

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ПЛАВУЧИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**ANALYSIS OF STRESSED-DEFORMED CONDITION  
OF FLOATING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

*Д.В. МОРОЗОВА, Д.Ю. МАЛАХОВ*  
*D.V. MOROZOVA, D.YU. MALAKHOV*

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))  
(National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI))  
E-mail: gbk@mgsu.ru; kt@madi.ru

*В статье рассмотрены вопросы устройства причалов из плавучих железобетонных понтонов для восстановления грузоперевозок по водным артериям страны для нужд промышленности, в том числе текстильной. Приведены алгоритмы определения нагрузок на плавучий железобетонный понтон при экстремальном волновом режиме. Приведено конструктивное решение понтона. Показано влияние волновой и ветровой нагрузки, а также нагрузки, связанной с наличием течения. Проведен компьютерный расчет железобетонного понтона при одновременном действии на него ветровой и волновой нагрузок, а также нагрузки от течения. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния железобетонного понтона на стадии его разрушения при экстремальных волновых воздействиях.*

*The article deals with the construction of berths of floating concrete pontoons for the restoration of cargo transportation through the waterways of the country for the needs of industry, including textile. In the article the algorithms of determination of loads on a floating reinforced concrete pontoon under extreme wave conditions are considered. The design of the pontoon is shown. The influence of the wave and wind loads, as well as the load associated with the presence of flow, is shown. The computer calculation of the reinforced concrete pontoon has been carried out, while wind and wave loads, as well as loads from the current, are acting on it. The stress-strain state of reinforced concrete pontoon is analyzed at the stage of its destruction under extreme wave effects.*

**Ключевые слова:** плавучий железобетонный понтон, экстремальные волновые воздействия, алгоритмы определения нагрузок, компьютерный расчет, напряженно-деформированное состояние.

**Keywords:** moorings on the rivers, floating reinforced concrete pontoon, extreme wave action, algorithms for determining of the loads, computer calculation, stress-strain state.

В связи с оживлением отечественного производства, в том числе – в текстильной промышленности, возникает необходимость увеличения перевозок по водным ар-

териям России, что сопряжено со строительством причальных сооружений, для которых могут быть использованы и плавучие железобетонные понтоны [1...5]. В статье

рассматриваются экстремальные волновые аспекты их применения, характерные для открытых акваторий морей, крупных рек и озер. Поводом для исследований послужил факт разрушения железобетонного понтона в морской бухте.

Волновой режим в бухте складывается из волнений двух типов.

1. Проникающее в бухту со стороны моря – наиболее интенсивное при действии южных и юго-западных ветров. При скорости ветра 10...15 м/с высота волны достигает 2,5 м; длина волны 40 м. При скорости ветра 15...20 м/с длина волны достигает 65 м.

2. Волновое поле возникает в самой бухте под действием юго-восточных, северо-западных и северо-восточных ветров. При сильном северо-восточном ветре на выходе из бухты и под западным берегом высота волн достигает 2...2,5 м.

Конструктивное решение плавучего железобетонного понтона приведено на рис. 1, где 1 – железобетонный каркас понтона, 2 – четыре пенополистирольных блока, 3 – причальная тумба, 4 – стальной адаптер, 5 – привальный брус, 6 – внешняя доска, 7 – петля для якоря, 8 – кабель-канал, 9 – крепежная направляющая. Размеры плиты: длина  $L = 14,88$  м; ширина плиты  $B = 2,4$  м. Пла-

вучесть плит понтона достигается наполнением пространства между ребрами плиты полимерным материалом – пенополистиролом с плотностью  $\rho_n = 0,3$  кН/м<sup>3</sup>.

