

УДК 532.542.4

# О ГАШЕНИИ ВОЛН НА ВОДЕ ЛОКАЛЬНЫМИ ДОННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

И. Т. СЕЛЕЗОВ, В. А. ТКАЧЕНКО, С. А. САВЧЕНКО

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев**Получено 03.05.2005*

Исследуется влияние регулярных выступов или наклонного участка донной поверхности на гашение поверхностных гравитационных волн на основе потенциальной теории в рамках модели жидкости конечной глубины. Для решения задачи в области переменной глубины применяется метод сплайн-коллокаций. Рассматривается влияние числа локальных выступов и их высоты на коэффициент отражения волн. Исследуется также влияние наклонного участка или ломаного наклонного участка. Анализируются характерные особенности явления и возможности эффективного гашения волн.

Досліджується вплив регулярних виступів або похилої ділянки донної поверхні на гасіння поверхневих гравітаційних хвиль на підставі потенціальної теорії в рамках моделі рідини скінченної глибини. Для розв'язання задачі в області змінної глибини застосовано метод сплайн-колокацій. Розглядається вплив числа локальних виступів та їх висоти на коефіцієнт відбиття хвиль. Досліджується також вплив похилої ділянки або ломаної похилої ділянки. Аналізуються характерні особливості явища та можливості ефективного гасіння хвиль.

The influence of regular bottom peaks or incline part of bottom surface on suppression of surface gravity waves on the basis of potential theory in the framework of the model of finite depth water is investigated. For solving the problem in the region of variable depth the method of spline-collocation is used. The influence of the number of local peaks and their height on the reflexion coefficient is investigated. Also, the influence of inline part or incline polygonal part is investigated. The analysis of characteristic features of the phenomenon and the possibility of effective wave suppression are presented.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия поверхностных гравитационных волн с донными неоднородностями и их подавление при прохождении над неоднородностями было и остается актуальной проблемой. Это обусловлено как поиском различного рода конструкций для гашения волн с целью защиты акваторий и береговой зоны от воздействия волн, так и необходимостью знать поведение волнового поля, особенно в прибрежной зоне, которое характеризуется многообразием явлений типа трансформации волн, рефракции и дифракции волн, интерференции волн, локальных резонансов, захвата волн и др. [1–9].

К этому направлению примыкают также исследования пристеночных течений, которые характеризуются существенным изменением структуры течения около препятствий, что в результате приводит к ослаблению потока. В связи с этим можно отметить такие задачи, как течение в каналах при наличии твердых или упругих препятствий [11–13], течение над наземными конструкциями и лесами, течение в кровеносных сосудах и др.

Влияние донных шероховатостей на течение в канале, приводящее к уменьшению расхода воды на выходе, исследовалось на основе полумпирических подходов в работах [11, 12].

Затухание индуцируемых ветром случайных поверхностных волн при наличии стволов и корней (мангоровый лес) рассмотрено на основе потенциальной теории в [14].

Распространение волн над нестационарными донными неоднородностями анализировалось, включая генерацию и распространение волн цунами и неустановившихся волн при наличии неоднородностей, в [8, 15–18].

К этому направлению примыкают также исследования возможностей ослабления волн цунами. В соответствии с данными последнего цунами в Юго-Восточной Азии наряду с очень большим накатом волн на берег были локальные участки вдоль береговой линии с очень малым накатом волн. Это демонстрирует существенное влияние топографии в прибрежной зоне на накат волн. Такого рода явления аналогичны фокусировке и дефокусировке волновой энергии при рефракции волн на воде в прибрежной зоне [9].

Рефракция волн на воде над произвольной топографией при подходе волн к прибрежной зоне исследуется на основе принципа Ферма (луч выбирает такой путь, который он проходит за минимальное время) [9]. В результате могут быть обнаружены участки вдоль берега, в которых имеет место дивергенция или конвергенция лучей, характеризующая энергию волн. В первом случае это приводит к повышенному воздей-

ствию волн и разрушению берега, а во втором – смягчает волновой режим. С этой точки зрения представляет интерес исследование акваторий в цунамиопасных регионах.

