

УДК 627.4

DOI: 10.31774/2658-7890-2019-2-81-99

**А. И. Тищенко, Г. А. Сенчуков, В. Д. Гостищев, В. Ц. Челахов**  
Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,  
Российская Федерация

## **РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДПОРНОЙ СТЕНЫ ИЗ ГАБИОНОВ ПО ЗАЩИТЕ БЕРЕГОВ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ОТ РАЗРУШЕНИЙ**

Целью исследований явилось выполнение расчета устойчивости подпорной стенки из габионов по защите берегов Цимлянского водохранилища от размывов. Цимлянское водохранилище вступило в строй летом 1952 года и имеет определяющее значение для устойчивого экономического развития Юга России и повышения качества жизни населения региона. С первых дней эксплуатации в южной части водохранилища начали происходить эрозионные процессы берегов. В последнее десятилетие одним из наиболее обсуждаемых вопросов является продолжающаяся активность переработки берегов водохранилища. Рядом ученых установлено, что в первые годы эксплуатации Цимлянского водохранилища на Дону отмечены размывы и отступление берега со средней интенсивностью 9 м в год (при максимальной величине 50 м в год). Разрушение (абразия) берегов водохранилища происходит и в настоящее время, которое сопровождается образованием береговой отмели из продуктов размыва. Высота образовавшихся обрывов достигает 8–12 м. Для осуществления поставленной цели использованы материалы геологоразведочных данных грунта основания. Методы расчета базируются на применении теоретических зависимостей строительной механики и математических рассуждений. Последовательный расчет устойчивости подпорной стены выполнен по разработанной методике. Результаты расчетов по прочности на продавливание, опрокидывание, определение краевых давлений под подошвой нижнего ряда габионов, сдвиг, сопротивление сетки на разрыв, устойчивость каменной наброски при волновом воздействии потока и др. нагрузке показали в некоторых пунктах удовлетворительную, а в некоторых пунктах неудовлетворительную работу элементов подпорной стены в вопросах прочности и устойчивости. В выводах даны некоторые рекомендации по обеспечению устойчивости предлагаемого крепления.

Ключевые слова: устойчивость, стена, габион, берег, обрушение, водохранилище, надежность, разрыв, опрокидывание, сдвиг.

**A. I. Tishchenko, G. A. Senchukov, V. D. Gostishchev, V. Ts. Chelakhov**  
Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,  
Russian Federation

## **CALCULATION OF THE BULKHEAD WALL STABILITY FROM GABION TO PROTECT THE TERRITORIES OF TSIMLYANSK RESERVOIR FROM DESTRUCTIONS**

The aim of the research was to calculate the bulkhead wall stability from gabions to protect the Tsimlyansk reservoir banks from scour. The Tsimlyansk reservoir was put into operation in summer 1952 and is of paramount importance for the sustainable economic development of southern Russia and the improving the quality of people life of the region.

From the first days of operation the reservoir shoreline erosion processes began to occur in the southern part of the reservoir. In the last decade one of the most discussed issues is the ongoing activity of reservoir banks transformation. A number of scientists have found that in the first years of the Tsimlyansk reservoir operation the coastal erosion and recession were noted on the Don with an average intensity of 9 m in year (maximum 50 m in year). The destruction (abrasion) of the reservoir banks occurs nowadays and is accompanied by the shoal formation from erosion material. The height of the formed cliffs reaches 8–12 m. To realize the goal to be achieved, the geological survey data of the foundation soil were used. The calculation methods are based on the application of theoretical dependencies of structural mechanics and mathematical reasoning. A successive calculation of the bulkhead wall stability is made according to the developed method. The results of calculations on the bursting strength, overturning, determination of boundary pressures under the bottom of the lower layer of gabions, shear, grid tensile strength, the stability of the rockfill blanket at wave action of the flow, etc. showed in some points satisfactory, and in some points unsatisfactory work of the bulkhead wall elements in terms of strength and stability. Some recommendations for ensuring the stability of the proposed fastening are given.