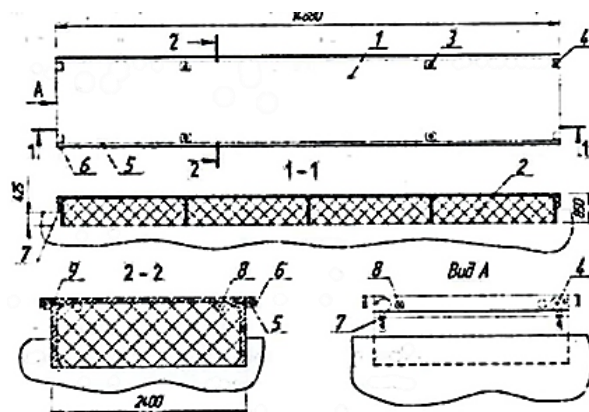


Рис. 1

Рассчитаем волновые и иные воздействия на понтон. Рассмотрим расчетный случай при скорости ветра в бухте 10 м/с. При определении внешних нагрузок, действующих на плавучий понтон, использовали методику, изложенную в [6], разработанную на основании результатов многолетних натурных исследований и обобщенную в [9]. Расчетные значения поперечной  $Q_w$  и продольной  $N_w$  составляющих силы воздействия ветра на плавучие объекты определены по формулам (п.6.2) из [6]:

$$Q_w = 73,6 \cdot 10^{-5} \gamma_f A_q V_q^2 \xi = 73,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 6,35 \cdot 10^2 \cdot 1 = 0,7 \text{ кН},$$

$$N_w = 49,0 \cdot 10^{-5} \gamma_f A_n V_n^2 \xi = 49,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 1,02 \cdot 10^2 \cdot 1 = 0,1 \text{ кН},$$

где  $A_q = 6,35$  м<sup>2</sup> – боковая надводная площадь парусности (силуэтов) плавучего железобетонного понтона, м<sup>2</sup>;  $A_n = 1,02$  м<sup>2</sup> – лобовая надводная площадь парусности (силуэтов) плавучего железобетонного понтона, м<sup>2</sup>;  $V_q$  и  $V_n$  – соответственно поперечная и продольная составляющие анемометрической скорости ветра  $\gamma_w$ , м/с, принимаемые в соответствии с табл. 7 из [4];  $\xi$  – коэффициент, зависящий от наибольшего горизонтального размера  $\alpha_h$ , м, поперечного или продольного силуэтов надводной части плавучего объекта, принимается по табл. 8 из [4]. При длительной стоянке объекта [(группы 3 и 4, табл. 7) 1] коэффициент  $\xi = 1$  [4];  $\gamma_f = 1,4$  – коэффициент надежности

для ветровой нагрузки, принимаемый по СП 20.13330. 2016 [7].

Площади парусности определены с учетом площадей экранирующих преград, расположенных с наветренной стороны (приложение И) [6]. Нагрузки от воздействия ветра на погонный метр плиты: поперечная –  $q_{Qw} = 0,7/14,88 = 0,05$  кН/м; продольная –  $q_{Nw} = 0,1/2,4 = 0,04$  кН/м.

Расчетные значения поперечной  $Q_c$  и продольной  $N_c$  составляющих силы от воздействия течения на плавучие объекты определены по формулам [(35), (36), 1]:

$$Q_c = C_y \frac{\rho}{2} A_l V_t^2, \quad N_c = C_x \frac{\rho}{2} A_t V_t^2,$$

где  $C_y$ ,  $C_x$  – обобщающие коэффициенты продольной и поперечной силы воздействия течения, определяемые с учетом соотношения осадки плавучего объекта и глубины воды (приложение К) [6].

Вычисляем  $C_y$  по формуле [(К.4), 1]:

$$C_y = C_y^\infty + (C_y^1 - C_y^\infty) (T_k/d)^{k_1}.$$

Здесь принимаем минимальные значения:  $d=5,5$  м – средняя глубина воды в бухте в месте расположения понтона;  $C_y^\infty = 0,4$ ;  $C_y^1 = 2$  (по данным табл. К.2);  $k_1 = 2$  (Приложение К) [6];  $\rho = 10,3$  кН/м<sup>3</sup> – средняя плотность морской воды;  $A_t$  и  $A_b$  – соответственно боковая и лобовая подводные площади парусности плавучих объектов, м<sup>2</sup>;  $V_t$  и  $V_l$  – поперечная и продольная составляющие скорости течения, м/с, принимаемые в соответствии с [табл. 7, 6];  $T_k$  – величина осадки плавучего объекта.