Рассматривались также возможности применения для гашения волн цунами непосредственно волноломов, располагаемых в береговой зоне перед накатом волн на берег. Обзор расчетов волноломов цунами представлен в [19]. Волноломы из каменной наброски оценивались с точки зрения воздействия цунами в [2]. Влияние волнолома цунами длиной 736 м, сконструированного для берега Sanriku в Японии в 1968 г., исследовалось численно на примере Чилийского цунами (1960) [20]. При этом показана возможность уменьшения высоты волны на 50%. Накат уединенной волны на наклонный пляж рассматривался в [7]. Обобщенная модель типа Буссинеска, учитывающая нелинейные эффекты более высокого порядка, развита [3] в связи с исследованием волн на воде в зоне обрушения. Возможно в некоторых береговых зонах, страдающих от воздействия больших волн, рационально размещать морскую стенку [5].

Возможности гашения регулярных волн одиночными препятствиями (волноломами) и возможности измерений характеристик отраженных и проходящих волн исследовались в [21–23].

В данной статье рассматривается задача прохождения регулярных волн над набором различного числа локальных выступов или впадин в некоторой ограниченной области  $\Omega_2$ . Анализируется также случай плоского наклонного или ломаного дна в области  $\Omega_2$ . Жидкость предполагается несжимаемой невязкой, движение потенциальным, что приводит к уравнению Лапласа для потенциала скоростей. Анализ проводится в рамках модели жидкости конечной глубины. Энергия падающего поля равна сумме энергии отраженных волн и энергии проходящих волн, если не имеет место захват волн. Это характеризуется коэффициентом отражения  $k_r$  и коэффициентом прохождения  $k_t$ :  $k_r = |a_r/a_i|$ ,  $k_t = |a_t/a_i|$ . Из закона сохранения энергии следует, что  $\sqrt{k_r^2 + k_t^2} = 1$ . Поэтому достаточно определить одну из величин  $k_r$  или  $k_t$ . Здесь мы находим коэффициент отражения  $k_r$ .

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ

В прямоугольной декартовой системе координат  $(x, y, z)$  жидкость переменной глубины занимает область  $\Omega_2 = \{-a \leq x \leq b, |y| < \infty, d_2(x) \leq z \leq 0\}$  (рис. 1). В общем случае донный профиль зада-

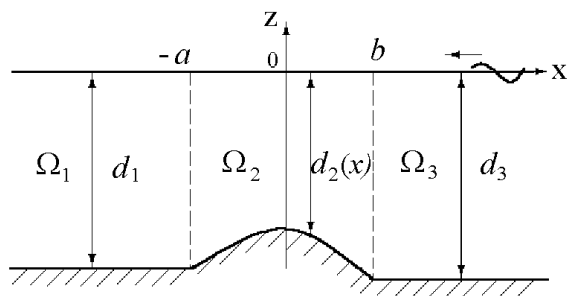


Рис. 1. Геометрия задачи

ется произвольной функцией  $d_2(x)$ , принадлежащей  $C^2$ . Область  $\Omega_2$  переменной глубины  $d_2(x, y)$  расположена между двумя областями  $\Omega_1$  и  $\Omega_3$  постоянных глубин  $d_1$  и  $d_3$ . Поле распространяющихся волн в  $\Omega_3$  генерирует отраженное поле в  $\Omega_3$  и проходящее поле в  $\Omega_1$ .

