

Д.В. Корзинин

*Институт океанологии РАН им. П.П.Шириова, г.Москва***ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛН НАД ПОГРУЖЕННЫМ БАРОМ  
ПО ДАННЫМ ФИЗИЧЕСКОГО И  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Исследуется влияние подводных структур со значительным заглублением на трансформацию волн. С помощью физического моделирования в волновом лотке и математической модели *SWASH* оцениваются изменения высоты волн и их периода под воздействием подводной структуры. Широкий спектр волновых режимов, исследованных в масштабе 1:20 с ограниченным количеством датчиков волнения на физической модели в волновом лотке, анализируется повторно с помощью математической модели. Это позволило получить данные об изменении волновых параметров уже в реальном масштабе и с расширенным количеством датчиков, что важно с практической точки зрения. Выявлена возможность уменьшения высоты волн на 60 % и периода волн на 25 % при разных соотношениях параметров волнового режима и сооружения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *подводные структуры, коэффициент трансформации, изменение периода волн*

**Введение.** Использование заглубленных подводных структур (баров) является принципиально новым инженерным решением при формировании береговой и портовой инфраструктуры и тем самым имеет большое практическое значение. Используемые в современной практике подводные волноломы, как правило, имеют небольшое заглубление (не более 0,75 м согласно действующей нормативной документации [1]), что отрицательно влияет на судоходство и экологические аспекты освоения береговой зоны, такие как эстетическая привлекательность побережья и водообмен между мелководной зоной и внешней частью акватории. Применение заглубленных структур поможет решить эти проблемы и позволит воздействовать на волны в принципиально новом качестве.

Значительная часть исследований изменения волн в береговой зоне при использовании подводных структур содержит анализ коэффициента трансформации ( $K_{tr}$ ), т.е. влияния структур на изменение высоты волны:

$$K_{tr} = \frac{H_{s_{tr}}}{H_{s_{in}}}, \quad (1)$$

где  $H_{s_{tr}}$  – значительные высоты волн после прохождения ими бара и  $H_{s_{in}}$  – значительные высоты волн перед баром. Большинство физических экспериментов, например, [2 – 4], определено, что коэффициент трансформации уменьшается при меньшем относительном заглублении ( $d_{bar}/H_{s_{in}}$ ) и увеличении относительной длины структуры ( $L_{bar}/L$ ), где  $d_{bar}$  – глубина над баром,  $L_{bar}$  – длина верхней поверхности бара и  $L$  – длина волны перед баром (указанные параметры структуры и подходящих волн представлены на рис.1). Было выявлено, что значения коэффициента трансформации могут достигать 0,25,

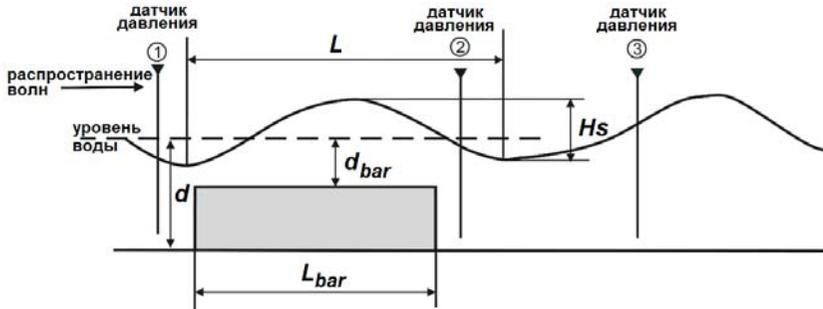


Рис. 1. Исследуемые волновые параметры и морфометрические параметры заглубленного бара.