Принимаем  $T_k = 0,425$  м, равной половине высоты ребер плиты:

$$C_y = 0,4 + (2 - 0,4)(0,425/5,5)^2 = 0,4.$$

По данным многолетних метеонаблюдений средняя скорость течения в Черном море в прибрежной зоне составляет 0,45 м/с [8]:

$$Q_c = 0,4 \cdot 10,3 \cdot 6,35 \cdot 0,45^2 / 2 = 2,7 \text{ кН}$$

Поперечная нагрузка от воздействия течения на погонный метр плиты:  $q_{Qc} = 2,7/14,88 = 0,18$  кН/м. Коэффициент сопротивления продольной нагрузки от течения  $C_x$ , определяемый как сумма коэффициента сопротивления формы плавучего объекта, коэффициента сопротивления, обусловленного трением воды по смоченной поверхности объекта, и коэффициента сопротивления объекта вычисляется по формуле [(К.1), 6]:

$$C_x = 0,1[1,0 + C_t L_s (1,7/V_k + 35\delta/T_k)] + 1,2L_s/T_k A_R,$$

где  $C_t$  – коэффициент сопротивления трению, вычисляемый по формуле [(К.2), 1]:

$$C_t = 0,075/(\log Re_n - 2)^2,$$

$Re_n$  – число Рейнольдса, определяемое по формуле [(К.3), 6].

$Re_n = V_t L_s / \nu = 0,45 \cdot 14,88 / 1,0 \cdot 10^{-6} = 6696 \cdot 10^3$ ,  
 $C_t = 0,075 / (\log 6696 \cdot 10^3 - 2)^2 = 0,075 / (6,83 - 2)^2 = 0,003$ ;  $L_s$  – длина плавучего объекта (плиты) по ватерлинии, равная 14,88 м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости морской воды, принимаемый равным  $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – коэффициент общей полноты объекта;  $V_k$  – ширина плавучего объекта при рассматриваемой загрузке, равная 2,4 м;  $A_R$  – величина, характеризующая площадь плавучего объекта, принимаемая по данным табл. К.1 в зависимости от его типа.

Принимаем  $A_R = 1$ ;  $\delta = 1$ .

$$C_x = 0,1[1,0 + 0,003 \cdot 14,88(1,7/2,4 + 35 \cdot 1/0,425)] + 1,2 \cdot 14,88/0,425 \cdot 1 = 42,5.$$

Продольная  $N_c$  составляющая силы от воздействия течения на плавучий объект:

$$N_c = C_x \rho A_t V_l^2 / 2 = 42,5 \cdot 10,3 \cdot 1,02 \cdot 0,45^2 / 2 = 45,2 \text{ кН}.$$

Продольная нагрузка от воздействия течения на погонный метр плиты:  $q_{Nc} = 45,2/2,4 = 18,8$  кН/м. Расчетные максимальные значения поперечной  $Q$  и продольной  $N$  горизонтальных сил от воздействия волн на плавучие объекты определены по формулам (37), (38) из [6]:

$$Q \approx \gamma_t \rho g h A_t, \quad N \approx g h A_t,$$

где  $\approx$  – коэффициент, зависящий от осадки  $d_s$ , м, плавучего объекта; принимается по графику (рис. 15, [6]);  $\gamma_t$  – коэффициент, принимаемый по табл. 9 [6], в которой  $a_t$  – наибольший горизонтальный размер продольного силуэта подводной части плавучего объекта, м;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение силы тяжести;  $h$  – высота волны обеспеченностью 5 % в системе, равная 2,5 м;  $A_l$  и  $A_t$  – обозначения те же, что и в 6.3 из [6].

$$Q = 0,85 \cdot 1 \cdot 10,3 \cdot 9,8 \cdot 2,5 \cdot 6,35 = 1362 \text{ кН},$$

$$N = 0,85 \cdot 10,3 \cdot 9,8 \cdot 2,5 \cdot 1,02 = 219 \text{ кН}.$$

Нагрузки от воздействия волн на погонный метр плиты: поперечная –  $q_Q = 1362/14,88 =$

= 91,6 кН/м, продольная –  $q_N = 219/2,4 = 91,3$  кН/м.

