

УДК 551.466

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ПРИБРЕЖНЫЕ ОКЕАНОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Розглянуто проблему зміни структури поверхневих хвиль і формування ударних навантажень при їх руйнуванні в безпосередній близькості від берегової лінії. Для попередніх оцінок параметрів поверхневих хвиль використаний прикладний пакет «SWAN», більш детальні розрахунки змін довжини і висоти хвиль, формування гребеня хвилі, яка руйнується, і ударного навантаження виконані по гідродинамічним і емпіричним співвідношенням

Ключові слова: поверхнева хвиля, океанотехнічні структури, нелінійні хвилі, океанотехнічні споруди, гідродинаміка, рівняння Кортевега-де Фрізе

Рассмотрена проблема изменения структуры поверхностных волн и формирования ударных нагрузок при их разрушении в непосредственной близости от береговой черты. Для предварительных оценок параметров поверхностных волн использован прикладной пакет «SWAN», более детальные расчеты изменений длины и высоты волн, формирования гребня разрушающейся волны и ударной нагрузки выполнены по гидродинамическим и эмпирическим соотношениям

Ключевые слова: поверхностная волна, океанотехнические структуры, нелинейные волны, океанотехнические сооружения, гидродинамика, уравнение Кортевега-де Фризе

В. М. Кушнир

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник

Отдел дистанционных методов исследований

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
ул. Капитанская 2, г. Севастополь, Украина, 99011

E-mail: kushnirv@yahoo.com

В. Р. Душко

Кандидат технических наук,
доцент, заведующий кафедрой*

E-mail: nikasvs@mail.ru

В. А. Крамарь

Доктор технических наук, профессор, проректор**

E-mail: kramarv@mail.ru

*Кафедра океанотехники и кораблестроения

**Севастопольский национальный технический университет
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 99053, Украина

1. Введение

Освоение морских энергетических ресурсов относится к наиболее перспективным и значимым направлениям экономического развития Украины. В настоящее время работы этого направления выполняет Государственное акционерное общество (ГАО) «Черноморнефтегаз», основные объекты которого находятся на северо-западном шельфе Черного моря и в некоторых прибрежных районах западного и южного берегов Крыма [1]. Их положение показано на рис. 1.

Для надежной и долгосрочной эксплуатации этих объектов необходимо иметь оценки параметров экстремальных воздействий от штормовых поверхностных волн при их выходе в ближнюю прибрежную зону, т. е. на глубины от 1 до 5...7 м.

Здесь поверхностные волны, пришедшие из открытого моря, теряют свою устойчивость, образуются гребни и происходит их разрушение. Это сопровождается значительными ударными нагрузками. Известны примеры, когда под действием этих нагрузок ломались массивные железобетонные волноломы, на берега выбрасывало большие валуны, разрушались покрытия набережных.

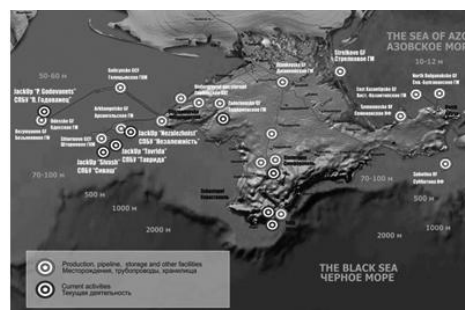


Рис. 1. Положение основных объектов ГАО «Черноморскнефтегаз» в Черном море и в береговой зоне Крыма

Во время сильного шторма 10 – 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе затонули сухогрузы «Вольногорск», «Нахичевань», «Ковель», «Хачь Измаил», танкер «Волгонепфть-139» раскололся на две части, в море попало около 1300 т мазута и 6800 т серы. Всего сигналы SOS передали 20 судов. В этот же период большой ущерб был нанесен набережной и прибрежным

строениям Севастополя [2, 3]. Подобные природные явления происходят в Азово-черноморском бассейне каждые несколько лет.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Результаты экспериментальных исследований трансформации поверхностных волн на пологих откосах представлены в [5, 6]. В этих работах представлены эмпирические соотношения для расчета изменений высоты и длины волны, а также глубины ее обрушения.

