

doi: 10.5862/MCE.50.2

## Накат волн на проницаемые закрепленные откосы

*Д.т.н., профессор И. Г. Кантаржи,  
Московский государственный строительный университет;  
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник С. Л. Кивва,  
Институт математических машин и систем НАН Украины;  
аспирант Н. В. Шунько,  
Московский государственный строительный университет*

**Аннотация.** Разработана численная модель движения поверхностных вод и движения влаги в насыщенно-ненасыщенной пористой среде, которая позволяет определять характеристики потока наката на откосе, защищенном проницаемым закрепленным слоем. С помощью модели определяются положения свободной волновой поверхности в различные моменты времени, включая высоту наката волн на откос и высоту отката волн с откоса. Кроме того, рассчитываются поле скоростей жидкости в верхнем защитном слое откоса и распределение влаги в теле грунта, слагающего откос.

Модель верифицирована с помощью опубликованных результатов крупномасштабных экспериментов, выполненных в волновом лотке Брауншвейгского технического университета с откосами, защищенными по технологии Эластокоаст. Модель можно применять для расчета наката экстремальных волн на защищенные инженерные и пляжные откосы в натуральных условиях.

**Ключевые слова:** защитные откосы; проницаемые полиуретановые покрытия; накат волн; фильтрация воды; численное моделирование; сравнение с крупномасштабными опытами

Защитные набросные откосные крепления широко используются как в портовом строительстве, так и в берегоукреплении. При этом существующие методы расчета многослойных защитных покрытий [1, 2] не позволяют надежно рассчитывать такие сооружения ввиду сложности теоретического описания задачи взаимодействия волн с покрытием откоса.

В качестве одного из современных технологических решений было предложено применить технологию Эластокоаст (Elastocoast) [3, 4]), разработанную немецким химическим концерном BASF.

Основная идея берегоукрепительной технологии Эластокоаст заключается в создании на поверхности пляжа или конструкции откосного сооружения проницаемого покрытия с открытыми порами из гравия или щебня, склеенного между собой. Важная особенность – клей не заполняет полностью поры между щебнем, а склеивает его только в местах соприкосновения отдельных элементов щебня друг с другом. Это позволяет достичь проницаемости защитного покрытия.

Система Эластокоаст представляет собой новый тип защитного покрытия, которое может применяться в зоне действия волн, в зоне заплеска или на внутренних откосах дамб. Она состоит из сыпучего материала, скрепляемого двухкомпонентной полиуретановой связкой. В системе Эластокоаст каждый отдельный камень покрыт тонкой пленкой полиуретана. При отверждении эта пленка скрепляет камни воедино только в контактных точках, сохраняя проницаемость и открытость структуры защитного покрытия.

Имеется значительный успешный опыт применения технологии Эластокоаст в Европе на ряде объектов. Этот опыт в детальном виде и в виде обобщений представлен в опубликованных материалах, например в работах [5, 6]. Пример берегоукрепления с использованием технологии Эластокоаст на о. Амрум, который расположен в Северном море недалеко от Гамбурга, показан на фото (рис. 1).

Несмотря на существенный опыт эффективного применения технологии Эластокоаст в защитных покрытиях откосов морских дамб, этот опыт ограничен волновыми воздействиями на откос и высотой волн до 1,5 м. Для приглубых морских берегов с галечными пляжами расчетные волны могут быть в 4–5 раз больше.

Для таких высот методики расчета наката волн на откос, волновых нагрузок на защитное покрытие и оценки разрушения покрытия, разработанные в рамках развития технологии Эластокоаст, не применимы. Необходимо проведение дополнительных исследований с разработкой математической модели взаимодействия волн с откосом, закрепленным по технологии Эластокоаст. При этом экспериментальные исследования воздействия волн на Кантаржи И.Г., Кивва С.Л., Шунько Н.В. Накат волн на проницаемые закрепленные откосы

защитные покрытия откосов с применением технологий Эластокоаст достаточно подробны [7] и могут быть использованы для верификации расчетных методов и численных моделей.

Схожие исследования относятся к взаимодействию волн с набросными сооружениями – волноломами [8–10]. Однако известные методы моделирования наката волн на непроницаемый откос [11–17], так же как и методы расчета наката волн на грунтовые и набросные откосы [18–22], требуют развития в соответствии со спецификой задачи. Необходимо учитывать, что движение поровых вод происходит в относительно тонком поверхностном защитном слое.

При этом для всех задач высота наката волн на откос является основным критерием процесса взаимодействия волн с сооружением.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы разработать численную модель наката волн на проницаемый откос, показать ее применимость для откосов, защищенных по технологии Эластокоаст, и затем применять для натуральных условий защищенных откосов под воздействием реальных штормовых волн. Задавая характеристики защитного покрытия, с помощью численной модели можно определять накат волн на откос и нагрузки, которые покрытие будет испытывать под действием волн. А это, в свою очередь, позволит задавать конструктивные характеристики покрытия, определяющие его прочность и износоустойчивость.

Наиболее детально взаимодействие волн с откосом, защищенным покрытием Эластокоаст, изучено в крупномасштабных экспериментах [23]. Схема модели в большом волновом лотке с откосом [18, 23], защищенным покрытием Эластокоаст, показана на рисунке 2.

В опытах исследовались три различных покрытия откоса, которые обозначены [23] «модель А», «модель В» и «модель С» и схематически показаны на рисунке 3.



Рисунок 1. Берегозащитный откос с использованием технологии Эластокоаст на о. Амрум (Северное море, недалеко от Гамбурга)