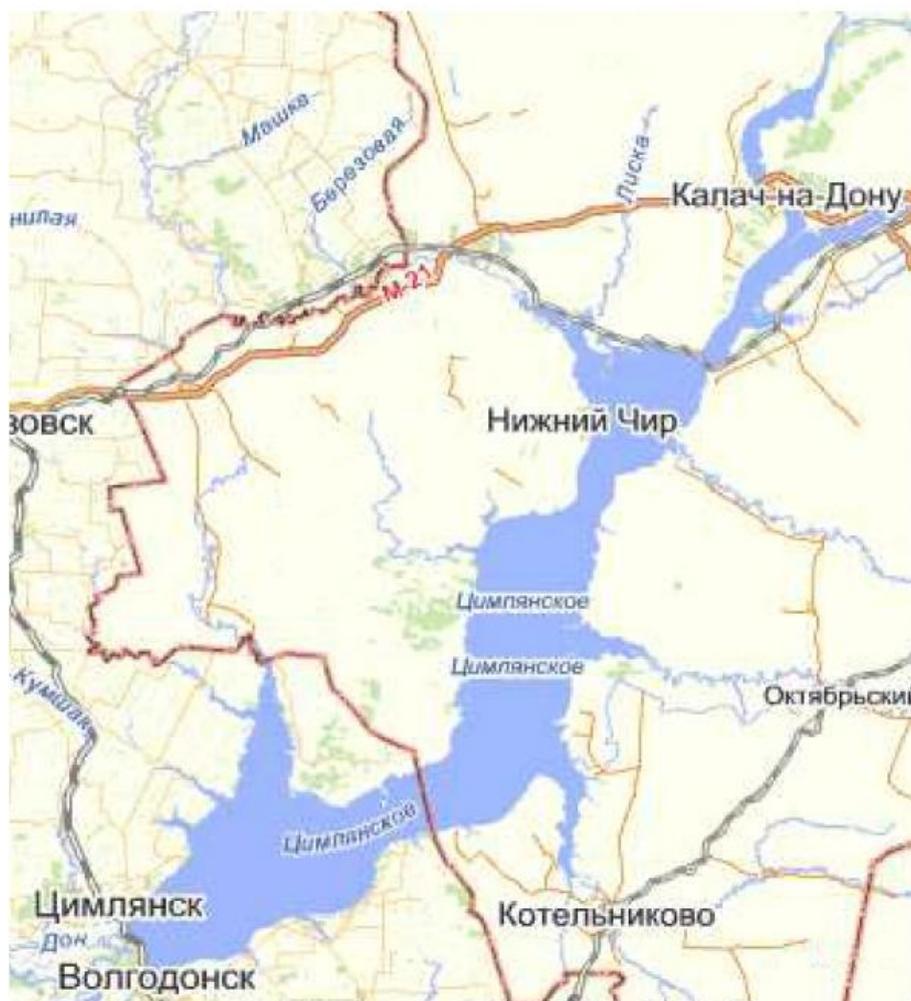
Key words: stability, bulkhead wall, gabion, coast, collapse, reservoir, reliability, abrasion, overturning, shear.

**Введение.** Цимлянское водохранилище вступило в строй летом 1952 года и имеет определяющее значение для устойчивого экономического развития Юга России и повышения качества жизни населения региона.

С первых дней эксплуатации в южной части водохранилища начали происходить эрозионные процессы берегов. За первый год его функционирования (пять месяцев 1952 года), в зависимости от литологического состава пород, слагающих берег, продвижение бровки коренного берега составило 4–6 м при абразионном процессе, 8–10 м при абразионно-оползневом процессе и 40–50 м от первоначального положения при абразионно-обвальном процессе [1].

По данным П. П. Кокоулина продвижение бровки коренного берега на профилях в южной части водохранилища в 1952 году равнялось 28,67 м на правом берегу и 21,33 м на левом [2]. Большие скорости процесса разрушения берегов в первый год существования водохранилища, по мнению авторов, были обусловлены тем, что смывался делювиальный покров [3].

