

## СПОСОБ ЗАЩИТЫ ПЛЯЖА ОТ РАЗМЫВА ПРИБОЙНЫМИ ВОЛНАМИ

В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова, Л.А. Белова

Калининградский государственный технический университет  
Советский пр., 1, Калининград, Россия, 236022

В работе рассматривается гидротехническое сооружение, предназначенное для защиты морского побережья от размыва. На основании действующих рекомендаций по расчету нагрузок и воздействий на данные сооружения определены основные расчетные параметры.

**Ключевые слова:** морские берегозащитные сооружения, оболочка, защита пляжа

Куршская коса (Калининградская область, РФ) является уникальным природным комплексом, ее берега омываются Балтийским морем с одной стороны, Куршским заливом — с другой (рис. 1).



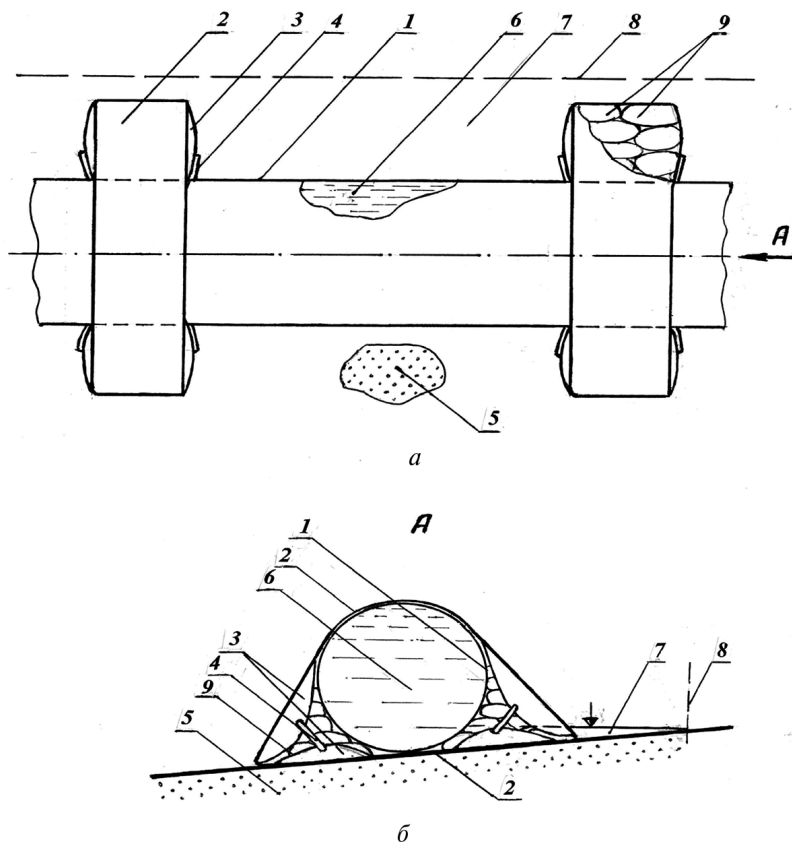
Рис. 1. Куршская коса [1]

Состояние побережья косы во многом зависит от воздействия моря и лагуны (залива). Интенсивный размыв и отступление берегов с обеих сторон угрожает существованию этого природного объекта [2; 3].

Для защиты побережья от размыва прибойными волнами разработано устройство [4] — оболочка с подпорными стенками из мешков с пляжным грунтом (рис. 2, 3).

В данной статье проведен расчет веса мешков с грунтом, необходимого для равновесия гидротехнического сооружения в период размыва пляжа прибойными волнами.

Полагаем, что вес мешков с грунтом слева и справа одинаков  $G_1 = G_2$ . Максимальные значения горизонтальной  $P_x$ , кН/м и вертикальной  $P_z$ , кН/м проекций равнодействующей нагрузки от разбивающихся волн на вертикальную волнозащитную стену (при отсутствии засыпки грунта со стороны берега) необходимо принимать по эпюрам бокового и взвешивающего волнового давлений (рис. 4).