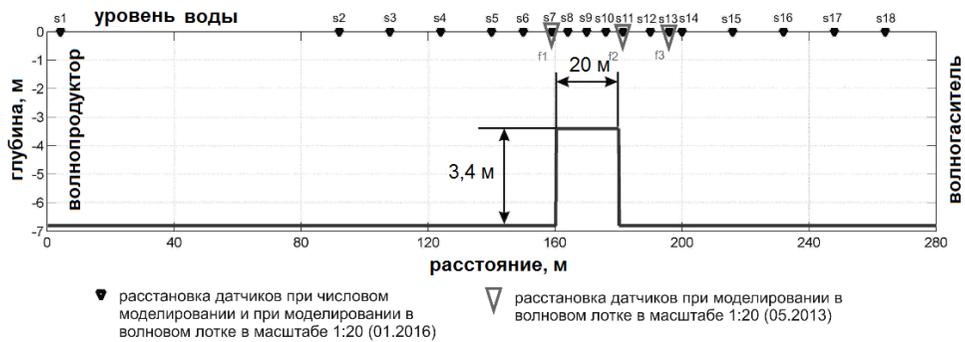
т.е. высота волны под влиянием сооружения может уменьшаться на 75 %. В меньшей степени исследовано влияние подводных структур на период волн. Отдельными исследованиями получены результаты, предсказывающие уменьшение среднего периода до 25 – 40 % [5, 6]. Сохраняет актуальность исследование влияния заглубленных структур на волновые параметры с определением возможности уменьшения высоты волны и периода с применением не только физических моделей в волновом лотке, но и математического моделирования, что позволит осуществить исследование в реальном масштабе.

**Методика исследования.** Исследование трансформации волн над непроницаемым баром основывалось на данных физических экспериментов в волновом лотке филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега» (г.Сочи), осуществленных в мае 2013 г. и январе 2016 г. Параметры волнового лотка: длина 20 м, ширина 0,6 м и высота 1 м. Одновременно использовалась математическая модель *SWASH* [7], позволяющая получить хронограммы в любых точках исследуемой области при различных рельефах дна.

Оба физических эксперимента осуществлялись в масштабе 1:20 и принципиально отличались диапазоном тестируемых волновых режимом и количеством используемых датчиков для записи хронограмм волнения. При первом эксперименте (май, 2013 г.) в волновом лотке исследовано 23 волновых режима с использованием трех датчиков волнения (рис.1). Во время второго эксперимента (январь, 2016 г.) были исследованы 8 волновых режимов, но с использованием уже 18-ти датчиков волнения. При математическом моделировании была предпринята попытка повторить эксперимент в реальном масштабе со всем спектром волновых режимов, тестируемых во время физических экспериментов, с максимально полным количеством датчиков (рис.2). Возможности модели *SWASH* были использованы, во-первых, для получения более полной картины для исследований, осуществленных ранее в волновом лотке, когда технические возможности не позволяли использовать должное количество волновых датчиков, и, во-вторых, для перехода от масштабной модели к реальному масштабу.

Волновые параметры и морфометрические характеристики подводной структуры для численного моделирования были пересчитаны для реального масштаба в соответствии с условием геометрического подобия и равенства числа Фруда [8 – 10]:

$$Fr = Hb \cdot a, \quad (2)$$



Р и с . 2 . Схема экспериментальной установки при моделировании в *SWASH* в реальном масштабе.

где  $H_r$  – средняя высота волны в реальном масштабе;  $H_b$  – средняя высота волны в масштабе модели в волновом лотке;  $a$  – масштабный коэффициент (в нашем случае  $a = 20$ );

$$X_r = X_b \cdot a, \quad (3)$$

где  $X_r$  – линейные характеристики структуры в реальном масштабе;  $X_b$  – линейные характеристики структуры в масштабе модели в волновом лотке;

$$T_{m,r} = T_{m,b} \cdot \sqrt{a}, \quad (4)$$

где  $T_{m,r}$  – средний период в реальном масштабе;  $T_{m,b}$  – средний период в масштабе модели в волновом лотке.

В реальном масштабе заглубленный сплошной бар, расположенный на горизонтальном дне, имел длину 20 м и высоту 3,4 м. Глубина воды перед баром составила 6,8 м (рис.2). В численном эксперименте использовалось 18 виртуальных датчиков (s1 – s18), расположенных в соответствии со схемой для второго эксперимента в волновом лотке (январь 2016 г.). Помимо этого, датчики s7, s11 и s13 по своему положению совпадали с местом установки датчиков f1, f2 и f3 при проведении первого физического эксперимента (май 2013 г.). Волногашение в лотке обеспечивалось наброской из моделей фасонных блоков – гексабитов, в то время как в модели *SWASH* в правой части расчетной области для минимизации эффекта отражения подходящих волн использовалась функция, обеспечивающая максимальное рассеяние волновой энергии (*radiation*). Численная модель в реальном масштабе имела пространственное разрешение расчетной сетки 0,2 м.