Существует большое количество моделей разрушения поверхностных волн при уменьшении глубины. Наиболее распространенная теория обрушения крупных волн Митчела - Хавелона основана на предельном профиле волны, который определяется из условия $7H_{kr} = \lambda_{kr}$, где H_{kr}, λ_{kr} – критические величины высоты и длины волны. Эта зависимость находится в хорошем соответствии с данными лабораторных экспериментов [4, 5].

Описание структуры поверхностных волн при уменьшении глубины их распространения может быть выполнено на основе модели Стокса для волн конечной амплитуды при условии, что отношение глубины к длине волны меньше 0,1 или на основе теории кноидальных волн по модели Кортевега и де Фриза [6, 7].

Отдельные аспекты, связанные с распространением поверхностных волн на малые глубины и их разрушения, рассмотрены в [8].

Давление на поверхности различных систем и сооружений при воздействии волн вычисляют на основе различных эмпирических соотношений [7, 9 – 14].

В отличие от перечисленных работ авторы поставили перед собой задачу определить в рамках единой методики и конкретного примера весь комплекс расчетов, связанных с трансформацией штормовых волн при их выходе на малые глубины и формированием ударных нагрузок при разрушении таких волн.

3. Цель и задачи исследования

Учитывая указанные выше факты, целью настоящей работы является оценка характеристик трансформации и разрушения штормовых поверхностных волн при их выходе на глубины порядка первых метров. Эта проблема в целом не является новой, и ее анализ выполнен во многих публикациях. В [15] рассмотрены трансформации поверхностных волн, распространяющихся на мелководье, особенностью которых является формирование второй гармоники волновых колебаний уровня моря, с периодом вдвое меньше периода основной волны. В такой волне происходит непрерывное нарастание амплитуды второй гармоники при движении волны вдоль наклонного дна. Как только амплитуда обертона станет примерно равной амплитуде основной волны, она разрушится, причем, как показано, к берегу подходят исключительно двумерные волны после полного разрушения трехмерных. Условие разрушения таких волн можно записать следующим образом:

$$\frac{6\pi H_0 g x_{cr}}{4\lambda c^2} \approx 1, \quad (1)$$

где H_0 – амплитуда двумерной волны, λ – ее длина, $c = \lambda / T_w$ – фазовая скорость, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Например, если высота волны равна 6 м, длина – 40 м, период – 6 с, то расстояние x_{cr} , на котором происходит разрушение волны, равно примерно 6,4 м, время разрушения – порядка 1 с, что не противоречит наблюдениям.

4. Предварительные расчеты параметров поверхностных волн

Нелинейные эффекты поверхностных гравитационных волн проявляются при взаимодействии движущейся волны с поверхностью дна. При этом вследствие трения о дно ближняя к нему часть волны тормозится, а профиль волны начинает изменяться, что проявляется в увеличении высоты волны, появлении движущегося гребня и разрушении волны. Из многочисленных экспериментов известно, что нелинейные эффекты зависят от отношения высоты волны H к ее длине λ и заметно проявляются при отношении $(H/\lambda) \geq 0,1$. На рис. 2. показано пространственное распределение параметра H/λ в Азово-черноморском бассейне во время одного их сильнейших штормов 10 – 11 ноября 2007 г.

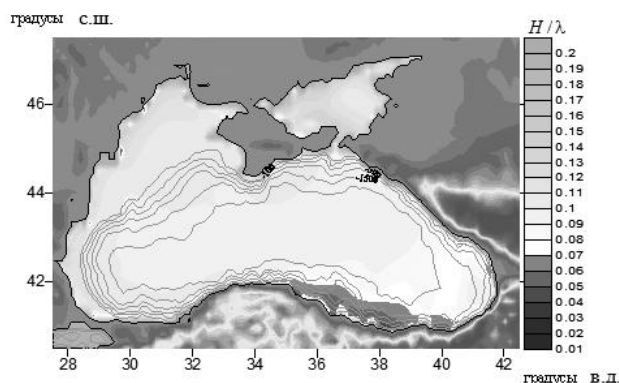


Рис. 2. Пространственное распределение параметра H/λ в Азово-черноморском бассейне во время шторма 10 – 11 ноября 2007 г.

Видно, что нелинейные эффекты проявляются главным образом в прибрежной зоне Черного моря, в Азовском море и в Керченском проливе, где под действием этих нелинейных волн произошло крушение нескольких судов, в морскую среду попал большой объем нефтепродуктов, серы и других загрязнителей.

