с профилем, рассчитанным по уравнению КдВ

Там же было показано, что при развитии ветрового процесса, при определенной скорости ветра, периодически возникали цуги волн с наличием «девятого вала» (рис. 2). Слева представлены фрагменты волнограммы, где развитие волнения завершалось образованием уединенной волны (при скорости ветра 10 м/с), справа — в условиях, где ее формирования не последовало (при меньшем ветре 7 м/с).

На рис. 2 показано что после фрагмента волнограммы 2а с периодическими волнами, практически сразу следует фрагмент записи 2б, где формируются цуги волн. Следующим этапом (рис. 2,в) была «перемежаемость», после которой снова следовал участок с цугами и цикл повторялся. Как слева, так и справа видны те же последовательности «перемежаемостей» и цугов волн. С увеличением ветра цугообразование более выражено, но последовательность этапов сохранялась.

На основании наблюдений в морях и океанах, а так-

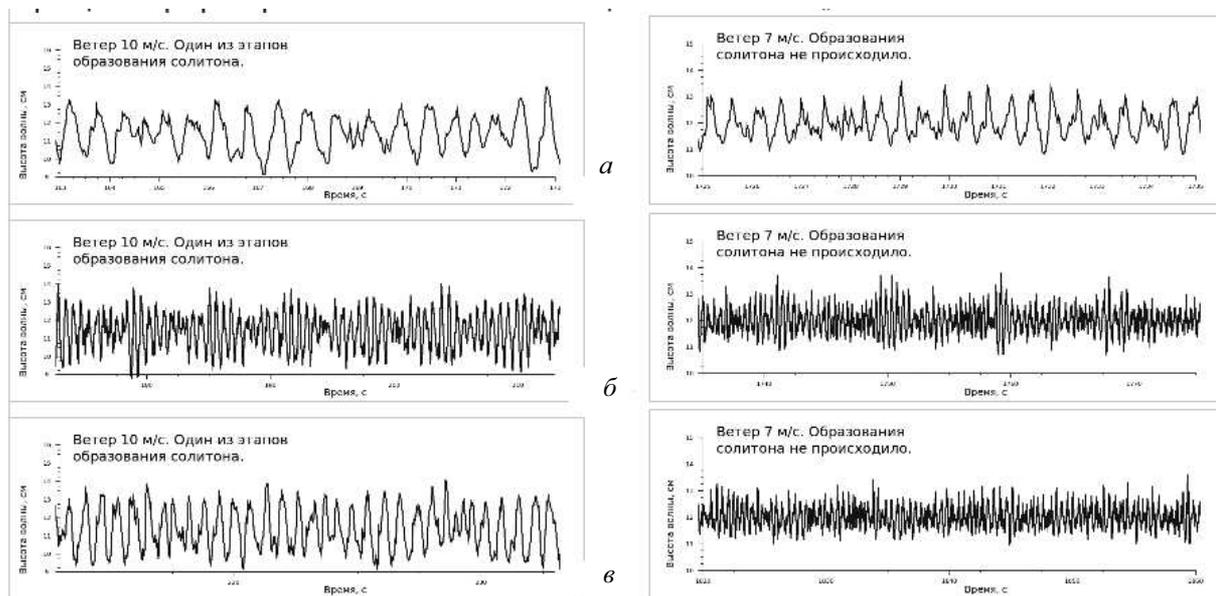


Рис. 2: Процесс формирования волн в кольцевом канале

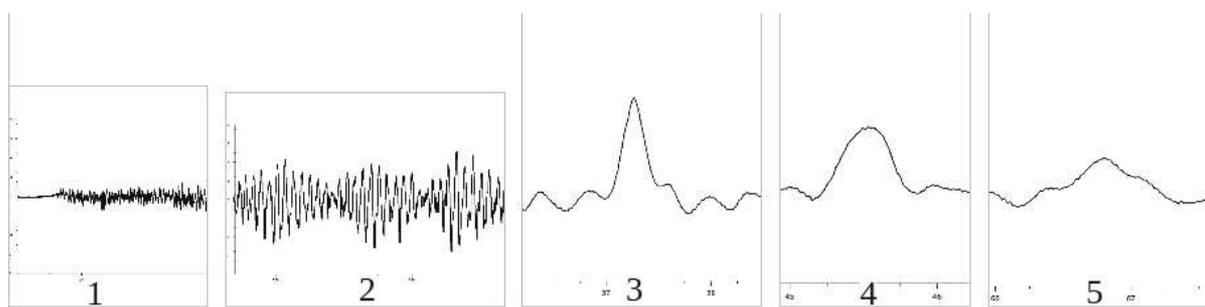


Рис. 3: Уединенная волна, возникающая под действием ветра и процесс ее затухания в кольцевом канале

же в результате лабораторных экспериментов в кольцевом канале показано, что уединенные ветровые волны (которые иногда принимаются за волны-убийцы) возникают только под действием ветра, а не появляются «ниоткуда», а при уменьшении ветра они медленно затухают, а не исчезают «в никуда» (рис. 3). Цифрами на рисунке обозначены: 1 — начальное слабое ветровое волнение при скорости ветра 10 м/с, 2 — образование цугов волн, 3 — формирование уединенной волны, 4 — уединенная волна после выключения ветра, 5 — деформированная уединенная волна через 5 минут после выключения ветра.