**Рис. 2.** Оболочка с подпорными стенками из мешков с пляжным грунтом [4]: а — вид сверху; вид по А; 1 — оболочка; 2 — лента; 3 — фартук; 4 — стяжка; 5 — пляж; 6 — вода; 7 — прудок-отстойник; 8 — граница пруда-отстойника; 9 — мешки с пляжным грунтом



**Рис. 3.** Вид защитного устройства во время испытаний

При этом значения давления  $p$  и  $\eta$  определяются в зависимости от места расположения сооружения. При расположении сооружения на берегу за линией уреза в пределах наката волн (рис. 4) по формулам [5]:

$$p = 0,7 \cdot \left(1 - \frac{al}{ar}\right) \cdot p_u, \quad p_u = \rho gh \cdot \left(0,033 \frac{\lambda}{d} + 0,75\right), \quad \eta = \frac{p}{\rho g}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\lambda$  — средняя длина волн, м;  $\eta$  — превышение гребня волны над расчетным уровнем в створе волнозащитной стены, м;  $p_u$  — наибольшее давление волн в створе последнего обрушения прибойных волн, кПа;  $h$  — высота разбивающихся волн, м;  $an$  — расстояние от створа последнего обрушения волн до линии уреза (приурезовая зона), м;  $al$  — расстояние от линии уреза воды до сооружения, м;  $ar$  — расстояние от линии уреза воды до условной границы наката на берег разбивающихся волн (при отсутствии сооружения), м;  $d$  — глубина воды в створе последнего обрушения прибойных волн.

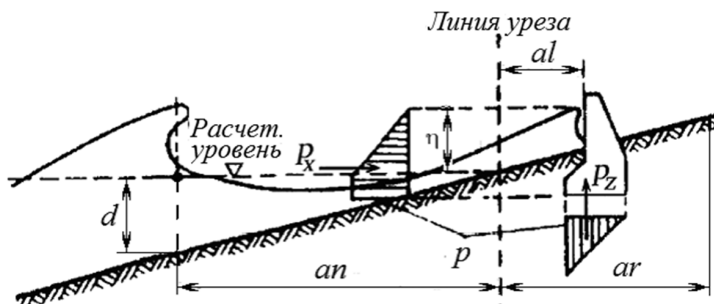


Рис. 4. Расчетная схема

Критическая глубина  $dc$  при первом обрушении волн определяется для заданных уклонов дна  $i$  по графикам из [5]. Были получены формулы, аппроксимирующие графики. Для  $i \leq 0,02$  погрешность аппроксимации не превышает 5%:

$$db = 0,0106 - 0,1452d + 1,6403 \cdot 10^3 \cdot d^2 - 1,1442 \cdot 10^5 \cdot d^3 + 2,7099 \cdot 10^6 \cdot d^4, \quad (2)$$

$$db = dc/\lambda, \quad d = h1/(gT^2).$$

Период  $T$  и средняя длина волны связаны формулой [5]

$$\lambda = gT^2/(2\pi).$$

Критическая глубина, соответствующая последнему обрушению волн  $d$ , при заданном постоянном уклоне дна  $i$  определяется по формуле [5]

$$d = k^{n-1} \cdot dc, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент, принимаемый по второй строке таблицы 1 [5];  $n$  — число обрушений волн.

Величина  $n$  принимается из ряда  $n = 2, 3$  и  $4$  при выполнении двух неравенств

$$k^{n-2} \geq 0,43 \text{ и } k^{n-1} < 0,43. \quad (4)$$

Заметим, при уклонах дна более 0,05 принимают  $d = dc$ . Сравнение квадрата и куба коэффициента  $k$  в таблице с 0,43 позволило определить количество обрушений волны при заданном уклоне дна.

Далее будем рассматривать случай, когда защитное сооружение установлено на линии уреза. Тогда  $al = 0$ , первая формула (1) упростится. При построении сил, действующих на защитное сооружение (рис. 5) можно пренебречь их отклонением от вертикали и горизонтали, так как косинусы углов наклонной плоскости близки к единице (табл.).

Таблица

Параметры, применяемые при расчетах

Уклон дна $i$	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05
Коэффициент $k$	0,75	0,63	0,56	0,5	0,45	0,42	0,4	0,37	0,35
$k^2$	0,563	0,397	0,314	0,25	0,202	0,176	0,16	0,137	0,122
$k^3$	0,423	0,250	0,176	0,125	0,091	0,074	0,064	0,051	0,043
Количество обрушений $n$	4	3	3	3	3	2	2	2	2
$\cos \varphi$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,999	0,999	0,999	0,999

Пусть центры тяжести мешков с песком находятся на расстоянии  $a/4$  от края сооружения. Кроме того,  $\eta \geq D$ , тогда избыточное давление в верхней точке вычисляется по формуле

$$p_0 = p(1 - D/\eta).$$

Составляющие равнодействующей сил давления воды  $P_x, P_z$  вычислялись по формулам [6; 7].