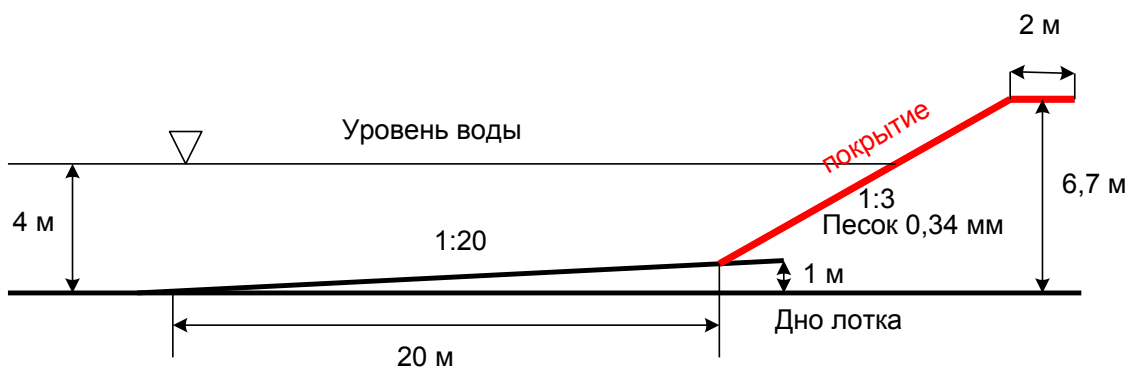
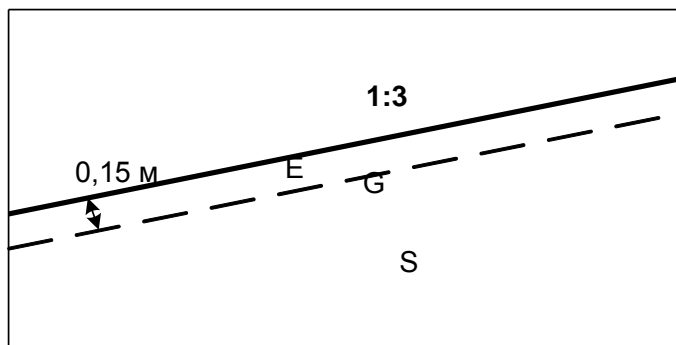
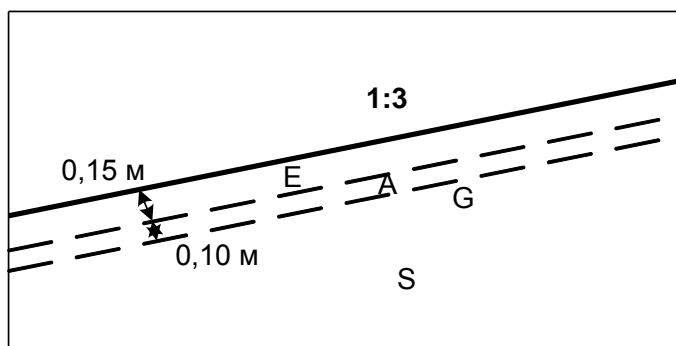


Рисунок 2. Схема опытов в большом волновом лотке Брауншвейгского технического университета [23]

Model A



Model B



Model C

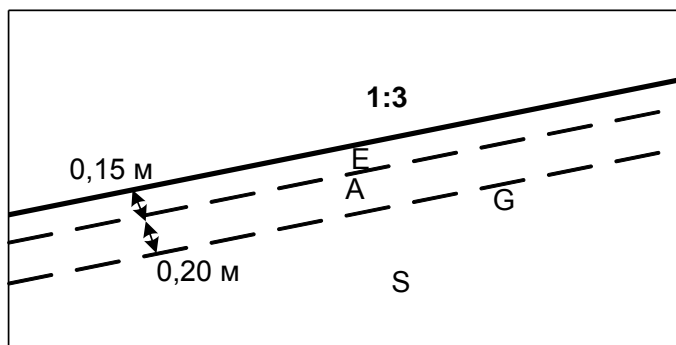


Рисунок 3. Схемы трех исследованных в опытах покрытий откоса.

**Е** – покрытие Эластокоаст: толщина – 0,15 м, наполнитель – известковый щебень 20/40 мм, для модели С – гранитный щебень, 16/36 мм.

**А** – фильтр: толщина – 0,10 м, наполнитель – известковый щебень, 20/40 мм, для модели С толщина – 0,20 мм, наполнитель – гранитный щебень, 16/36 мм;

**Г** – геотекстиль; **С** – песчаное основание,  $D_{50} = 0,34$  мм,  $D_{60}/D_{10} = 2,11$

Опыты на покрытии А проводились частично, так как это покрытие разрушалось при увеличении высоты волн.

Гидравлические характеристики покрытий (геотекстиль “Terrafix 609”): характерные отверстия 79,9  $\mu\text{m}$ , гидравлическая проницаемость  $4,7 \cdot 10^{-3}$  м/с (песок  $10^{-4}$  м/с), гранитный щебень имеет пористость 0,388.

Волновые режимы в опытах с регулярными волнами представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры тестов в волновом лотке Брауншвейгского технического университета [23], регулярные волны

№ опыта	$H_{\text{ном}}$ , м	$T_{\text{ном}}$ , с	$h$ , м	$H_m$ , м	$T_m$ , с	$C_r$	$\xi_m$
09051301	0,2	3	3,4	0,22	3,00	0,339	2,67
09051302	0,2	4	3,4	0,19	4,00	0,621	3,77
09051303	0,2	5	3,4	0,21	5,00	0,682	4,59
09051401	0,2	6	3,4	0,18	5,93	0,734	5,78
09051402	0,2	7	3,4	0,22	7,00	0,782	6,24
09051403	0,2	8	3,4	0,17	7,90	0,860	7,94
09051404	0,6	3	3,4	0,65	3,00	0,127	1,55
09051405	0,6	4	3,6	0,68	4,01	0,292	2,02
09051406	1,0	3	3,6	1,04	3,00	0,183	1,22
09051501	0,6	5	3,7	0,64	4,95	0,487	2,57
09051502	1,0	4	3,7	1,14	3,92	0,161	1,53
09051503	1,3	4	3,7	1,40	3,92	0,143	1,38
09051504	0,6	6	3,9	0,65	6,00	0,581	3,10
09051505	0,6	7	3,9	0,54	6,93	0,665	3,91
090511801	0,6	8	3,9	0,55	7,98	0,695	4,49
090511802	1,3	5	3,9	1,37	4,90	0,155	1,75
09060501	0,2	3	3,4	0,22	2,99	0,332	2,65
09060502	0,2	5	3,4	0,20	5,00	0,678	4,66
09060503	0,2	8	3,4	0,17	8,00	0,863	8,05
09060504	0,6	3	3,4	0,66	3,00	0,091	1,54
09060505	0,6	4	3,6	0,69	4,00	0,289	2,00
09061803	0,6	5	3,8	0,58	4,99	0,521	2,72
09061804	0,6	6	3,9	0,72	6,00	0,567	2,95
09061805	0,6	7	3,9	0,52	6,99	0,633	4,02
09062301	0,5	7	3,8	0,44	7,00	0,731	4,39
09062302	0,4	8	3,7	0,50	7,99	0,731	4,72
09062303	0,7	3	3,5	0,67	3,00	0,102	1,53
09062304	0,8	3	3,5	0,75	3,00	0,119	1,44
09062305	0,9	3	3,5	0,84	3,00	0,152	1,36
09062306	1,0	3	3,5	0,92	3,01	0,105	1,31
09062307	0,4	3	3,4	0,39	3,00	0,241	1,99
09062308	0,5	3	3,4	0,49	3,00	0,228	1,79
09062912	1,0	5	3,9	1,01	5,01	0,358	2,08
09062913	1,0	6	4,1	0,92	6,02	0,496	2,61
09062914	1,3	6	4,2	1,24	6,03	0,406	2,25
09062915	1,0	7	4,2	1,17	7,02	0,541	2,70
09062916	1,0	8	4,2	0,91	8,05	0,689	3,52

В таблице 1 используются обозначения:  $H_{\text{ном}}$  – задаваемая высота волн;  $T_{\text{ном}}$  – задаваемый период волн;  $h$  – глубина воды;  $H_m$  – высота волн у подножия откоса;  $T_m$  – период волн у подножия

откоса;  $C_r$  – коэффициент отражения волн  $\xi_m = \frac{tg\alpha}{\sqrt{H_m/L_0}}$  – параметр подобия прибойной зоны;

$L_0 = \frac{gT}{2\pi}$  – длина волн на глубокой воде.