Математическая задача формулируется следующим образом: найти потенциалы скоростей  $\varphi_k(x, z, t)$  в областях  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  как решения уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial z^2} = 0, \quad k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

удовлетворяющие условиям сопряжения на поверхностях раздела между областями  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ :

$$\varphi_1|_{x=-a} = \varphi_2|_{x=-a}, \quad \varphi_2|_{x=b} = \varphi_3|_{x=b},$$

$$\int_{-d_1}^0 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} dz |_{x=-a} = \int_{-d_2(x)}^0 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} dz |_{x=-a},$$

$$\int_{-d_2(x)}^0 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} dz |_{x=b} = \int_{-d_3}^0 \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} dz |_{x=b}, \quad (2)$$

а также условиям излучения волн от препятствия и ограниченности на бесконечности в  $\Omega_1$  и  $\Omega_3$ :

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \varphi_k(x, y, z, t) = 0. \quad (3)$$

Падающая волна задается в виде

$$\varphi_{3i}(x, y, z, t) = \Phi_{3i}(z) e^{-i(k_3 x + \omega t)}. \quad (4)$$

Первые два условия (2) выполняются при  $z = 0$ , что гарантирует непрерывность свободной поверхности.

После подстановки (4) в (1)-(3) получаем постановку задачи в классе бегущих волн. В результате

имеем выражение для падающей волны:

$$\varphi_{3i} = C_i \frac{ch[k_3 d_0(z + d_3)]}{ch(k_3 d_0 d_3)} e^{-i(k_3 x + \omega t)}, \quad (5)$$

и решения в областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_3$  [5]:

$$\varphi_1 = C_1 \frac{ch[k_1 d_0(z + d_1)]}{ch(k_1 d_0 d_1)} e^{-i(k_3 x + \omega t)}, \quad (6)$$

$$\varphi_3 = \varphi_{3i} + C_3 \frac{ch[k_3 d_0(z + d_3)]}{ch(k_3 d_0 d_3)} e^{-i(k_3 x + \omega t)}. \quad (7)$$

В области переменной глубины  $\Omega_2$  задача описывается дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами. Потенциал скоростей записывается в виде

$$\varphi_2 = \frac{ch[k_2(x) d_0(z + d_2(x))]}{ch[k_2(x) d_0 d_2(x)]} \Psi(x, y), \quad (8)$$

где функция  $R(x)$  удовлетворяет уравнению [5]

$$D(x) \frac{d^2 R}{dx^2} + \left( 2 \frac{dD(x)}{dx} - E \frac{d_2(x)}{dx} \right) \frac{dR}{dx} + \left[ \frac{d^2 D(x)}{dx^2} - \frac{d}{dx} \left( E \frac{d_2(x)}{dx} \right) + k_2^2 D(x) \right] R = 0, \quad (9)$$

причем  $D(x) = \omega^2 / k_2^2(x)$ .

Попытки построения аналитических решений для этого уравнения в общем случае бесперспективны. Поэтому здесь для решения уравнения (9) применяется численный метод сплайн-коллокаций в форме разложения по базису нормализованных кубических В-сплайнов [24, 25]:

$$R(x) = \sum_{p=j-3}^n b_p B_3^p(x), \quad x \in [x_j, x_{j+1}],$$

$$p = \overline{0, N}, \quad x_0 = -a, \quad x_N = b,$$

$$B_n^p(x) = \frac{x - x_p}{x_{p+n} - x_p} B_{n-1}^p(x) +$$

$$+ \frac{x_{p+n+1} - x}{x_{p+n+1} - x_{p+1}} B_{n-1}^{p+1}(x),$$

$$B_0^p(x) = \begin{cases} 1, & x \in [x_j, x_{j+1}], \\ 0, & x \notin [x_j, x_{j+1}]. \end{cases}$$

Неизвестные коэффициенты  $C_1, C_3$  и  $b_p (p = \overline{0, N})$  находятся из условий сопряжения (5), а также из условия удовлетворения  $R(x)$  уравнению (6) в узлах коллокаций  $x_j (p = \overline{0, N})$ .

Решения были проведены для трех типов препятствий, представленных на рис. 2.