При увеличении высоты волны по отношению к ее длине под влиянием нелинейных эффектов она становится неустойчивой и разрушается. При этом высвобождается ее энергия, равная $E = 0,5\rho g a^2 \lambda$, Дж/м, что сопровождается большой ударной нагрузкой на океанотехническую установку или берег, если волна разрушается на их поверхности.

Параметры H/λ определяются на основе предварительного расчета поля поверхностных волн для Азово-черноморского бассейна по программе SWAN [16 – 18]. На рис. 3 – 7 показаны поле скорости штормового ветра (данные атмосферной модели SCERON), высоты волн 3% обеспеченности, их длины, периоды и направление распространения.

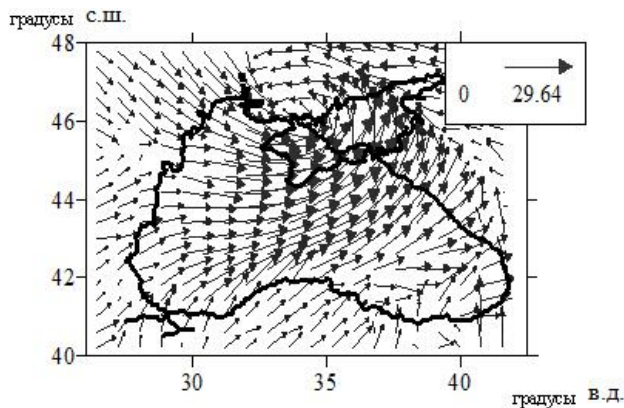


Рис. 3. Скорость ветра по данным SCERON на 08 час. 11 ноября 2007 г.

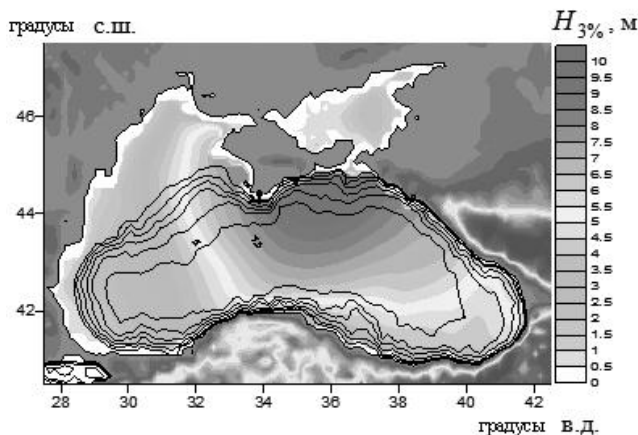


Рис. 4. Высоты волн 3% обеспеченности, м.