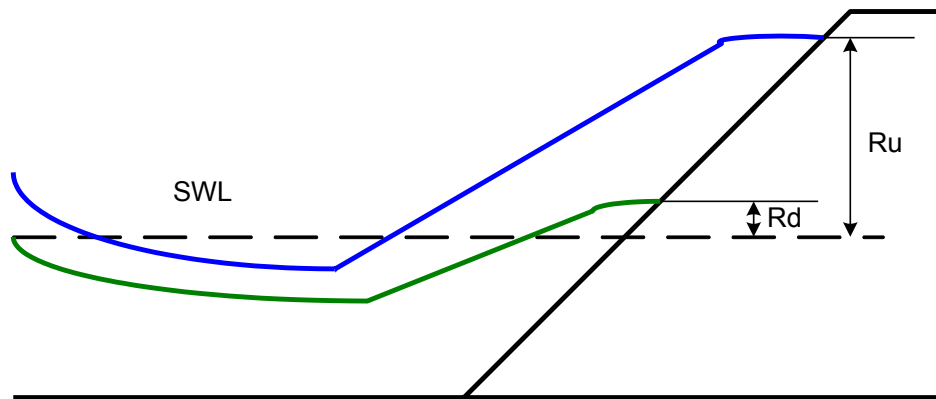


Рисунок 4. Схема к определению наката/отката волн на откосе:  $R_u$  – высота наката волн на откос;  $R_d$  – высота отката волн; SWL – уровень спокойной поверхности

Схема определения характеристик наката волн на откос показана на рисунке 4. Для аппроксимации результатов опытов используются следующие зависимости [23]:

Модель В:

$$\frac{R_u}{H_m} = 0,54[1,65\xi], \xi < 2,7$$

$$\frac{R_u}{H_m} = 0,78 \left[ 4,0 - \frac{1,5}{\sqrt{\xi}} \right], \xi \geq 2,7 \quad (1)$$

Модель С:

$$\frac{R_u}{H_m} = 0,52[1,65\xi], \xi < 2,7$$

$$\frac{R_u}{H_m} = 0,76 \left[ 4,0 - \frac{1,5}{\sqrt{\xi}} \right], \xi \geq 2,7 \quad (2)$$

Установлено, что разница между накатом волн на откос с покрытиями В и С незначительна. Однако по сравнению с гладким непроницаемым откосом проницаемое покрытие значительно снижает высоту нагона волн. Разница зависит от параметра  $\xi$  и составляет для относительного нагона  $R_u/H_m$  от 25 % для больших значений  $\xi$  до 50 % для меньших значений  $\xi$ .

Для того чтобы инновационная идея применения технологии Эластокоаст в морской берегозащите применительно к приглубым, сложенным галечником берегам могла получить дальнейшее развитие, в рамках настоящей работы было проведено численное исследование наката волн на береговой откос, защищенный по технологии Эластокоаст.

Для этого была разработана численная модель распространения волн в зоне наката на откосе с проницаемым покрытием. Модель проверялась на результатах крупномасштабных опытов, выполненных в Брауншвейгском техническом университете, Германия [23].

Для моделирования наката волн на берег используется математическая модель, состоящая из двух связанных друг с другом подмоделей, описывающих движение поверхностных вод и движение влаги в насыщенно-ненасыщенной пористой среде. Схема модели показана на рисунке 5.

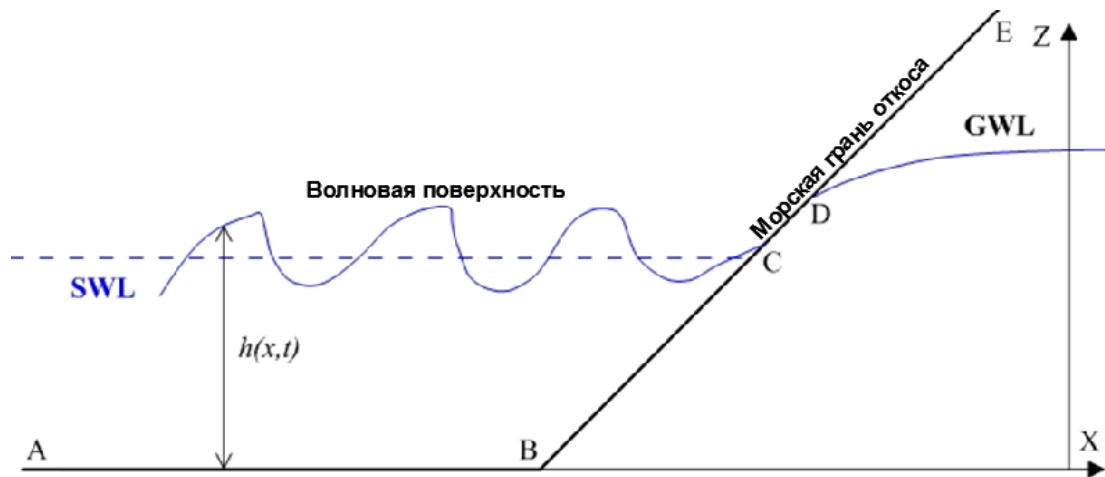


Рисунок 5. Схема наката волн на берег

Уравнения движения воды со свободной поверхностью получаются интегрированием уравнений Навье – Стокса по глубине потока с использованием кинематических граничных условий. Эти уравнения включают уравнение неразрывности и уравнения сохранения импульса. Они могут быть записаны в следующей форме [24–27]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i h = I, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (u_i h) + \frac{\partial}{\partial x_j} u_j u_i h + gh \frac{\partial \xi}{\partial x_i} + g \frac{n^2}{h^{4/3}} u_i |u| = 0, \quad (4)$$

где  $t$  – время;  $x_i$  – пространственные координаты;  $h = \xi - \eta$  – глубина потока;  $u_i$  – скорость течения в направлении  $x_i$ -координаты;  $\xi(x,t)$  – уравнение свободной поверхности жидкости;  $\eta(x,t)$  – уравнение поверхности дна;  $g$  – ускорение свободного падения;  $n$  – коэффициент шероховатости Маннинга;  $I$  – инфильтрация.