В первом приближении, для предварительной оценки напряженного состояния железобетонной плиты понтона, принимаем вертикальное волновое давление на плиту как равномерно распределенную нагрузку с ординатой:

$$q_{\text{волн}} = \rho_v h_v V = 10,3 \cdot 2,5 \cdot 2,4 = 61,8 \text{ кН/м,}$$

где  $\rho_v = 10,3 \text{ кН/м}^3$  – средняя плотность морской воды;  $h_v = 2,5 \text{ м}$  – высота волны;  $V = 2,4 \text{ м}$  – ширина плиты.

Взвешивающее давление, действующее на плиту:

$$q_{\text{взв}} = -\rho_v h_p V = -10,3 \cdot 0,85 \cdot 2,4 = -21,0 \text{ кН/м,}$$

где  $h_p = 0,85 \text{ м}$  – высота ребер плиты;  $V = 2,4 \text{ м}$  – ширина плиты.

Нагрузки от натяжения тросов принимаем по методике, изложенной в [1] (п.п.6.2; 6.3) для определения усилий в швартовых в судах, с учетом поперечной составляющей суммарной силы  $Q_{\text{tot}}$ , кН, от действия на одно расчетное судно ветра и течения.

Значения

$$Q_{\text{tot}} = Q_w + Q_c = 0,7 + 2,7 = 3,4 \text{ кН.}$$

Воспринимаемую одним узлом силу  $S$  на уровне верхней плоскости плиты (рис. 17) из [6] определяем по формуле:

$$S = \frac{Q_{\text{tot}}}{n \sin \alpha \cos \beta} = 3,4/4 \sin 30^\circ \cos 30^\circ = 2,0 \text{ кН,}$$

где  $n = 4$  – число работающих тумб (в нашем случае, узлов крепления тросов к плите), принимаемое по табл. 11 из [1];  $\alpha, \beta$  – углы наклона троса, град, принимаемые по табл. 12 [6].

На рис. 2 показана геометрия продольного (а) и поперечного (б) сечения понтона с указанием поверхностей приложения вычисленных нагрузок, где 1 – волновое давление на горизонтальную поверхность  $q_{\text{волн}}$ ; 2 – взвешивающее давление  $q_{\text{взв}}$ ; 3, 5 – поперечное давление от воздействия волн  $q_Q$ ; 4, 6 – продольное давление от воздействия волн  $q_N$ ; 3 – продольное давление от воздействия ветра  $q_{Nw}$ ; 5 – поперечное давление от воздействия течения  $q_{Qc}$ ; 6 – продольное давление от воздействия течения  $q_{Nc}$ .