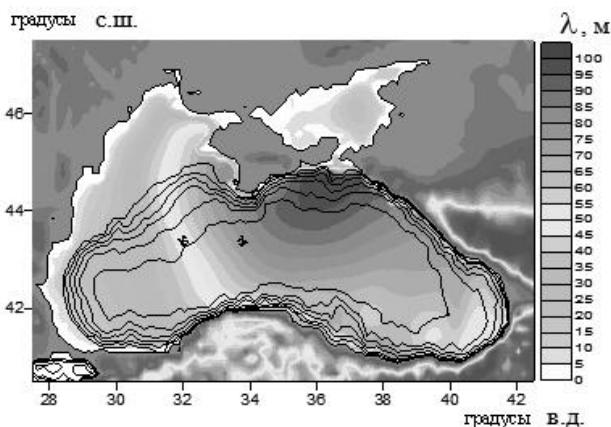


Рис. 5. Длины волн, м

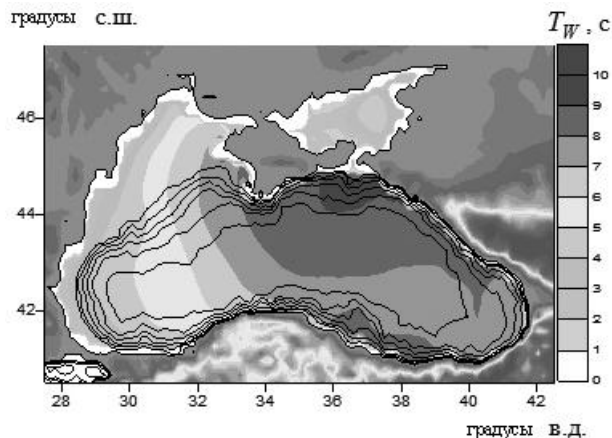


Рис. 6. Периоды волн, с

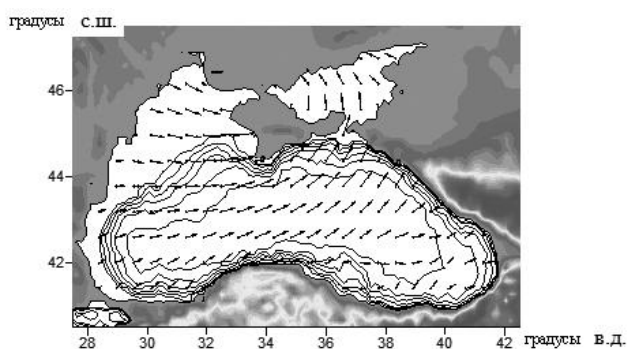


Рис. 7. Направление распространения волн по данным о волновой скорости на морской поверхности

5. Трансформация волн на наклонном дне

В качестве конкретного примера рассмотрена трансформация волны от точки с координатами 44,46° с. ш., 33,51° в. д. в западном направлении, сторону берега, находящегося на расстоянии 1,7 км. Рассматриваются штормовые условия (рис. 2 – 7). Начальная высота волны H в указанной точке равна 6,2 м, период $T = 6,8$ с, глубина $h = 86$ м, она изменяется в зависимости от расстояния до берега по линейному соотношению $h = 86 - 0,0506x$, длина волны λ по дисперсионному соотношению для линейных волн равна 72,2 м.

Из экспериментальных исследований [5] известно, что, начиная с некоторой глубины h_b , длина волны $\lambda(h)$ изменяется с глубиной h следующим образом:

$$\lambda(h) = 1,6\lambda_n^{0,666}h^{0,333}, \tag{2}$$

где λ_n - начальная длина волны.

Глубину h_b определим из условия: $\lambda_n = 1,6\lambda_n^{0,666}h_b^{0,333}$, или $h_b = 0,244\lambda_n$, что в рассматриваемом случае равно 17,62 м.

Таким образом, нелинейные эффекты, связанные с трансформацией поверхностной гравитационной волны из-за влияния дна, начинают проявляться с глубины примерно 18 м на расстоянии 348,6 м от береговой линии. Изменение длины волны в зависимости от

расстояния от берега x вычисляется по следующему соотношению:

$$\lambda(x) = 27,26h^{0,333} = 10,24x^{0,333}. \quad (3)$$

Изменение высоты волны при изменении глубины или расстояния от берега вычисляется двумя независимыми методами.

Используется следующее эмпирическое соотношение:

$$H_1(h) = 0,54H_n(\lambda_n/h)^{0,25}. \quad (4)$$

Анализируется баланс энергии $E = 0,5\rho g a^2 U$, которую волна переносит в единицу времени с учетом рефракции и при изменении групповой скорости U с изменением глубины $a = 0,5H$ амплитуда волны, $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

$$U = \frac{\lambda}{2T} \left[1 + \frac{4\pi h}{\lambda \text{sh}(4\pi h/\lambda)} \right]. \quad (5)$$

Если в области больших глубин ($h > 20 \text{ м}$) волна подходит к береговой линии под углом θ_n с фазовой скоростью $c_n = \lambda_n/T$, то при изменении фазовой скорости из-за уменьшения длины волны угол θ изменяется по

соотношению Снеллиуса: $\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta} = \frac{c_n}{c}$ и, пренебрегая

потерями энергии из-за диссипативных процессов, можно записать:

$$\frac{H}{H_n} = \sqrt{\frac{U_n \sin \theta_n}{U \sin \theta}}, \quad (6)$$

где H_n - начальная высота волны.

В рассматриваемом случае $\theta_n = 90^\circ$ (начальная волна направлена под углом 90° к береговой линии) и

$$H(h) = H_n \sqrt{\frac{U_n \lambda_n}{U(h) \cdot \lambda(h)}}. \quad (7)$$

Глубина h_{kr} , на которой волна начинает терять устойчивость, определяется по эмпирическому соотношению

$$h_{kr} = 4.368 H_n^{1,714} \lambda_n^{-0,714}. \quad (8)$$

Для рассматриваемых условий эта величина равна 4,7 м. Другой независимый метод определения критической глубины основан на том, что по многочисленным экспериментальным данным разрушение волны происходит, когда ее высота составляет 0,143 от длины волны. Расчеты показали, что это условие выполняется для рассматриваемого случая при $h \cong 4,5 \text{ м}$, что является близким к приведенной выше оценке.