Предполагается, что движение влаги в насыщенно-ненасыщенной пористой среде происходит под действием сил тяжести и пропорционально градиенту напора согласно обобщенному закону Дарси. Пористая среда рассматривается как недеформируемая, а жидкость как несжимаемая. Считается, что движением влаги в газообразной форме можно пренебречь.

Тогда, пренебрегая гистерезисом и температурными градиентами, можем описать движение влаги в насыщенно-ненасыщенной пористой среде уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi S = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{k_r k_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + g \rho \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right], \quad (5)$$

где  $t$  – время;  $x_i$  – декартовы пространственные координаты;  $\phi$  – объемная пористость;  $\rho$  – плотность пористой влаги;  $k_{ij}$  – компоненты тензора коэффициента проницаемости;  $k_r$  – коэффициент относительной проводимости ( $0 \leq k_r \leq 1$ );  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $p$  – давление почвенной влаги;  $g$  – ускорение свободного падения;  $z$  – высота рассматриваемой точки потока жидкости относительно плоскости сравнения;  $S$  – объемная насыщенность.

Скорость движения влаги подчиняется обобщенному закону Дарси и вычисляется по формуле:

$$v_i = -k_r k_{ij}^f \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{p}{\rho g} \right) + \frac{\partial z}{\partial x_j} \right],$$

где  $k_{ij}^f$  – компоненты тензора коэффициента фильтрации, которые определяются из соотношения

$$k_{ij}^f = \frac{k_{ij} \rho g}{\mu}.$$

Для однозначного решения уравнений (3)–(5) необходимо задать начальные и граничные условия. Обычно в качестве начальных условий задают распределение глубин и скоростей для поверхностных вод и распределение давления влаги в грунтах в начальный момент времени, то есть

$$h(x, 0) = \varphi_h(x), u(x, 0) = \varphi_u(x) \text{ и } p(x, 0) = \varphi(x),$$

где  $x$  – вектор пространственных координат;  $\varphi_h, \varphi_u, \varphi$  – заданные функции.

При накате волн на берег в качестве граничных условий для уравнений мелкой воды выбираются соответствующие инварианты Римана.

Граничные условия для уравнения влагопереноса (5) могут быть первого рода (условия Дирихле):

$$p(x, t) = g_1(x, t) \quad \text{на } \Gamma_1,$$

или второго рода (условия Неймана):

$$\left[ k_r \frac{k_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right] n_i = g_2(x, t) \quad \text{на } \Gamma_2,$$

где  $g_1$  – заданное давление на границе  $\Gamma_1$ ;  $n_i$  –  $i$ -я компонента вектора внешней нормали к границе  $\Gamma_2$ ;  $g_2$  – известный поток вдоль внешней нормали к границе  $\Gamma_2$ .  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  образуют полную границу области моделирования. Обычно граница  $\Gamma_1$  является общей границей подземного потока с поверхностными водоемами, а граница  $\Gamma_2$  характеризуется значением проходящего через нее потока (например, непроницаемые границы, участки инфильтрации и эвапотранспирации, области нагнетания и откачек жидкости и т. д.).

В рассматриваемом случае граничные условия для уравнения влагопереноса на поверхности дна имеют вид (рис. 5):

$$p + \rho g z = P_a + \rho g h + \rho u^2 / 2, \quad \text{на АВ и ВС;}$$

$$-\frac{\mathbf{k}k_r}{\mu} \frac{\partial}{\partial n} p + \rho g z = 0, \quad p < P_a, \quad \text{на DE;}$$

$$-\frac{\mathbf{k}k_r}{\mu} \frac{\partial}{\partial n} p + \rho g z > 0, \quad p = P_a, \quad \text{на CD,}$$

где  $n$  – вектор внешней единичной нормали к поверхности земли  $\eta$ ;  $P_a$  – атмосферное давление. Заметим, что отрезок CD не известен заранее и должен определяться из решения.

Для численного решения уравнения Сен-Венана использовалась явная консервативная схема годуновского типа второго порядка. Для моделирования движения влаги в пористой среде – неявная консервативная схема второго порядка по пространственным переменным и первого по времени.