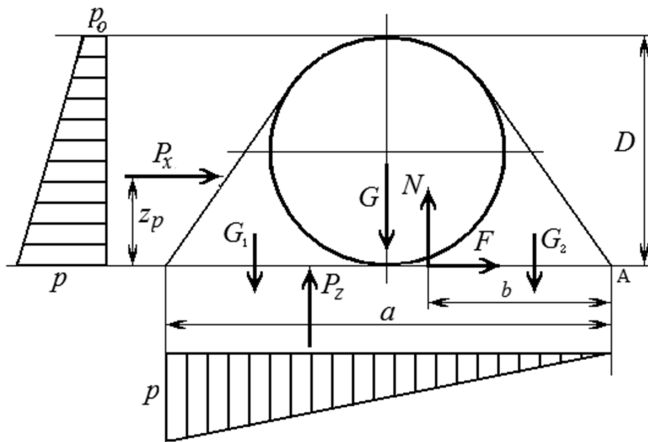


Рис. 5. Схема сил, действующих на защитное сооружение

Система уравнений равновесия при недеформированном объекте:

$$-bN + 0,5a \cdot G + 0,75a \cdot G_1 + 0,25a \cdot G_2 - 0,667a \cdot P_z - z_p \cdot P_x = 0 \quad (5)$$

$$N - G - G_1 - G_2 + P_z = 0, \quad (6)$$

$$F + P_x = 0. \quad (7)$$



Из уравнения (7) суммарная горизонтальная реакция поверхности

$$F = -P_x.$$

Из уравнения (6) вертикальная реакция поверхности

$$N = G + 2G_1 - P_z = 0.$$

Из уравнения (5)

$$b = \frac{0,5a \cdot G + a \cdot G_1 - 0,667a \cdot P_z - z_p \cdot P_x}{G + 2G_1 - P_z}. \quad (8)$$

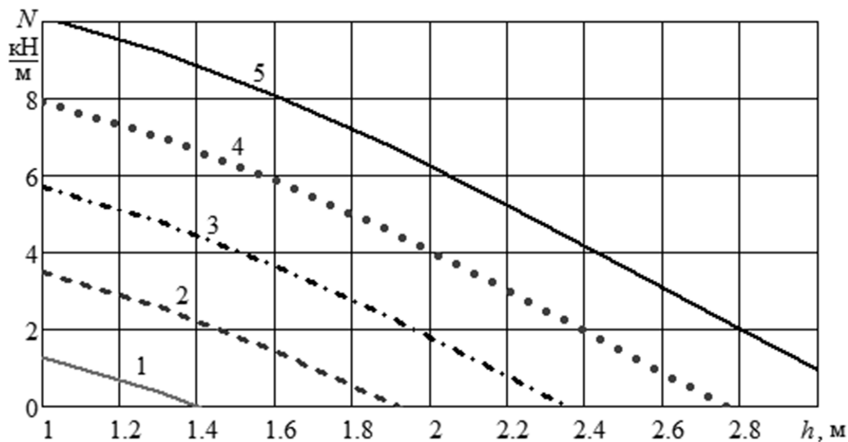
По формуле центра тяжести трапеции

$$z_p = \frac{D}{3} \cdot \frac{2p_0 + p}{p_0 + p}.$$

Величина безразмерного плеча нормальной реакции  $\delta$ :

$$\delta = \frac{b}{a} = \frac{0,5G + G_1 - 0,667 \cdot P_z - P_x z_p / a}{N}. \quad (9)$$

Были рассчитаны реакции при следующих параметрах:  $D = 1,5$  м;  $a = 1,7D$ . Для сохранения равновесия необходимо выполнение условия  $N > 0$ , в противном случае тело оторвется от поверхности (всплывет). По рисунку 6 можно определить необходимый вес мешков с грунтом при заданной высоте волны.



**Рис. 6.** Нормальная реакция в зависимости от высоты волны при длине волны 30 м и различных значениях  $\gamma = G_1/G$ : 1 —  $\gamma = 0,4$ ; 2 —  $\gamma = 0,5$ ; 3 —  $\gamma = 0,6$ ; 4 —  $\gamma = 0,7$ ; 5 —  $\gamma = 0,8$

Для сохранения равновесия должно выполняться неравенство  $0 < \delta < 1$ , в противном случае произойдет опрокидывание. На рисунке 7 представлены результаты расчета величины безразмерного плеча нормальной реакции. Видно, при каких значениях  $\gamma$  устройство опрокидывается ( $\delta$  падает до нуля).