Завершающей стадией формирования волны при ее выходе на берег является образование гребня, который может рассматриваться как уединенная волна, соответствующая уравнению Кортевега-де Фризе. Для расчета профиля движущегося гребня необходимо вы-

числить масштаб $b(h) = h^2(h+a)/3a$, где $a = 0,5H(h)$ - амплитуда волны. Физический смысл этого параметра состоит в том, что характеризует расстояние по обе стороны от гребня, на котором сосредоточена практически вся энергия волны (95 - 98 %).

Профиль движущегося гребня волны и скорость его движения вычисляются по соотношениям

$$\xi(q) = 0,5H(q) \text{sch}^2\left(\frac{q}{2b}\right), \quad c_g = \sqrt{g(h+a)}, \quad (9)$$

где q - горизонтальная координата, отсчитываемая от вершины гребня

На основе приведенных выше соотношений, на рис. 8 показана структура штормовых поверхностных волн при их выходе на берег. Отчетливо видно изменение высоты и длины волны при изменении глубины моря. На завершающей стадии формируется гребень волны, который движется с фазовой скоростью 8 - 9 м/с, в то время как орбитальная скорость составляет около 4 м/с. В таких условиях волна быстро разрушается.

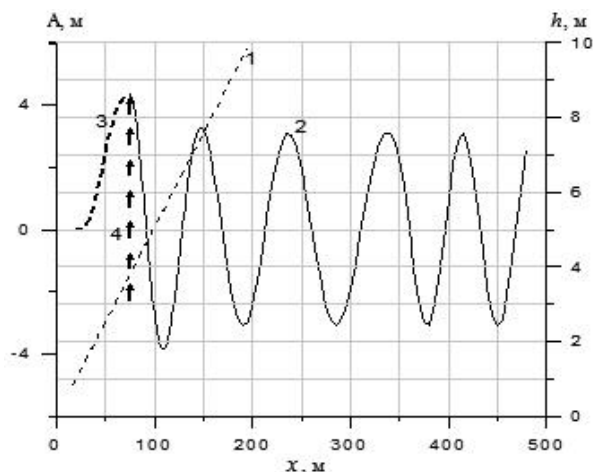


Рис. 8. Структура штормовых волн на расстоянии x от береговой линии: 1 - глубина h , м; 2 - вертикальное смещение морской поверхности A , м; 3 - гребень волны; 4 - положение области, где волна теряет устойчивость и начинает формироваться ее гребень (глубина около 4 м.)

6. Ударная нагрузка при разрушении волны

Известно [15], что динамическое давление, появляющееся при ударе волны, равно:

$$P_d = \rho(V_{\max})^2, \quad (10)$$

где V_{\max} - максимальная волновая скорость, равная $\pi\xi(0)/T$.

Помимо динамического давления, волна оказывает на препятствие гидростатическое давление, зависящее от высоты гребня над уровнем спокойной поверхности моря. Эта величина состоит из двух слагаемых, первое равно $\rho g(\xi/2)$, второе - $\frac{\rho g \xi^2}{4\lambda}$ - определяется высо-

той центра орбиты волнового движения над уровнем спокойной поверхности моря.

Если считать, что максимальная сила ударной нагрузки действует на уровне средней (спокойной) поверхности моря, то ее величину можно оценить по следующему соотношению:

$$p_s = \rho(c_g)^2 + \frac{\rho g \xi}{2} + \frac{\pi \rho g \xi^2}{4\lambda}, \text{ кПа.} \quad (11)$$

Зависимость ударной нагрузки p_s от расстояния до береговой линии и глубины моря представлена на рис. 9. Видно, что максимальная нагрузка в рассматриваемом случае соответствует глубине 4 – 4,5 м и достигает 6,3 тс/м². Эта величина является типичной для штормовых волн Черного моря [19]. В береговой зоне Атлантического океана при сильных штормах величина p_s достигает 30 – 40 тс/м² [19 – 22].