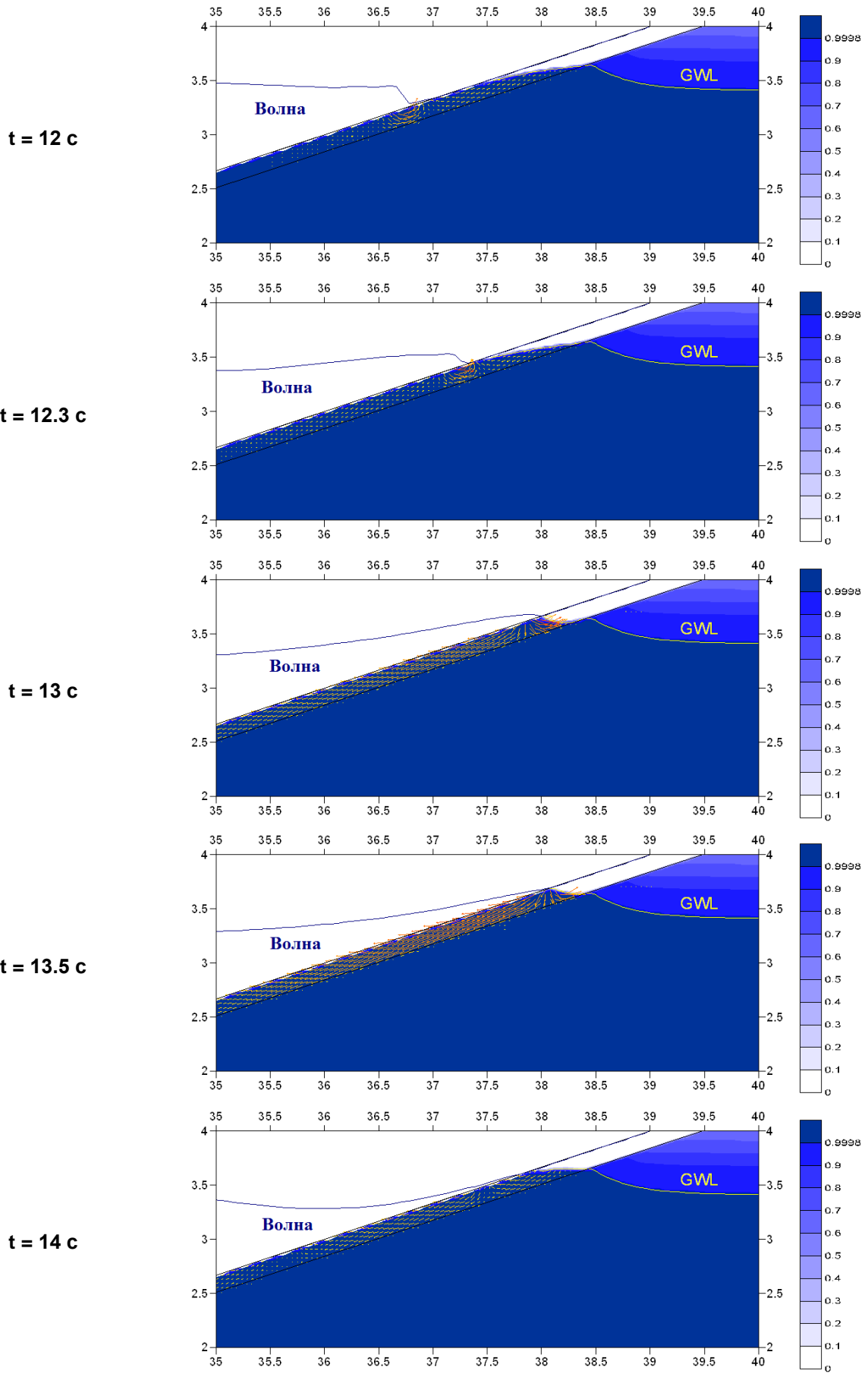
Результаты расчетов наката волн на откос для условий опытов в лотке представлены в таблице 2. Так как накат волн на защищенный берег сильно зависит от фильтрационных характеристик покрытия, то рассчитанные накаты получены при следующих значениях фильтрационных характеристик:

Слой	Е	А
Коэффициент фильтрации, см/с	30	20
Пористость (объемная)	0.48	0.42

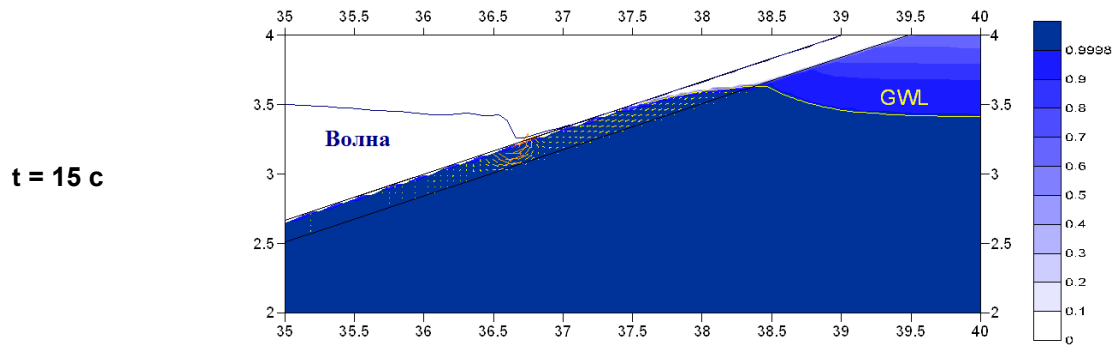
Коэффициент шероховатости Маннинга принимался равным 0,02.

Кантаржи И.Г., Кивва С.Л., Шунько Н.В. Накат волн на проницаемые закрепленные откосы

На рисунке 6 показан пример численного расчета наката волн для эксперимента с покрытием А (синим цветом обозначена насыщенность пор, GWL – уровень грунтовых вод).







**Рисунок 6. Поле скоростей жидкости в слое E и распределение влаги в теле грунта в различные моменты времени при накате волны на берег (за один период)**

Для проверки результатов численного моделирования высоты наката сравнивались с имеющимися данными не только для проницаемого откоса Эластокоаст, но и для непроницаемого гладкого откоса. Так как опыты с непроницаемым откосом не проводились в этой серии, то для сравнения с результатами численных опытов по накату привлекались известные и общепринятые зависимости. Согласно [28] накат регулярных волн на гладкий непроницаемый откос определяется по формуле:

$$\frac{R_u}{h} = 3.84tg\alpha \left( \frac{M_F}{\rho gh^2} \right)^{1/2}, \tag{6}$$

где  $h$  – глубина воды;  $\alpha$  – уклон откоса;

$$\left( \frac{M_F}{\rho gh^2} \right) = A_0 \left( \frac{h}{gT^2} \right)^{-A_1}, \quad A_0 = 0.6392 \left( \frac{H}{h} \right)^{2.026}, \quad A_1 = 0.1804 \left( \frac{H}{h} \right)^{-0.391}$$

Сравнение соответствующих данных (расчеты и измерения, таблица 2) показывает, что численная модель удовлетворительно описывает результаты опытов, а представленные на рисунке 6 данные показывают высокую информативность численных расчетов.

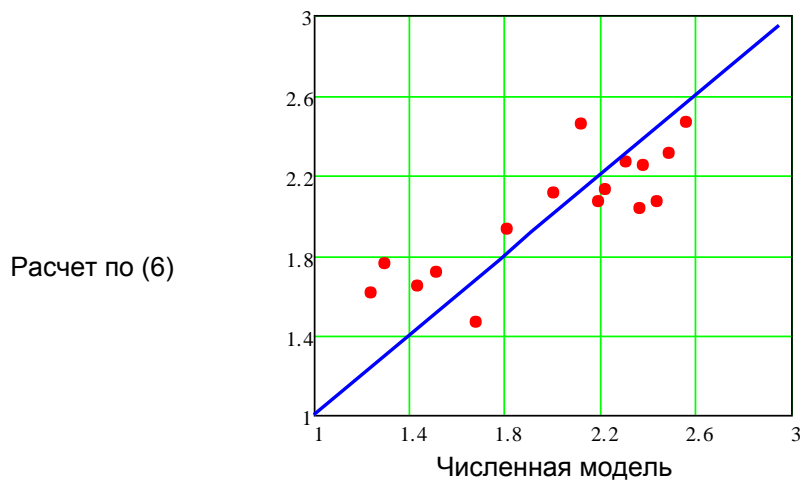
На рисунке 7 показано прямое сравнение расчетов высоты относительного наката волн на гладкий непроницаемый откос с расчетов по (6) для условий опытов в лотке Брауншвейгского технического университета. Сравнение для задачи такой сложности вполне удовлетворительное.