В последнее десятилетие одним из наиболее обсуждаемых вопросов является продолжающаяся активность переработки берегов водохранилища [3, 4]. Цимлянское водохранилище имеет неправильную сильно вытянутую форму (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Плановое расположение Цимлянского водохранилища на местности**

По результатам исследований было установлено, что в начальные годы эксплуатации Цимлянского водохранилища на Дону отмечены размывы и отступление берега со средней интенсивностью 9 м в год (при максимальной величине 50 м в год) [1–9]. Разрушение (абразия) берегов водохранилища происходит и в настоящее время, которое сопровождается образованием береговой отмели из продуктов размыва. Высота образовавшихся обрывов достигает 8–12 м (рисунок 2) [3].

Надежность и долговечность работы Цимлянского водохранилища можно обеспечить путем укрепления берегов современными средствами защиты земляных русел [10–14]. Широкое применение на современном этапе получил габионный тип крепления.



**Рисунок 2 – Разрушение берегов Цимлянского водохранилища**

**Материалы и методы.** Материалами явились геологоразведочные данные, согласно которым грунт в слое инженерно-геологического элемента (ИГЭ-1 – аQiv) – песок желтый, средней крупности, рыхлый, малой степени водонасыщения, неоднородный, расчетная плотность грунта  $\rho_{gr} = 17,1 \text{ кН/м}^3$ . Методы расчета базируются на применении теоретических зависимостей строительной механики и математических рассуждений.

На основании имеющихся материалов и нормативных документов выполнен расчет крепления берегов габионами. Коэффициент трения габионов о грунт основания  $f = 0,5$  (с учетом цилиндрических габионов).

Объемный вес наполнителя габионов  $\gamma_{gr} = 17,5 \text{ кН/м}^3 = 1,75 \text{ т/м}^3$ .

Объемный вес обратной засыпки (песок)  $\gamma_{gr} = 19,61 \text{ кН/м}^3$  (с учетом временной нагрузки), по рекомендациям п. 8.16–8.18 и приложения Д СП 58.13330.2012 [15], определяется по формуле:

$$\gamma_{gr} = \rho^n \gamma_{lc} \gamma_f = 17,2 \cdot 0,95 \cdot 1,2 = 19,61 \text{ кН/м}^3,$$

где  $\rho^n$  – нормативное значение плотности грунта по ИГЭ-1;

$\gamma_{lc}$  – коэффициент сочетаний нагрузок;



2 Находим расчетное напряжение  $\sigma$ , кН/м<sup>2</sup> от давления на грунт полосы 1 пог. м основания:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\sum G_i}{b \cdot l} = \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_6}{b \cdot l} = \\ &= \frac{19,25 + 38,5 + 57,75 + 77 + 96,25 + 75,08}{1 \cdot 6} = 60,64 \text{ кН/м}^2,\end{aligned}$$

где  $l$  – длина нижнего габиона (цилиндрического матраца), м.

Полученное напряжение:

$$\sigma = 60,64 \text{ кН/м}^2 = 0,061 \text{ МПа} < \sigma_{gr} = 7,8 \text{ МПа}.$$

Условие прочности на продавливание грунта основания выполняется с большим запасом.

3 Составляем сумму моментов удерживающих  $M_{уд}$ , кН·м и опрокидывающих  $M_{опр}$ , кН·м (рисунок 3) относительно точки А (в предположении, что вода отсутствует в водохранилище).

$$\begin{aligned}M_{уд} &= G_1 x_1 + G_2 x_2 + G_3 x_3 + G_4 x_4 + G_5 x_5 + G_6 x_6 = 19,25 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 0,85 + \\ &+ 38,50 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,85 + 57,75 \cdot 1,5 \cdot 3 \cdot 0,85 + 77,00 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,85 + \\ &+ 96,25 \cdot 2,5 \cdot 1 \cdot 0,85 + 75,06 \cdot 3,0 = 1084,27 \text{ кН·м},\end{aligned}$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_6$  – плечи (перпендикуляры, опущенные из точки А на линии действия сил  $G_1, G_2, \dots, G_6$ ).

$$\begin{aligned}M_{опр} &= P_{gr} z = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{gr} H \cdot \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \frac{H}{3} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 19,61 \cdot 5,80 \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{32^\circ}{2} \right) \cdot \frac{5,8}{3} = 60,94 \text{ кН·м},\end{aligned}$$

где  $P_{gr}$  – равнодействующая давления грунта на подпорную стенку, кН;

$z$  – плечо горизонтальной силы  $P_{gr}$  относительно точки А, м;

$H$  – толщина грунтового слоя, м;

$\varphi$  – угол естественного откоса грунта ложа водохранилища.