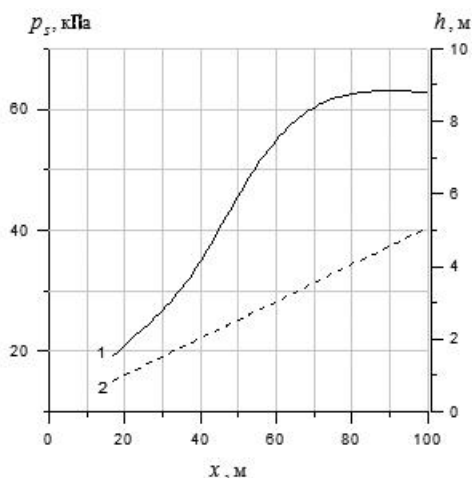


Рис.9. Зависимость ударной нагрузки при разрушении волны p_s , кПа (1) от расстояния до берега и глубины (2) обрушения волны

Зависимость ударной нагрузки при разрушении волны можно оценить другими методами.

1. Выше, был выполнен расчет скорости движения гребня c_g волны перед ее разрушением. Так как перенос массы гребня происходит с этой скоростью, динамическое давление можно вычислить по соотношению:

$$p_d^* = \rho c_g^2. \quad (12)$$

При средней скорости движения гребня, равной 8,3 м/с, $p_d^* = 70,268$ кПа или 7,02 тс/м². Эта оценка соответствует приведенной выше с относительной погрешностью меньше 10 %.

2. Потенциальная энергия гребня перед обрушением W_p вычисляется по соотношению:

$$W_p = \rho g \int_0^{h_0} \xi(h) h dh, \quad (13)$$

где h_0 – глубина обрушения гребня, равная в рассматриваемом случае 3,75 м. Если считать, что эта потенциальная энергия трансформируется в кинетическую энергию разбивающейся волны, то

$$W_p = \rho g \int_0^{h_0} \xi(h) h dh = W_k = \frac{MV^2}{2} = 0,5V^2 \rho g \int_0^{h_0} \xi(h) dh, \quad (14)$$

где V – скорость переноса энергии при разрушении волны. Динамическое давление, как это было показано выше равно $p_d^* = \rho V^2$ и для рассматриваемого случая составляет 63,205 кПа или 6,32 тс/м², что хорошо согласуется с полученными выше оценками.

7. Выводы

1. Нелинейные поверхностные волны, возникающие при сильных штормах, приурочены, главным образом, к прибрежной зоне Азово-черноморского бассейна, где происходит взаимодействие движущихся волн с тормозящей поверхностью дна. При этом наблюдается увеличение высоты волн и уменьшение их длин. Предварительные расчеты параметров волн для диапазона глубин, где взаимодействие с дном проявляется незначительно, определяются численными методами на основе прикладного пакета «SWAN», который свободно распространяется в сети ИНТЕРНЕТ. Дальнейшие расчеты параметров волн выполняются на основе приведенных в работе эмпирических и полуэмпирических соотношений.

2. Перед обрушением на переднем фронте волны образуется гребень, структура которого соответствует уединенной волне, а профиль – уравнению Кортевега-де Фризе. Перенос массы гребня волны осуществляется со скоростью c_g , равной в среднем 8,3 м/с.

3. Расчеты ударной волновой нагрузки, выполненные тремя методами, дали близкие результаты (6,4 – 7,02 – 6,3 тс/м²). Эти данные соответствуют независимым оценкам для условий Черного моря

4. Представленные в настоящей работе результаты следует рассматривать как предварительные оценки, полученные при значительном количестве допущений. Тем не менее, из-за недостаточной изученности проблемы и, учитывая соответствие результатов независимым источникам, их можно использовать в задачах, связанных с оценками воздействия штормовых волн на прибрежные океанотехнические и гидротехнические сооружения и установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИР "Нелинейная динамика океанотехнических установок на шельфе Азово-Черноморского бассейна", шифр «Шельф», № г/р 0113U001254.