**Таблица 2. Характеристики волн, высоты наката и отката для условий опытов (измеренные, полученные численным моделированием и рассчитанные)**

№ опыта	$h, m$	$H_m, m$	$T_m, s$	$\xi_m$	$\frac{R_u^2}{H_m}$	$\frac{R_u^{simu}}{H_m}$	$\frac{R_d^{simu}}{H_m}$	$\frac{R_u^A}{H_m}$	$\frac{A R_u^{simu}}{H_m}$	$\frac{R_d^A}{H_m}$	$\frac{A R_d^{simu}}{H_m}$	$\frac{R_u^B}{H_m}$	$\frac{B R_u^{simu}}{H_m}$	$\frac{R_d^B}{H_m}$	$\frac{B R_d^{simu}}{H_m}$
09051301	3.4	0.22	3.00	2.67	2.33	2.23	-1.12	1.39	1.41	-0.82	-0.23	1.12	1.33	-0.71	-0.24
09051302	3.4	0.19	4.00	3.77	2.87	2.44	-2.03	1.85	1.63	-1.37	-1.55	1.77	1.56	-1.29	-1.33
09051303	3.4	0.21	5.00	4.59	3.11	2.49	-2.19	1.83	1.79	-1.59	-1.73	1.67	1.72	-1.52	-1.62
09051401	3.4	0.18	5.93	5.78	3.67	2.56	-2.24	2.06	1.72	-1.82	-1.92	1.79	1.67	-1.77	-1.84
09051402	3.4	0.22	7.00	6.24	3.64	2.37	-2.01	2.16	2.31	-1.67	-1.80	2.00	2.12	-1.61	-1.75
09051403	3.4	0.17	7.90	7.94	4.46	2.12	-1.84	1.83	1.75	-1.86	-1.85	1.70	1.83	-1.81	-1.86
09051404	3.4	0.65	3.00	1.55	1.76	1.30	-0.01	1.23	1.33	0.03	-0.05	1.24	1.34	-0.04	-0.03
09051405	3.6	0.68	4.01	2.02	1.93	1.81	-0.19	1.68	1.85	-0.03	-0.08	1.70	1.76	-0.20	-0.14
09051406	3.6	1.04	3.00	1.22	1.61	1.24	0.34	0.89	1.12	0.24	0.29	0.92	1.04	0.26	0.31
09051501	3.7	0.64	4.95	2.57	2.11	2.00	-1.08	1.79	1.85	-0.36	-0.72	2.00	1.79	-0.53	-0.60
09051502	3.7	1.14	3.92	1.53	1.71	1.51	0.31	1.39	1.52	0.28	0.33	1.45	1.60	0.35	0.33
09051503	3.7	1.40	3.92	1.38	1.65	1.43	0.36	1.22	1.24	0.29	0.36	1.28	1.19	0.41	0.39
09051504	3.9	0.65	6.00	3.10	2.27	2.31	-1.97	2.07	2.20	-0.50	-0.72	2.13	2.13	-0.72	-0.75
09051505	3.9	0.54	6.93	3.91	2.55	2.38	-2.10	2.15	2.22	-0.90	-1.01	2.17	2.31	-1.14	-1.12
090511801	3.9	0.55	7.98	4.49	2.67	2.19	-1.93	2.18	2.12	-1.13	-1.42	2.22	2.17	-1.28	-1.37
090511802	3.9	1.37	4.90	1.75	1.76	1.68	0.15			0.32		1.81		0.36	

Кантаржи И.Г., Кивва С.Л., Шунько Н.В. Накат волн на проницаемые закрепленные откосы

**Примечание.** Отношение  $\frac{R_u^2}{H_m}$  рассчитано по формуле (6); simu указывает на результат численного моделирования; тип покрытия «А» или «В», отсутствие такой маркировки относит результат к условиям гладкого непроницаемого откоса.



**Рисунок 7. Сравнение результатов численных опытов и расчетов по [23] относительной высоты наката волн на откос для гладкого непроницаемого откоса**

### Заключение

Разработанная численная модель движения поверхностных вод и движения влаги в насыщенно-ненасыщенной пористой среде позволяет определять характеристики потока наката на откосе, защищенном проницаемым закрепленным слоем. При этом с помощью модели определяются положения свободной волновой поверхности в различные моменты времени, включая высоту наката волн на откос и высоту отката волн с откоса. Кроме того, рассчитываются поле скоростей жидкости в верхнем защитном слое откоса и распределение влаги в теле грунта, слагающего откос. Модель верифицирована с помощью опубликованных результатов крупномасштабных экспериментов, выполненных в волновом лотке Брауншвейгского технического университета.

Модель можно применять для расчета наката экстремальных волн на защищенные инженерные и пляжные откосы в натуральных условиях. Гидродинамические характеристики потока наката могут далее использоваться для расчета волновых нагрузок на поверхность откоса, а также для расчета фильтрационных процессов в защитных слоях и в теле грунтового откоса.

### Литература

1. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.
2. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов). Л.: ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева, 1977. 315 с.
3. Compilation of the Technical Design Guidelines for Elastocoast. BASF Polyurethanes GmbH. Report No 90154-01. 2010. 73 p.
4. Bijlsma E. The Elastocoast System. A Study of Possible Failure Mechanisms. MSc. Thesis Report / Delft University of Technology, Netherlands. 2008. 141 p.
5. Экспериментальные проекты с применением системы Elastocoast в Нидерландах в период штормов 2007/2008, ASTOGRAN GBH, 2008. 99 с.
6. Oumeraci H., Staal T., Pfoertner S., Kudella M., Schimmels S., Verhagen H.H. Hydraulic performance of elastomeric bonded permeable revetments and subsoil response to wave load // International Conference on Coastal Engineering (ICCE), 2010. Shanghai, China. Pp. 37–52.
7. Oumeraci H., Staal T., Pfoertner S., Ludwigs G. Hydraulic performance, wave loading and response of PBA revetments and their foundation // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2012. Vol. 16. Pp. 1–28.
8. Muttray M., Oumeraci H., Shimosako K., Takahashi S. Hydraulic performance of high mound composite breakwater. International Conference of Coastal Engineering. 1998. ICCE., Copenhagen, Denmark. Pp. 123–137.