При эксперименте в волновом лотке волнение воспроизводилось в течение 1 – 2 мин. Частота опроса датчиков при эксперименте в мае 2013 г. составляла 17 Гц и при эксперименте в январе 2016 г. 12 – 15 Гц. При использовании модели *SWASH* волнение воспроизводилось в течении 180 с и имело разрешение по времени 0,01 с.

После обработки хронограмм, полученных в волновом лотке и с помощью модели *SWASH*, вычислялись волновые параметры: значительная высота волны ( $H_s$ , м) и средний период ( $T_m$ , с). Их вычисление осуществлялось согласно зависимостям:

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0}, \quad (5)$$

где  $m_0$  – дисперсия ( $S$  – спектральная плотность определенного значения частоты волновых колебаний,  $f$  – частота), и

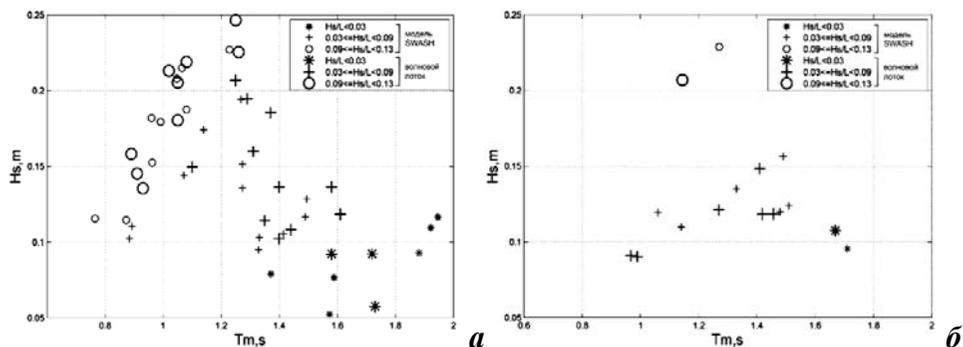
$$T_m = \frac{\int Sdf}{\int Sfdf}. \quad (6)$$

Длина волны ( $L$ , м) оценивалась в соответствии с соотношением для глубокой воды  $\left(L = \frac{gTm^2}{2\pi}\right)$ , а крутизна волн равнялась  $Hs/L$ .

Все исследуемые волновые режимы были разделены на три типа в зависимости от их крутизны ( $Hs/L$ ):

- $Hs/L \leq 0,03$  – низкие и пологие волны, проходящие над структурой без значимых изменений волновых параметров;
- $0,03 < Hs/L \leq 0,09$  – волны средней крутизны, проходящие над структурой с наиболее эффективным изменением волнового периода;
- $0,09 < Hs/L \leq 0,13$  – крутые волны, проходящие над структурой с наиболее эффективным изменением высоты волны.

Все исследуемые волновые параметры в масштабе 1:20 представлены на рис.3. Соотношение масштабных значений и реальных параметров исследуемых волн представлено в таблице.



Р и с . 3 . Сопоставление исследуемых волновых режимов в масштабе 1:20 при физическом и численном моделировании (эксперимент № 1, май 2013 г. (а); эксперимент № 2, январь 2016 г. (б)).

Т а б л и ц а . Пример соответствующих волновых режимов для физического моделирования (масштаб 1:20) и численного моделирования (в реальном масштабе).

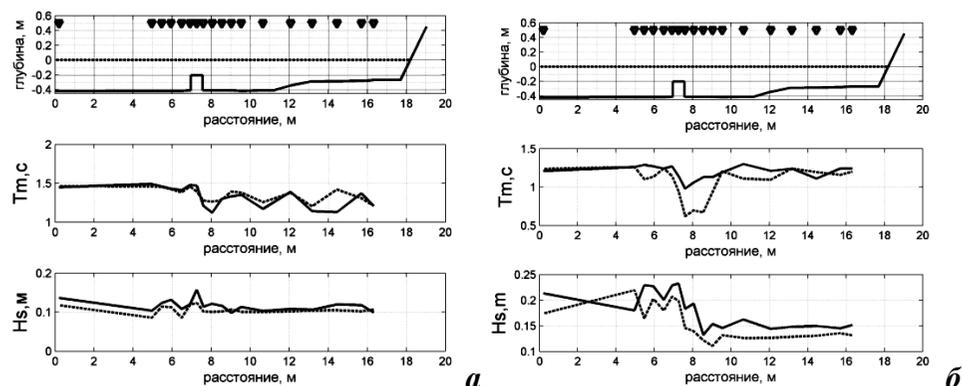
вид моделирования № эксперимента	физическое моделирование (масштаб 1:20)		численное моделирование в <i>SWASH</i> (реальный масштаб)	
	$Hs$ , м	$T_m$ , с	$Hs$ , м	$T_m$ , с
эксперимент № 1 (май, 2013 г.)	0,05 – 0,25	0,8 – 2,3	1 – 5	3,6 – 10,3
эксперимент № 2 (январь, 2016 г.)	0,1 – 0,21	1,1 – 1,74	1,9 – 4,2	4,9 – 7,7