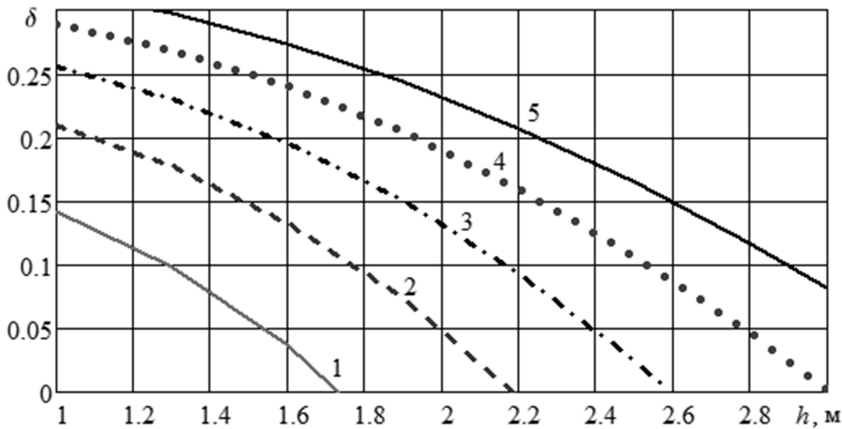


Рис. 7. Безразмерное плечо нормальной реакции в зависимости от высоты волны при длине волны 30 м и различных значениях  $\gamma = G_1/G$ : 1 —  $\gamma = 1,2$ ; 2 —  $\gamma = 1,4$ ; 3 —  $\gamma = 1,6$ ; 4 —  $\gamma = 1,8$ ; 5 —  $\gamma = 2,0$

Чтобы не началось скольжение, должно быть выполнено условие

$$|F| \leq N \cdot f \text{ или } f \geq P_x/N. \quad (10)$$

На рисунке 8 представлены результаты расчета величины коэффициента трения скольжения, необходимого для сохранения равновесия. На рисунке 8 необходимо провести горизонтальную линию  $f = fc$ , где  $fc$  — коэффициент сцепления. При значениях безразмерных параметров устройства, соответствующих линиям, лежащим ниже этой горизонтали, скольжение будет отсутствовать.

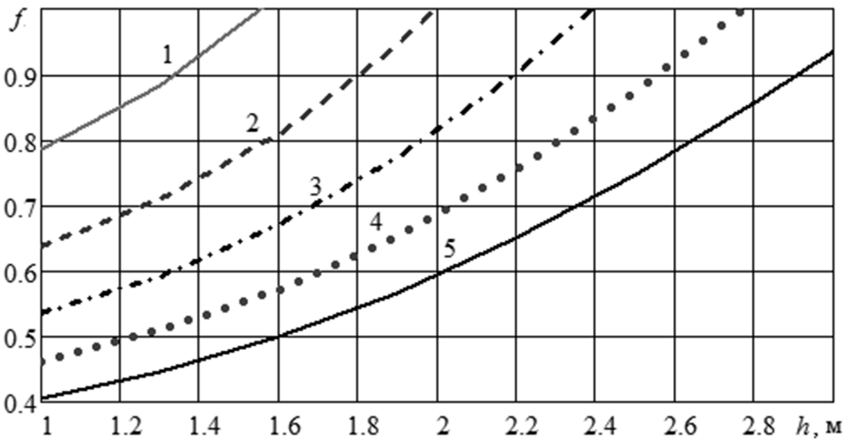


Рис. 8. Величина коэффициента трения, необходимая для сохранения равновесия в зависимости от высоты волны при различных значениях  $\gamma$ : 1 —  $\gamma = 1,2$ ; 2 —  $\gamma = 1,4$ ; 3 —  $\gamma = 1,6$ ; 4 —  $\gamma = 1,8$ ; 5 —  $\gamma = 2,0$

По трем графикам необходимо определить, какое из условий является критическим для сохранения условий равновесия защитного устройства. Пусть  $fc = 0,7$ ;  $h = 1,7$  м. По рисунку 7 для отсутствия скольжения должно быть  $\gamma > 1,6$ . По рисунку 6 для отсутствия опрокидывания —  $\gamma > 1,2$ . По рисунку 6, чтобы устройство

не всплывало, —  $\gamma > 0,47$ . Таким образом, критическим будет условие отсутствия скольжения.

Оценим, какой должна быть плотность грунта в мешках, чтобы сохранялось равновесие  $\gamma > 1,6$  или  $G_1 > 1,6G$ . Выразим вес через плотности и площади сечения, получим неравенство

$$S_1 \cdot \rho_1 > 1,6 \cdot S_0 \cdot \rho_0,$$

где  $\rho_0, \rho_1$  — плотность воды и грунта в мешках, соответственно;  $S_0, S_1$  — площадь сечения цилиндрической оболочки с водой и пространства для мешков (с одной стороны), соответственно.

В рассматриваемом примере отношение  $S_1/S_0 \approx 0,23$ . Тогда должно выполняться неравенство  $\rho_1 > 6950 \text{ кг/м}^3$ , что практически не реализуемо.