9. Neves Diogo R.C.B., Didier E., Reis M.T., Neves M.G. Overtopping of a porous structure using a smoothed particle hydrodynamics numerical model // Proceedings 4th International Conf. of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection. Coastlab12. Ghent, Belgium, September 17–20. 2012. Pp. 531–540.
10. Didier E., Neves M.G. Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure // Proceedings 4th EFCOFTAC SPHERIC workshop, 2009. Nantes, France, Pp. 357–364.
11. Кантаржи И.Г., Шунько Н.В. Моделирование ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения // Сборник научных трудов IV Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России», г. Рыбинск, 24–29 июня 2013 г. М.: ИВП, 2013. С. 94–99.
12. Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Леонтьев И.О. Шахин В.М. Математическое моделирование береговых процессов Имеретинской низменности для обоснования берегозащитных мероприятий // Гидротехническое строительство. 2011. №10. С. 22–29.
13. Шахин В.М., Шахина Т.В. Метод расчета дифракции и рефракции волн // Океанология. 2001. Т. 41. №5. С. 674–679.
14. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 499 с.
15. Пелиновский Е.Н. Накат цунами на берег. Сб. науч. трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1985. 214 с.
16. Pelinovsky E., Talipova T., Kharif C. Nonlinear dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water // Physica D. 2000. Vol. 147. No. 1-2. Pp. 83–94.
17. Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T. Formation de vagues géantes en eau peu profonde // Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. 2000. Vol. 328. Serie IIb, No. 11. Pp. 801–807.
18. Oumeraci H. More than 20 years experience using the re-search facility “Grosser Wellenkanal (GWK)”: Selected research projects & lessons learning // Proceedings 4th International Conference of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection. Coastlab12. Ghent, Belgium, September 17–20, 2012. Pp. 28–64.
19. Kudella M., Oumeraci H., De Groot M.V., Meijers P. Large-scale experiments on pore pressure generation underneath a caisson // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 2006. Vol. 132. No.4. Pp. 310–324.
20. Muttray M., Oumeraci H. Theoretical and experimental study on wave damping inside a rubble mound breakwater // Coastal Engineering. 2005. Vol. 52. No.8. Pp. 709–725.
21. Alcerreca H. J.C., Oumeraci H. Interaction of waves with a porous bonded revetment and its foundation: Process-based modelling. LWI. Progress Report no 02: Numerical model in OpenFOAM (LWI-FOAM): Model equations and validation tests. TU Braunschweig, 2012. 68 p.
22. Liebisch S., Alcerreca H.J.C., Kortenhaus A., Oumeraci H. Bonded porous revetments – effect of porosity on wave-induced loads and hydraulic performance // International Conference on Coastal Engineering. 2012. ICCE, Santander, Spain. Pp. 110–121.
23. Hydraulic Performance, Wave Loading and Response of Elastocoast and their Foundation. A Large Scale Model Study (Final Report). LWI Report no.988. Technische Universität Braunschweig. Leichtweiß-Institut für Wasserbau. Braunschweig. 2010. 176 p.
24. Железняк М.И., Пелиновский Е.Н. Физико математические модели наката цунами на берег. Накат цунами на берег. Горький: ИПФ АН СССР, 1985. С. 8–34.
25. Демченко Р.И., Железняк М.И., Кивва С.Л., Коломиец П.С. Численная модель волн, течений и перестроения берегов прибрежной зоны моря // Сборник трудов конференции «Моделирование – 2006», Киев. С. 197–201.
26. Демченко Р.И., Железняк М.И., Гиперболическая аппроксимация трансформации волн на течениях прибрежной зоны // Прикладная гидромеханика. 2002. Т. 4. №2. С. 23–29.
27. Кивва С.Л., Железняк М.И. Двумерное моделирование стока и транспорта наносов с малых водосборов // Прикладная Гидромеханика. 2002. 4(76). Вып.1. С. 67–89.
28. Hughes S.A. Estimation of run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter // Coastal Engineering. 2004. Vol. 51. Pp. 1085–1104.

*Измаил Григорьевич Кантаржи, Москва, Россия  
Тел. моб.: +7(903)5337830; эл. почта: kantardgi@yandex.ru*

*Сергей Леонидович Кивва, Киев, Украина  
Тел. моб.: +81245042848; эл. почта: skivva@gmail.com*

*Наталья Владимировна Шунько, Москва, Россия  
Тел. моб.: +7(905)5147385; эл. почта: natshunko@rambler.ru*

© Кантаржи И.Г., Кивва С.Л., Шунько Н.В., 2014

doi: 10.5862/MCE.50.2

## Wave run-up on permeable fixed reveted slopes

**I.G. Kantardgi**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
+79035337830; e-mail: kantardgi@yandex.ru

**S.L. Kivva**

The Institute of Mathematical Machines and Systems Problems NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine  
+81245042848; e-mail: skivva@gmail.com

**N.V. Shunko**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
+79055147385; e-mail: natshunko@rambler.ru

### Key words

revetted slopes; permeable polyurethane layers; wave run-up; water filtration; numerical modeling; comparison with large-scale tests

### Abstract

A numerical model of surface wave movement and water filtration in saturated-unsaturated porous medium has been developed. The model can be used to define the parameters of the wave run-up on the slope protected with a permeable fixed layer. The model is applied to determine positions of the free wave surface at the different times, including such parameters as the height of wave run-up and wave run-down on the slope. In addition, both flow velocity field in the upper protected layer and moisture distribution in the soil body of the slope were defined.

The model is verified with the results of the published large-scale tests that have been conducted at Technical University Braunschweig in the wave flume with the slopes protected according to Elastocoast technology. The numerical model can be applied to calculate the run-up of extreme waves on protected engineering and beach slopes in natural conditions.