Кроме того в КК были проведены исследования формирования уединенных волн в двухслойной жидкости. На рис. 4 представлена так называемая «уединенная волна Рассела», которая наблюдалась в прямолинейном канале в двухслойной жидкости. Видны профили поверхностной уединенной волны и внутренней уединенной волны, созданных путем резкого воздействия на водную поверхность. При этом захватывалась вся толщина двухслойной жидкости. В этом случае про-

филь волн был «гладкий».

В последнее время, особенно после «новогодней волны», по мнению некоторых зарубежных и российских ученых принято считать, что в мировом океане якобы существует особый вид волн в виде «волн-убийц» (ВУ). Считается, что высота этих волн может достигать 30 м. Эти огромные одиночные волны возникают как бы «ниоткуда» и в считанные минуты исчезают «в никуда». Кроме того, ВУ возникают «сами по себе», как естественное явление. При этом не важно есть ли ветер или нет его. Более того, ВУ могут возникать из-за нелинейного взаимодействия волн друг с другом (явление волнового хаоса). Также механизм формирования волны-убийцы сравнивается с механизмом фокусировки лазерного излучения в твердом теле, приводящим к его локальному разрушению. Считается, что ВУ могут возникать как на гладкой водной поверхности, так и от волн зыби. Известно, что при любой степени волнения на поверхности воды присутствуют волны разных периодов, имеющие различные скорости распространения. Накладываясь друг на друга, они



Рис. 4: Уединенная волна Рассела в двуслойной жидкости

образуют группы, распространяющиеся со скоростью, отличной от скорости отдельных волн. Анализ наблюдений, проведенных автором в Тихом, Атлантическом океанах, а также в Черном и Средиземном морях, показал, что при условиях глубокого моря наблюдалось периодическое появление групп волн с наличием одной максимальной волны («девятый вал»). При уменьшении глубины эти волны укручивались и увеличивались в размерах.

В лабораторных условиях под действием ветра образовывались несколько уединенных волн, число которых по мере развития уменьшается и в итоге формировалась одна единственная уединенная волна, которая существовала до тех пор, пока был ветер. С дру-

гой стороны, проведенные исследования в КК показали процесс развития волн от капиллярных до одной ветровой уединенной волны. Никаких мистических особенностей ни в океане, ни в лабораторных условиях обнаружено не было, даже «новогодняя волна», являющаяся оплотом для сторонников волн-убийц, опровергает наличие мифических волн-убийц в открытом океане и, тем более, на берегу. Важным является достоверный прогноз морского волнения. В этом случае необходимо использовать механизмы взаимодействия атмосферы и океана. В океанах и морях состояние водной поверхности зависит от скорости ветра, времени его действия и направления.

- [1] Филиппов А. Т. Многоликий солитон. М.: Наука, 1985.
 [2] Lighthill M. J. J. Inst. Math. Appl. 1965. **1**. P. 269.
 [3] Захаров В. Е. ПМТФ. 1968. № 2, С. 86.
 [4] Дрейк Ч., Имбри Дж., Кнаус Дж., Турекиан К. Океан сам по себе и для нас. М.: «Прогресс», 1982.

- [5] Шелковников Н. К. Письма в ЖЭТФ 2005. **82**, вып. 10. С. 720.
 [6] Шелковников Н. К. Изв. РАН. Сер. физ. 2016. **80**, № 2, С. 229.

Storm waves in ocean

N.K. Shelkovnikov

Department of Physics of sea and inland water, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru

A study of the formation of solitary waves and wave trains was made in a ring aero-hydrochannel. It is shown that with increasing wind speed in deep water conditions, wave trains are formed in the aerobasin, and solitary waves are observed only in shallow water.

PACS: 92.10.H- 92.10.hb.

Keywords: rogue waves, round aerobasin, wave train, solitary waves.

Received 29 June 2017.

Сведения об авторе

Шелковников Николай Константинович — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор-консультант; тел.: (495) 441-53-06, e-mail: shelkovnikov@phys.msu.ru.