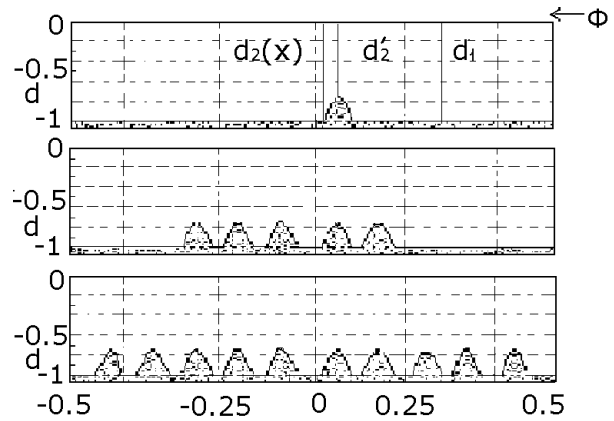


Рис. 2. Три типа локальных неоднородностей (сверху вниз):  $n=1, 5, 10$

## 2. РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные вычисления коэффициента отражения  $k_r$  в зависимости от волнового числа  $kl$  представлены на рис. 3 для различных глубин:  $d_2/d_1 = 0.70; 0.75; 0.80$  для пяти выступов,  $n = 5$ . Из графиков следует, что высота выступа  $0.2 (d_2/d_1 = 0.8), 0.25 (d_2/d_1 = 0.75), 0.3 (d_2/d_1 = 0.7)$  существенно влияет на гашение волн. Коэффициент отражения  $k_r$  равен 0.2, 0.4, 0.6 соответственно, т. е. увеличение высоты выступа на 25% и 50% приводит к увеличению коэффициента отражения в 2 и 3 раза.

Результаты расчетов показывают, что увеличение числа препятствий существенно подавляет волновое течение (проходящие волны). На рис. 4 представлены результаты расчетов для различного числа выступов  $n = 1, 5, 10$  при фиксированной высоте  $0.25 (d_2/d_1 = 0.75)$ . Из результатов следует, что увеличение числа выступов от 1 до 5 сильно влияет на коэффициенты отражения  $k_r = 0.1$  и  $0.38$ , в то время как дальнейшее увеличение  $n$  от 5 до 10 уже менее эффективно –  $k_r$  меняется от 0.38 до 0.54.

Рассматривалась также задача прохождения волн над наклонным участком дна, состоящим из одного или двух наклонов, и проводились исследования влияния наклонного участка дна на гашение волн (рис. 5).

На рис. 6 представлены результаты расчетов коэффициента отражения  $k_r$  как функции волнового числа  $k$  при прохождении волн над наклонным участком без излома при фиксированной величине  $d_3/d_1 = 0.3$ .

Как видно, и это естественно, с увеличением угла наклона коэффициент отражения убывает,

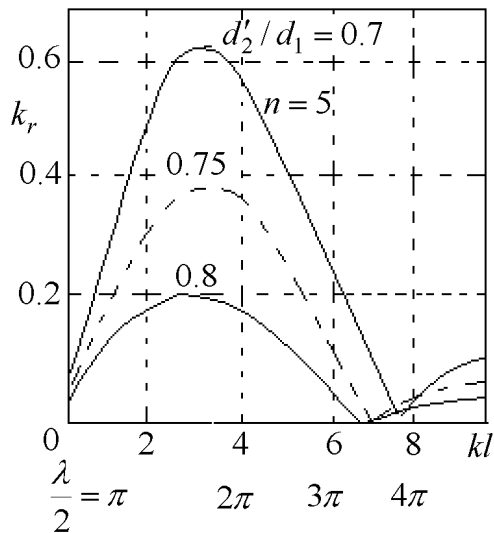


Рис. 3. Изменение коэффициента отражения  $k_r$  в зависимости от волнового числа  $kl$  ( $l = a + b$  – длина неоднородного участка) при различных высотах неоднородностей  $d_2'/d_1 = 0.7; 0.75; 0.80$ ;  $n = 5$