Литература

1. ГАО «Черноморнефтегаз»: [сайт]. [2013] URL: <http://blackseagas.com> (дата обращения 28.07.2013).
2. Кушнир, В. М. Реакция Азово-Черноморского бассейна на интенсивный циклон 10-11 ноября 2007 г по данным дистанционного зондирования [Текст]/ В. М. Кушнир, С. В. Федоров, Л. А. Петренко // Морские испытания. - 2008. - №1. - С. 62-81.
3. Матишов, Г. Г. Условия и последствия аварий судов в Керченском проливе во время шторма 11 ноября 2007 г. [Текст] /

- Г. Г. Матишов, Р. М. Савицкий, Ю. И. Ижебейкин // Вестник Юного научного центра РАН. - 2008. - Т.4. № 3. - С. 54-63.
4. Смирнов, А. А. Изменение высоты и длины волны на пологих откосах [Текст] / А. А. Смирнов // Волновые исследования. Москва: Госстройиздат. - 1962. - С. 37-60.
 5. Смирнов А. А. Глубина обрушения волны на пологих откосах [Текст] / А. А. Смирнов // Волновые исследования. Москва: Госстройиздат. - 1962. - С. 177-184.
 6. Skjelbreia L. Fifth order gravity wave theory [Текст] / L. Skjelbreia, A. Hendrickson // Proc. VII Conference on Coastal Engineering. - 1961. - P. 184-196.
 7. Доусон, Т. Проектирование сооружений морского шельфа [Текст] / Т. Доусон // Ленинград: Судостроение. - 1986. - 286 с.
 8. Боуден, К. Физическая океанография прибрежных вод [Текст] / Москва: Мир. - 1988. - 324 с.
 9. Williams, M. S., Thompson R.S.G., Houlsby G.T. Non-linear dynamic analysis of offshore jack-up units [Текст] / M. S. Williams, R.S.G. Thompson, G.T. Houlsby // Computers & Structures. - 1998. - V.69. № 2. - P. 171-180.
 10. Wolfram, J. On alternative approaches to linearization and Morison's equation for wave forces [Текст] / J. Wolfram // Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical Physical A. - 1999. - V/455. - P. 2957-2974.
 11. Tung, C. C. Total wave force on cylinder considering free surface fluctuation [Текст] / C. C. Tung // Applied Ocean Res. - 1996. - V.18. № 1. - P. 37-43.
 12. Isaacson, M. Correction factors for nonlinear run up and wave-forces on a large cylinder [Текст] / M. Isaacson, K. F. Cheung // Canadian J. of Civil Engineering. - 1994. - V.21. № 5. - P. 762-769.
 13. Zhou, X. C. Hydrodynamic interaction between two vertical cylinder in water waves [Текст] / X. C. Zhou, D. G. Wang, A. T. Chwang // Applied Mathematics and Mechanics. - 1997. - V.18. № 10. - P. 927-940.
 14. Harland, L. A. The extreme force on an offshore structure and its variability [Текст] / L. A. Harland, P. H. Taylor, J. H. Vugts // Applied Ocean Res. - 1998. - V.20. № 1-2. - P. 3-14.
 15. Шулейкин, В. В. Физика моря [Текст] / В. В. Шулейкин // Москва: изд-во АН СССР. - 1953. - 989 с.
 16. SWAN. Technical documentation. Delft University of Technology, Faculty of Civil Eng. and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section. - 2006. - 88 p.
 17. Booij, N. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation [Текст] / N. Booij, R. C. Ris, L.H. Holthuijsen // Geoph. Research. - 1999. - V.104. C4. - P. 7649-7666.
 18. Федоров, С. В. Особенности использования модели SWAN для расчета поверхностных волн в Керченском проливе [Текст] / С. В. Федоров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - 2008. - №16. - С. 303-313.
 19. «Большой информационный архив»: [сайт]. [2 марта 2010 г] URL: <http://big-archive.ru>.
 20. Якушова, А. Ф. Общая геология [Текст] / А. Ф. Якушова, В. Е. Хаин, В. И. Славин // М.: Изд-во МГУ. - 1988. - 448 с.
 21. Геологическая деятельность морей и океанов [Сайт]: Важнейшие геологические процессы и их экологические особенности. – URL: <http://3ys.ru/vazhnejshie-geologicheskie-protsessy-i-ikh-ekologicheskie-osobennosti/geologicheskaya-deyatelnost-morej-i-okeanov.html>
 22. Энергия, мощность и сила морских ветровых волн [Сайт]: Все о море. – URL: ehmore.ru/...volny/energiya-moshhnost-i-sila-morskix-ventrovyyx-voln.html