### References

1. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zavyalov V.K. *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya* [Loads and effects onto hydraulic structures]. Leningrad: VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva, 1990. 432 p. (rus)
2. *Rukovodstvo po opredeleniyu nagruzok i vozdeystviy na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovykh, ledovykh i ot sudov)* [Manual on definition of the loads and effects onto hydraulic structures (of waves, ice and boars)]. Leningrad: VNIIG imeni B.Ye. Vedeneyeva, 1977. 315 p. (rus)
3. *Compilation of the Technical Design Guidelines for Elastocoast*. BASF Polyurethanes GmbH. Report No 90154-01. 2010. 73 pp.
4. Bijlsma E. *The Elastocoast System. A Study of Possible Failure Mechanisms*. MSc. Thesis Report. Delft University of Technology, Netherlands. 2008. 141 p.
5. *Eksperimentalnyye proyekty s primeneniym sistemy Yelastocoast v Niderlandakh period shtormov* [Pilot projects using the system Elastocoast in the Netherlands during the storms]. 2007/2008, ASTOGRAN GBH, 2008. 99 p. (rus)
6. Oumeraci H., Staal T., Pfoertner S., Kudella M., Schimmels S., Verhagen H.H. Hydraulic performance of elastomeric bonded permeable revetments and subsoil response to wave load. *International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, 2010. Shanghai, China. Pp. 37–52.
7. Oumeraci H., Staal T., Pfoertner S., Ludwigs G. Hydraulic performance, wave loading and response of PBA revetments and their foundation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012. Pp. 1–28.
8. Muttray M., Oumeraci H., Shimosako K., Takahashi S. Hydraulic performance of high mound composite breakwater. *International Conference of Coastal Engineering*. 1998. ICCE., Copenhagen, Denmark. Pp. 123–137.
9. Neves Diogo R.C.B., Didier E., Reis M.T., Neves M.G. Overtopping of a porous structure using a smoothed particle hydrodynamics numerical model. *Proc. 4th Int. Conf. of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*. Coastlab12. Ghent, Belgium, September 17–20. 2012. Pp. 531–540.
10. Didier E., Neves M.G. Coastal flow simulation using SPH: Wave overtopping on an impermeable coastal structure. *Proceedings 4th International Conf. of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*. Coastlab12. Ghent, Belgium, September 17–20. 2012. Pp. 531–540.

Kantardgi I.G., Kivva S.L., Shunko N.V. Wave run-up on permeable fixed reveted slopes

11. Kantarzi I.G., Shunko N.V. Modelirovaniye ledovykh nagruzok na morskoye gidrotekhnicheskoye sooruzheniya [Modeling of ice loads on sea hydraulic structures]. *Sbornik nauchnykh trudov IV Vserossiyskoy konferentsii «Ledovyye i termicheskiye protsessy na vodnykh obyektakh Rossii»* [Collection of Scientific Papers IV All-Russian Conference "Ice and thermal processes in water bodies of Russia"]. Rybinsk, June 24–29, 2013. Moscow: IVP, 2013. Pp. 94–99. (rus)
12. Zheleznyak M.I., Kantarzi I.G., Leontyev I.O. Shakhin V.M. Matematicheskoye modelirovaniye beregovykh protsessov Imeretinskoy nizmennosti dlya obosnovaniya beregozashchitnykh meropriyatiy [Mathematical modeling of coastal processes of Imeretinka downland to base the coastal protection]. *Power Technology and Engineering*. 2011. No. 10. Pp. 22–29. (rus)
13. Shakhin V.M., Shakhina T.V. *Metod rascheta difraktsii i refraktsii voln* [Wave diffraction and refraction calculation]. *Oceanology*. 2001. Vol. 41. No. 5. Pp. 674–679. (rus)
14. Lavrenov I.V. *Matematicheskoye modelirovaniye vetrovogo volneniya v prostranstvenno-neodnorodnom okeane* [Mathematical modeling of wind waves in the space nonuniform ocean]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998. 499 p. (rus)
15. Pelinovskiy Ye.N. *Nakat tsunami na bereg* [Wave run-up onto the coast]. Gorkiy: IPF AN SSSR, 1985. 214 p. (rus)
16. Pelinovsky E., Talipova T., Kharif C. Nonlinear dispersive mechanism of the freak wave formation in shallow water. *Physica D*. 2000. Vol. 147. No.1–2. Pp. 83–94.
17. Kharif C., Pelinovsky E., Talipova T. Formation de vagues géantes en eau peu profonde. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*. 2000. Vol. 328. Serie IIb. No. 11. Pp. 801–807.
18. Oumeraci H. More than 20 years experience using the re-search facility "Grosser Wellenkanal (GWK)": Selected research projects & lessons learning. *Proceedings 4th International Conference of the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection. Coastlab12*. Ghent, Belgium, September 17–20, 2012. Pp. 28–64.
19. Kudella M., Oumeraci H., De Groot M.V., Meijers P. Large-scale experiments on pore pressure generation underneath a caisson. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 2006. Vol.132. No.4. Pp. 310–324.
20. Muttray M., Oumeraci H. Theoretical and experimental study on wave damping inside a rubble mound breakwater. *Coastal Engineering*. 2005. Vol. 52. No.8. Pp. 709–725.
21. Alcerrecas H. J.C., Oumeraci H. *Interaction of waves with a porous bonded revetment and its foundation: Process-based modelling*. LWI. Progress Report no 02: Numerical model in OpenFOAM (LWI-FOAM): Model equations and validation tests. TU Braunschweig, 2012. 68 p.
22. Liebisch S., Alcerrecas H.J.C., Kortenhaus A., Oumeraci H. Bonded porous revetments – effect of porosity on wave-induced loads and hydraulic performance. *International Conference on Coastal Engineering. 2012. ICCE*, Santander, Spain. Pp. 110–121.
23. Hydraulic Performance, *Wave Loading and Response of Elastocoast and their Foundation. A Large Scale Model Study (Final Report)*. LWI Report no.988. Technische Universität Braunschweig. Leichtweiß-Institut für Wasserbau. Braunschweig. 2010. 176 p.
24. Zheleznyak M.I., Pelinovskiy Ye.N. *Fiziko matematicheskiye modeli nakata tsunami na bereg. Nakat tsunami na bereg* [Physical and mathematical models of tsunami runup on shore. Wave run-up onto the coast]. Gorkiy: IPF AN SSSR, 1985. Pp. 8–34. (rus)
25. Demchenko R.I., Zheleznyak M.I., Kivva S.L., Kolomiyets P.S. Chislennaya model voln, techeniy i pereformirovaniya beregov pribrezhnoy zony morya [Numerical model of waves, currents, and the reorganization of the coast of the coastal zone]. *Sbornik trudov konferentsii «Modelirovaniye – 2006»* [Proceedings of the conference "Modelling – 2006"]. Kiyev, 2006. Pp. 197–201. (rus)
26. Demchenko R.I., Zheleznyak M.I. Giperbolicheskaya approksimatsiya transformatsii voln na techeniyakh pribrezhnoy zony [Hyperbolic approximation of wave transformation for a coastal zone]. *Prikladnaya gidromekhanika*. 2002. Vol. 4. No. 2. Pp. 23–29. (rus)
27. Kivva S.L., Zheleznyak M.I. Dvumernoye modelirovaniye stoka i transporta nanosov s malykh vodosborov [Two-dimensional modeling of flow and sediment transport from small watershed]. *Prikladnaya gidromekhanika*. 2002. Vol. 4. No. 1. Pp. 67–89. (rus)
28. Hughes S.A. Estimation of run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter. *Coastal Engineering*. 2004. Vol. 51. Pp. 1085–1104.

**Full text of this article in Russian: pp. 13–23**