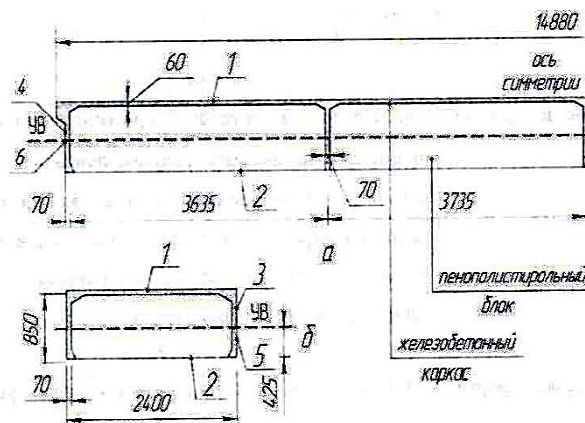


Рис. 2

В табл. 1 представлены расчетные значения нагрузок, приложенные к поверхностям (позиции 1...6 на рис. 2) плавучего понтона.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Наименование и обозначение нагрузок	Позиция поверхности	Расчетные значения нагрузок, кН/м <sup>2</sup>
1	Волновое давление на горизонтальную поверхность $q_{\text{волн}}$	1	$61,8/2,4 = 25,75$
2	Взвешивающее давление $q_{\text{взв}}$	2	$21/2,4 = 8,75$
3	Поперечное давление от воздействия волн $q_Q$	3 и 5	$91,5/0,85 = 107,76$
4	Поперечное давление от воздействия ветра $q_{Qw}$	3	$0,05/0,425 = 0,12$
5	Поперечное давление от воздействия течения $q_{Qc}$	5	$0,18/0,425 = 0,42$
6	Продольное давление от воздействия волн $q_N$	4 и 6	$91,3/0,85 = 107,41$
7	Продольное давление от воздействия ветра $q_{Nw}$	4	$0,04/0,425 = 0,09$
8	Продольное давление от воздействия течения $q_{Nc}$	6	$18,8/0,425 = 44,3$

Плавающий железобетонный понтон армируется сетками и отдельными стержнями. Сетки устанавливаются в верхней плите толщиной 60 мм и в продольных и поперечных стенках толщиной 70 мм. Сетки изготавливаются из арматурных стержней  $\text{Ø}8\text{A}500\text{C}$  и имеют размер ячейки  $200 \times 200$  мм. В ребрах понтонов устанавливаются дополнительные арматурные стержни  $\text{Ø}10\text{A}500\text{C}$ ,  $\text{Ø}12\text{A}500\text{C}$ ,  $16\text{A}500\text{C}$ ,  $\text{Ø}8\text{A}500\text{C}$ . Для изготовления понтона использовался бетон В 45. В зависимости от класса бетона толщина защитного слоя арматуры для конструктивных элементов понтона может быть принята 45, 40 или 25 мм.

При проведении компьютерного расчета [10] понтона были рассмотрены два варианта нагружения. В первом варианте нагружения прикладывается волновое давление на горизонтальную поверхность совместно с поперечным давлением от воздействия волн, ветра и течения. Во втором варианте – волновое давление на горизонтальную поверхность совместно с продольным давлением от воздействия волн, ветра и течения. Результаты определения перемещений понтона на деформированной схеме и изополя напряжений для 1-го (а) и 2-го варианта нагружения понтона (б) представлены на рис. 3.

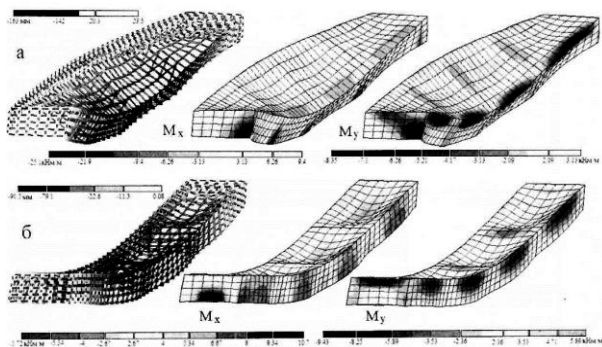


Рис. 3

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонного понтона при комплексном действии волновой, ветровой нагрузки, а также нагрузки от мощного течения в сторону акватории, образованного при разрушении волн заплеска, показывает, что в конструкции понтона возникают значительные

растягивающие и изгибные напряжения, вызывающие недопустимые деформации бетона.

## ВЫВОДЫ

1. Условия эксплуатации плавающих понтонов в прибрежных зонах морей или крупных озер (Ладожское, Онежское) существенно отличаются от их условий эксплуатации на реках, малых озерах и водохранилищах из-за состояния водной поверхности, характеризующейся волнениями различной балльности, что в свою очередь объясняется различиями в ветро-волновом режиме, геологии дна, глубинах и т.п. [11].