Таким образом, рассматриваемое устройство можно использовать, наполняя мешки пляжным грунтом, при высоте волн до 1 м.

Теоретические данные согласуются с результатами, полученными в ходе натурных наблюдений, которые проводились на Куршской косе Калининградской области.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Портал единой государственной системы об обстановке в мировом океане. URL: <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/services/> (дата обращения: 30.04.2016).
- [2] Белова Л.А., Ахмедова Н.Р. К вопросу об охране земель рекреационного назначения // Труды Кубанского государственного аграрного университета: Научный журнал. № 5(56). 2015. С. 221—227.
- [3] Бурнашов Е.М. Современная динамика и геоэкологическое состояние морского берега Калининградской области: дисс. ... канд. геогр. наук. Барнаул, 2011. 205 с.
- [4] Пат. 2472897 Российская Федерация, МПК E02B3/04, E02B3/06 Устройство для защиты песчаных пляжей от размыва прибойными волнами / А.С. Ведяшкин, Л.А. Терещенко. Заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет (RU). 2011125385/13; заявл. 20.06.2011; опубл. 20.01.2013 7 с.
- [5] СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
- [6] Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Белова Л.А. Расчет усилий волнового давления на мобильное защитное устройство, размещенное на линии уреза // Материалы второй международной научно-практической конференции «Образование, наука и техника: актуальные проблемы и тенденции развития» (г. Донецк, Украина, 15—17 февраля 2014 г.). Донецк, 2014. С. 77—82.
- [7] Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Белова Л.А. Метод расчета усилий волнового давления в креплениях берегозащитного устройства // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 10. С. 57—60.

## A METHOD OF PROTECTING AGAINST WASHOUT BEACH TIDAL WAVES

V.A. Naumov, N.R. Akhmedova, L.A. Belova

Kaliningrad State Technical University  
*Sovetskiy pr., 1, Kaliningrad, Russia, 236022*

The paper deals with hydraulic structure that is designed for the protection of the sea coast against washout, the results of calculations of the basic parameters.

**Key words:** sea defenses sea, shell, beach protection

### REFERENCES

- [1] Portal yedinoy gosudarstvennoy sistemy ob obstanovke v mirovom okeane [Portal a single state system about the situation in the world's oceans]. Available at: <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/services/> (accessed 30.04.2016).
- [2] Belova L.A., Akhmedova N.R. K voprosu ob okhrane zemel' rekreatsionnogo naznacheniya [The question of conservation areas and recreational parks]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proc. of the Kuban State Agrarian University]. *Nauchnyy zhurnal*. No 5(56). 2015. Pp. 221—227.
- [3] Burnashov Ye.M. *Sovremennaya dinamika i geoeologicheskoye sostoyaniye morskogo berega Kaliningradskoy oblasti: diss. ... kand. geogr. nauk* [Modern dynamics and geoeological state of the Kaliningrad area sea-shore. *Cand. geogr. scie. diss.*]. Barnaul, 2011. 205 p.
- [4] Pat. 2472897 Rossiyskaya Federatsiya, MPK Ye02V3/04, Ye02V3/06 *Ustroystvo dlya zashchity peschanykh plyazhey ot razmyva priboynymi volnami* [Device for protecting sandy beaches from washing away by surf waves]. A.S. Vedyashkin, L.A. Tereshchenko. *Zayavitel' i patentoobladatel' Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet* [Kaliningrad State Technical University]. 2011125385/13; *zayavl.* 20.06.2011; *opubl.* 20.01.2013. 7 p.
- [5] SP 38.13330.2012. *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov)* [Set of rules 38.13330.2012. Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships)].
- [6] Naumov V.A., Akhmedova N.R., Belova L.A. *Raschet usiliy volnovogo davleniya na mobil'noye zashchitnoye ustroystvo, razmeshchennoye na linii ureza* [Calculation of wave pressure forces on a mobile protective device placed on the edge line]. *Materialy vtoroy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Obrazovaniye, nauka i tekhnika: aktual'nyye problemy i tendentsii razvitiya»* [Proc.of the Second International sci. and prac. conf. "Education, science and technology: current issues and trends"] (Donetsk, Ukraina, 15—17 February 2014). Donetsk, 2014. Pp. 77—82.
- [7] Naumov V.A., Akhmedova N.R., Belova L.A. *Metod rascheta usiliy volnovogo davleniya v kreplenyakh beregozashchitnogo ustroystva* [Method of calculation of the efforts of wave pressure on mounts of the coast protection device]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2014. No 10. Pp. 57—60.