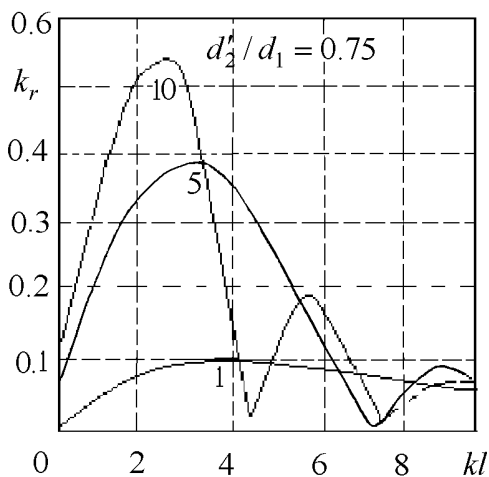


Рис. 4. Изменение коэффициента отражения  $k_r$  в зависимости от волнового числа  $kl$  ( $l = a + b$  – длина неоднородного участка) при фиксированной высоте неоднородностей  $d_2'/d_1 = 0.75$  и различных числах неоднородностей  $n = 1, 5, 10$

поскольку длина в плане сильно уменьшается. При  $\alpha_1 = \alpha_2 = 75^\circ$  уже наблюдается даже экстремум. Это связано с тем, что при увеличении угла  $\alpha$  длина участка  $b$  убывает и наклон приближается к вертикальной стенке все большей высоты  $1 - \frac{d_3}{d_1}$ , от которой происходит полное отражение. Этот эффект приводит к появлению минимума  $k_r$

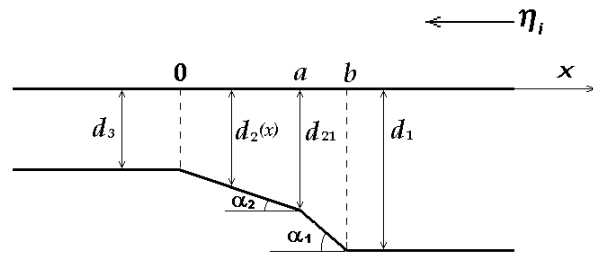


Рис. 5. Геометрия наклонного дна

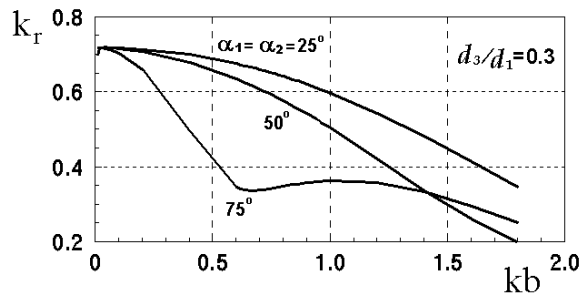


Рис. 6. Изменение коэффициента отражения  $k_r$  в зависимости от волнового числа  $kb$  для неломаного наклона при фиксированной величине  $d_3/d_1 = 0.3$  и различных углах наклона  $\alpha = 25^\circ, 50^\circ, 75^\circ$

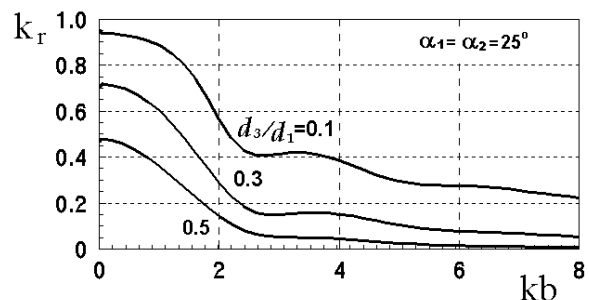


Рис. 7. Изменение коэффициента отражения  $k_r$  в зависимости от волнового числа  $kb$  при фиксированном угле (не ломаного) наклона  $\alpha = 25^\circ$  при различных величинах  $d_3/d_1 = 0.1; 0.3; 0.5$

при некоторой величине волнового числа  $kb$  и возрастанию  $k_r$  при дальнейшем увеличении  $kb$ .