2. В большинстве случаев в прибрежной части акватории возникают волны до двух-трех баллов (с высотой волны от 0,25 до 1,25 м). Достаточно часто с береговыми пляжами взаимодействуют волны в 4 или 5 баллов (с высотой волны от 1,25 до 2,5 м). Для таких волн сила удара о преграду может достигать 26...30 кН и более на квадратный метр площади. В открытой акватории при порывах ветра до 80 м/с силовое гидродинамическое воздействие череды разрушающихся волн, обладающих большой потенциальной и кинетической энергией и вызывающих качку (изгибное воздействие на железобетонные понтоны), приводит к разрушению понтонов.

3. Таким образом, плавучие железобетонные понтоны целесообразно применять для защищенных акваторий, преимущественно для рек и малых озер (водохранилищ) с предельными характеристиками волнения 2...3 балла. Причем понтоны должны быть закорены так, чтобы исключались их перемещения под воздействием волн и ветра, носящие колебательный характер [11], вызывающие деформации, возможные столкновения с соседними понтонами и причалом с последующим разрушением понтонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тамразян А.Г., Булгаков С.Н., Рахман И.А., Степанов А.Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / Под общей ред. докт. техн. наук, проф. Тамразяна А.Г. – Изд. второе. – М.: Изд-во АСВ, 2012.

2. Tamrazyan A.G. To evaluation of determining the risk level of extremal situations according to the main signs of its display on structure // Beton and Zhelezobeton. – (5), 2001. P. 8...11.

3. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 467, 2014. P. 404...409.

4. Тамразян А.Г., Орлова М.А. К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами // Жилищное строительство. – 2015, № 6. С.32...34.

5. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов – необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". – 2009, № 1. С.160...171.

6. СП 38.13330. 2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*.

7. СП 20.13330. 2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*.

8. <http://blacksea7.com/poverhnostnye-techeniya-v-chnom-more.html>.

9. Shaitan V.S., Shaitan K.V., Morozova D.V. Protection of earth slopes of hydraulic structures // Balkema A.A. – Rotterdam: Brookfield, 1997. P. 488.

10. Малахова Л.Н., Мухин М.А. Проектирование железобетонных конструкций с использованием программного комплекса ЛИРА. – М.: МГСУ, 2015.

11. Степанов А.П., Малахов Д.Ю. Мореходная машина и участки прибойной зоны // Автомобильная промышленность. – 2002, №4. С. 20...22.

#### REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Bulgakov S.N., Rakhman I.A., Stepanov A.Yu. Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnoho i tekhnogennogo kharaktera / Pod obshchey red. dokt. tekhn. nauk, prof.

Tamrazyana A.G. – Izd. vtoroe. – M.: Izd-vo ASV, 2012.

2. Tamrazyan A.G. To evaluation of determining the risk level of extremal situations according to the main signs of its display on structure // Beton and Zhelezobeton. – (5), 2001. P. 8...11.

3. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 467, 2014. P. 404...409.

4. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. K ostatochnoy nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh balok s treshchinami // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2015, № 6. S. 32...34.

5. Tamrazyan A.G. Otsenka riska i nadezhnosti nesushchikh konstruksiy i klyuchevykh elementov – neobkhodimoe uslovie bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy // Vestnik TsNIISK im. V.A. Kucherenko "Issledovaniya po teorii sooruzheniy". – 2009, № 1. S.160...171.

6. SP 38.13330. 2012. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.04-82\*.

7. SP 20.13330. 2016. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85\*.

8. <http://blacksea7.com/poverhnostnye-techeniya-v-chnom-more.html>.

9. Shaitan V.S., Shaitan K.V., Morozova D.V. Protection of earth slopes of hydraulic structures // Balkema A.A. – Rotterdam: Brookfield, 1997. P. 488.

10. Malakhova L.H., Mukhin M.A. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruksiy s ispol'zovaniem programmnoho kompleksa LIRA. – M.: MGSU, 2015.

11. Stepanov A.P., Malakhov D.Yu. Morekhodnaya mashina i uchastki priboynoy zony // Avtomobil'naya promyshlennost'. – 2002, №4. S. 20...22.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ. Поступила 16.04.18.