Уменьшение высот волн оценивалось с помощью коэффициента трансформации  $K_{tr}$  согласно зависимости (1). Влияние структуры на средний период оценивалось путем сравнения значений среднего периода волн на датчиках, расположенных после бара и до бара  $\frac{Tm_{tr}}{Tm_{in}}$ . Коэффициент трансформации и изменение среднего периода соотносились с упомянутыми выше безразмерными параметрами, характеризующими отношение параметров бара к параметрам волн ( $L_{bar}/L$  и  $d_{bat}/Hs_{in}$ ).

**Обсуждение результатов.** Как было выяснено в ходе первого физического эксперимента в волновом лотке, для более крутых волн характерен диссипативный тип трансформации, при котором в большей степени уменьшаются высоты волн, а период уменьшается незначительно. Для более пологих волн при трансформации основную роль играют нелинейно-дисперсионные процессы, приводящие к образованию вторичных волн, и уменьшению среднего периода [11].

Сравнение результатов, полученных двумя методами, показало, что для более длинных волн, проходящих структуру преимущественно без обрушения, волновые параметры, полученные в лотке и путем численного моделирования, совпадают (рис.4, а). В случае преобладания диссипативных процессов, т.е. возникновения обрушения волн и уменьшения высоты волны, результаты отличаются на датчике, расположенном сразу за сооружением. На этом участке модель *SWASH* предсказывает меньшие значения среднего периода (рис.4, б). При дальнейшем распространении волн этих различий не наблюдается.

Сравнение результатов численного моделирования с данными, полученными в волновом лотке, показало хорошую сходимость значений  $K_{tr}$ , полученных разными методами (рис.5, а, в). Различия отмечены в изменении периода для волн средней крутизны на датчике, расположенном сразу за сооружением, где модель *SWASH* предсказывает меньшие значения  $Tm_{tr}/Tm_{in}$  (рис.5, б), что наблюдалось также и при сравнении данных, полученных по



Р и с . 4 . Сравнение волновых параметров, полученных по результатам физического и численного моделирования (волны средней крутизны с эффективным изменением волнового периода (а); крутые волны с эффективным изменением высоты волны (б); сплошная линия – моделирование в волновом лотке; пунктирная линия – модель *SWASH*).