Рис. 7 демонстрирует влияние перепада глубин жидкости на коэффициент отражения  $k_r$  при одинаковых фиксированных углах наклона  $\alpha_1 = \alpha_2 = 25^\circ$ . При увеличении глубины  $d_3$  (или уменьшении глубины  $d_1$ ) мы приближаемся к жидкости конечной глубины и длина наклонного участка уменьшается. В результате коэффициент отражения  $k_r$  убывает.

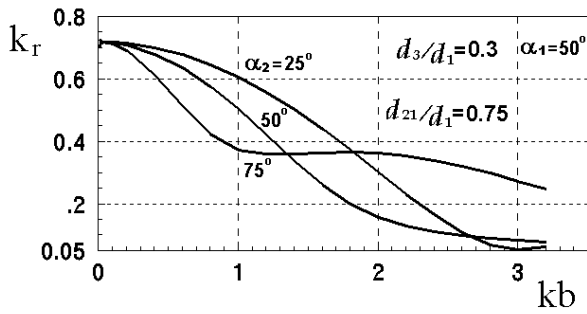


Рис. 8. Изменение коэффициента отражения  $k_r$  в зависимости от волнового числа  $kb$  для ломаного наклона при различных углах  $\alpha_2$

На рис. 8 представлены результаты расчетов для ломаного наклона при различных углах  $\alpha_2$  и фиксированном угле  $\alpha_1 = 50^\circ$ . С увеличением  $\alpha_2$  коэффициент отражения  $k_r$  убывает в связи с уменьшением длины верхнего наклонного участка  $Oa$ , а при дальнейшем увеличении  $\alpha_2$  при больших волновых числах  $k_r$  начинает даже возрастать по аналогии с неломаным наклоном (рис. 6).

Из сравнения коэффициента отражения  $k_r$  для неломаного наклона (рис. 6) и ломаного (рис. 8) видно, что во втором случае величины  $k_r$  меньше.

Необходимо отметить, что приведенные результаты справедливы при достаточно больших неоднородностях по сравнению с глубиной жидкости, поскольку рассмотрение проводится в рамках модели распространения поверхностных гравитационных волн в жидкости конечной глубины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенного анализа установлены характерные особенности гашения волн набором локальных выступов и области параметров эффективного гашения волн.

Из расчетов следует, и это очевидно, что эффективность гашения волн возрастает с увеличением числа элементов. Однако это имеет место только до некоторого  $n$ , а при дальнейшем увеличении числа локальных выступов гашение уже менее эффективно.

Анализ влияния наклонного донного участка на гашение волн обнаруживает, что при уменьшении длины наклонного участка эффективность гашения волн убывает. Но при приближении наклонного участка к вертикальному положению наблюдается минимум, после которого коэффициент отражения несколько возрастает в связи с более сильным отражением волн.

Установлено также, что в случае ломаного наклона эффективность гашения волн меньше по сравнению с неломаным наклоном.

Работа поддерживается Фондом фундаментальных исследований Украины (Грант N 01.07/00079).

1. Selezov I.T. Wave processes in fluids and elastic media // Int J. Fluid Mechanics Research.- 2003.- 30.- P. 219-249.
2. Balas C.E. Risk assessment for Tuzla naval base breakwater // China Ocean Engineering.- 2003.- 17, N 3.- P. 427-438.
3. Karambas T.V., Tozer N.P. Breaking waves in the surf and swash zone // J. Coastal Research.- 2003.- 19, N 3.- P. 514-528.
4. Tomita T. Characteristics of wave transmitted over flap gate as storm surge barrier. Book of Abstracts, 9th Int. Symposium on Natural and Human-Made Hazards, HAZARDS 2002 // Antalya, Turkey.- Oct. 3-6, 2002.- P. 144-145.
5. Hiraishi T. Characteristics of wave overtopping in a harbor induced by Typhoon 9918 // Proc. 11th. Int. Offshore and Polar Engineering Conference.- 2001.- P. 553-558.
6. Selezov I.T. Propagation of unsteady nonlinear surface gravity waves above an irregular bottom // Int.J. Fluid Mechanics Research.- 2000.- 27, N 1.- P. 146-157.
7. Hamzah M.A. Solitary wave pressure on a barrier. Proc. 10th Int. Offshore and Polar Engineering Conference // Seattle, USA.- May 28-June 2, 2000.- P. 519-523.
8. Селезов И. Т. Моделирование волновых и дифракционных процессов в сплошных средах.- Киев: Наук. думка, 1989.- 204 с.
9. Селезов И.Т., Сидорчук В.Н., Яковлев В.В. Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа.- Киев: Наук. думка, 1983.- 208 с.
10. Селезов И.Т., Яковлев В.В. Дифракция волн на симметричных неоднородностях.- Киев: Наук. думка, 1978.- 146 с.
11. Kouwen N., Unny F. Flexible roughness in open channels // Hydraulics Div., Proc. ASCE.- 99(Y5).- 1973.- P. 713 -728.
12. Kouwen N. Field estimation of the biomechanical properties of grass // Hydraulics Research.- 1989.- 26(5).- P. 559 -569.
13. Escartin J., Aubey D.G. Flow structure and dispersion within Algal Mats. // Estuary, Coast and Shelf Sci.- 1995.- 40, N 4.- P. 451-472.
14. Massel S., Furukawa K., Brinkman R. Surface wave propagation in mangrove forests // Fluid Dynamics Research.- 1999.- 24.- P. 219-249.
15. Selezov I.T. Tsunami wave excitation by a local floor disturbance // In: Submarine Landslides and Tsunamic. NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences - Vol.21 Eds. Yalciner A.C., Pelinovsky E., Okal E., Synolakis C.E., Kluwer Academic Publisher, Netherlands.- 2003.- P.139-150.
16. Selezov I.T. Interaction of water waves with engineering constructions and topography in a coastal area // Proc. of the 5th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC V.- Cape Town, South Africa, April 19-23, 1999, 1.- P. 1-12.

17. Селезов И.Т., Корсунский С.В. Распространение длинных волн на воде при наличии нестационарной донной неоднородности // Докл. АН УССР. Сер.А.– 1986.– N 10.– С. 34-37.
18. Селезов И.Т., Ткалич П.В. Распространение поверхностных волн в жидкости с нестационарными неоднородностями // Докл. АН УССР. Сер.А.– 1985.– N 3.– С. 28-31.
19. Tanimoto K. On the hydraulic aspects of tsunami breakwaters in Japan. Tsunami: Sci. and Eng. Proc. Int. Tsunami Symp., Sendai-Ofunato-Kamaishi // Tokyo, Dordrecht e.a.– 25-28 May, 1981.– P. 423–435.
20. Goto Ch., Tanimoto K. A study on the effect of tsunami breakwater by numerical simulation. 23rd Int Meet. US-Jap. Wind and Seism. Eff. // Tsukuba.– May 14-17, 1991.– P. 147-159.
21. Koh R. Theoretical analysis on wave transmission, reflection and stability of rubble mound breakwater with a granular model. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. // Stavanger, Norway.– June 17-22, 2001.– P. 645-650.
22. Kawasaki K., Iwata K. Wave breaking-induced dynamic pressure due to submerged breakwater. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. // Stavanger, Norway.– June 17-22, 2001.– P. 488-494.
23. Wave reflection over sloping beach. Proc. 11th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. // Stavanger, Norway.– June 17-22, 2001.– P. 506-511.
24. Ткаченко В.А., Яковлев В.В. Трансформация волн на неоднородностях рельефа донной поверхности с прямолинейными границами // Гидромеханика.– 1987.– Вып. 56.– С. 3-6.
25. Ткаченко В.А., Яковлев В.В. Дифракция нестационарной акустической волны на абсолютно жестком цилиндре, окруженном неоднородным слоем // Акустический журнал.– 1985.– 31, N 2.– С. 255-260.