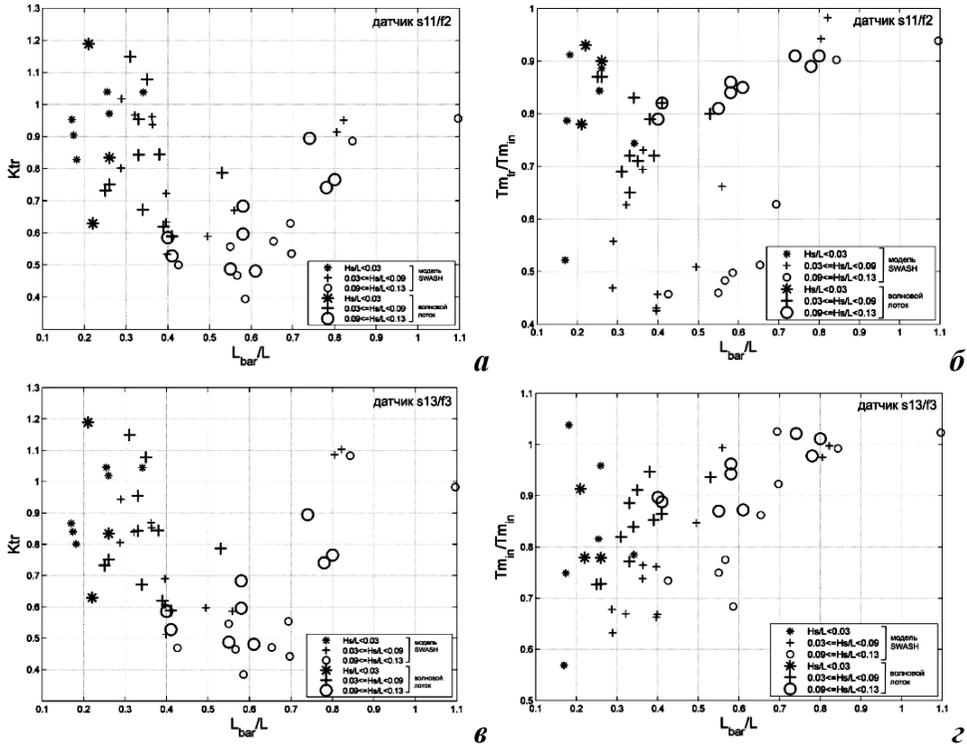


Рис. 5. Результаты численного и физического моделирования трансформации волн над баром. Зависимость коэффициента трансформации  $K_{tr}$  и изменения среднего периода  $T_{mtr}/T_{min}$  от отношения длины бара к длине волны  $L_{bar}/L$ .

всей длине волнового лотка (рис.4, б). При дальнейшем распространении волн эти различия сокращаются и оба подхода показывают близкие друг к другу значения изменения среднего периода (рис.5, г). Данная верификация позволяет рассматривать результаты, полученные в модели *SWASH*, на всей длине волнового лотка как достоверные, что дает возможность исследовать большое количество разных волновых режимов в реальном масштабе по всей длине лотка.

Значения коэффициента трансформации и изменения среднего периода на датчике s18 (модель *SWASH*, рис.6) в целом по своей тенденции мало отличаются от результатов, полученных на датчике s13. Высота волн наиболее эффективно уменьшается у относительно крутых волн, а изменению среднего периода под воздействием заглубленной структуры наиболее подвержены волны средней крутизны, а также отдельные режимы с наиболее длинными и пологими волнами.

**Заключение.** По результатам исследования получены следующие выводы:

1. Данные модели *SWASH*, полученные для реального масштаба, в целом хорошо сочетаются с данными, полученными на физической модели, выполненной в масштабе 1:20 в волновом лотке. Результаты немного отличаются на датчике, расположенном сразу за сооружением, в случае преобладания диссипативных процессов, т.е. возникновения обрушения волн и умень-

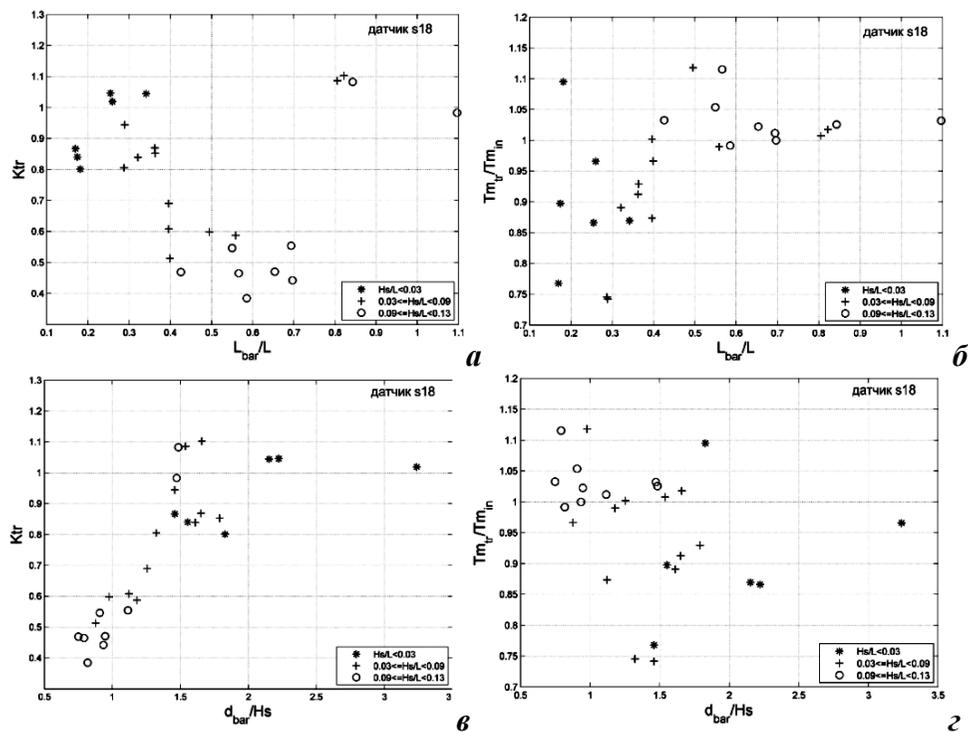


Рис. 6. Результаты численного и физического моделирования трансформации волн над баром. Зависимость коэффициента трансформации  $K_{tr}$  и изменения среднего периода  $Tm_n/Tm_1$  от отношения глубины над баром к высоте волн перед баром  $d_{bar}/Hs$ .

шения высоты волны. При дальнейшем распространении волн этих различий не наблюдается.

2. С помощью модели *SWASH* для широкого круга волновых режимов выявлено, что уменьшение высот волн на 60 % ( $K_{tr} = 0,4$ ) возможно при значениях  $d_{bar}/Hs = 0,75$  и  $L_{bar}/L = 0,6$ . Уменьшение периода волн на 25 %  $(Tm)_{tr}/(Tm)_{in}$  возможно при значениях  $d_{bar}/Hs = 1,5$  и  $L_{bar}/L = 0,3$ .

**Благодарности.** Работа выполнена при содействии Филиала ОАО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега» (г.Сочи) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-04649).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 32-103-97. Проектирование морских берегозащитных сооружений.– М.: Корпорация «Трансстрой», 1998.– 223 с.
2. Funakoshi H., Siozawa T., Tadokoro A., Tsuda S. Drifting characteristics of littoral sand around submerged breakwater (field survey on Niigata West Coast).– Hydro-Port'94.– Yokosuka, Japan, 1994.
3. Delft HydraulicsAmWaj Island development, Bahrain; physical modelling of submerged breakwaters. Report H4087.– 2002.
4. Hirose N., Watanuki A., Saito M. New type units for artificial reef development of eco-friendly artificial reefs and the effectiveness // PIANC Congress, Sydney, see also 28th ICCE, Cardiff, 2002; (Tetra Co., Ltd., 6-3-1 Nishi-shinjuku, Shinjuku, Tokyo).

5. *Van der Meer J., Regeling H.J., de Waal J.P.* Wave transmission: spectral changes and its effect on run-up and overtopping // Proc. ICCE, ASCE.– Sydney, 2000.– P.2156-2168.
6. *Carevic D., Loncar G., Prsic M.* Transformation of statistical and spectral wave periods crossing a smooth low-crested structure // *Oceanologia.*– 2012.– v.54, iss.1, 10 February.– P.39-58.
7. *Stelling G.S., Zijlema M.* Numerical modeling of wave propagation, breaking and run-up on a beach / *Advanced computational methods in science and engineering, lecture notes in computational science and engineering.*– Springer, Heidelberg, 2009.– 71.– С.373-401.
8. *Дейли Дж., Харлеман Д.* Механика жидкости / Пер. с англ.– М.: Энергия, 1971.– 480 с.
9. *Кононкова Г.Е., Показеев К.В.* Динамика морских волн.– М.: Изд-во МГУ, 1985.– 298 с.
10. *Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях / Пер. с англ.– М.: Мир, 1981.– 598 с.
11. *Коваленко А.Н. Корзинин Д.В.* Трансформация волн над подводным волноломом // *Транспортное строительство.*– М.: ООО «Трансстройиздат», 2015.– № 10.– С.2-6.

Материал поступил в редакцию 23.10.2017 г.  
После доработки 15.11.2017 г.

D.V.Korzinin

#### TRANSFORMATION OF WAVES ON THE DOWNLOADED LEDGE USING PHYSICAL AND MATHEMATICAL ASSIMULATION

The effect of submarine structures with a significant deepening on the transformation of waves is investigated. Using a physical modeling in the wave flume and a numerical model SWASH, changes in the wave height and its period under the influence of a submarine construction are estimated. A wide range of wave regimes, investigated at 1:20 scale with a limited number of wave sensors on the physical model in the wave flume, is analyzed again using a numerical model. This made it possible to obtain the wave parameter change in real scale and with an expanded number of sensors, which is important on practice. The possibility of reducing the wave height by 60% and the wave period by 25% at different ratios of the wave regime parameters and the construction is revealed.

KEYWORDS: underwater structures, coefficient of transformation, change of wave period