Получим:

$$M_{уд} = 1084,27 \text{ кН·м} > M_{опр} = 60,94 \text{ кН·м}.$$

Подпорная стенка устойчива опрокидыванию.

4 Определяем крайевые давления на грунт под подошвой нижнего ряда габионов (фундаментной плиты из цилиндрических матрацев):

$$\sigma_A = \frac{\sum G_i}{A_f} + \frac{\sum M_A}{W_f},$$
$$\sigma_B = \frac{\sum G_i}{A_f} - \frac{\sum M_A}{W_f},$$

где  $\sigma_A$  – максимальное крайевое давление на грунт в точке А фундаментной плиты, кН/см<sup>2</sup>;

$\sigma_B$  – минимальное крайевое давление на грунт в точке В фундаментной плиты, кН/см<sup>2</sup>;

$A_f$  – площадь подошвы фундаментной плиты из цилиндрического матраца, см<sup>2</sup>;

$W_f$  – момент сопротивления (статический момент) подошвы фундаментной плиты из цилиндрического матраца, см<sup>3</sup>.

$$A_f = l \cdot b = 6 \cdot 1 = 6,0 \text{ м}^2,$$

$$W_f = \frac{b \cdot l^2}{6} = \frac{1 \cdot 6,0^2}{6} = 6,0 \text{ м}^3,$$

$$\sum G_i = 363,83 \text{ кН},$$

$$\sum M_A = M_{уд} = 1084,27 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Подставляя найденные величины, получим:

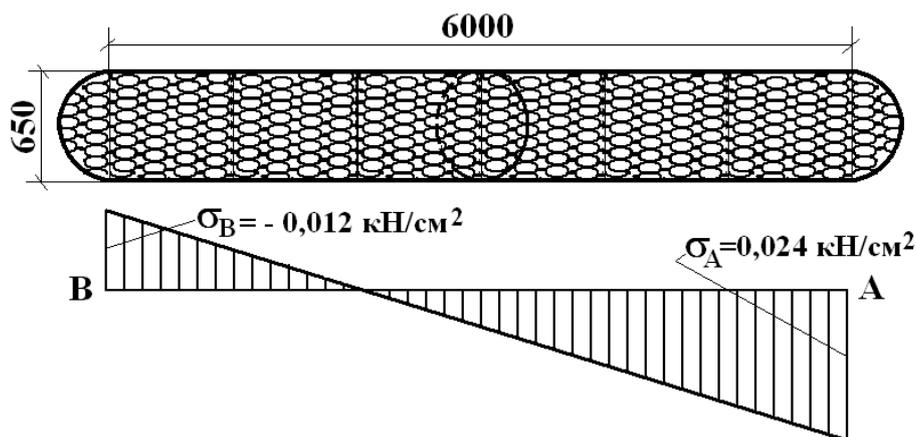
$$\sigma = \frac{363,83}{60000} \pm \frac{108427}{6 \cdot 10^6} = 0,00606 \pm 0,01807 \text{ кН/см}^2,$$

$$\sigma_A = \sigma_{\max} = 0,024 \text{ кН/см}^2 < \sigma_{gr} = 0,78 \text{ кН/см}^2.$$

Условие выполняется.

$$\sigma_B = \sigma_{\min} = 0,00606 - 0,01807 = -0,01201 \text{ кН/см}^2.$$

На основании полученных сведений строим эпюру противодавления грунта на подошву подпорной стенки (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Эпюра противодействия грунта на подошву основания подпорной стенки**

5 Наиболее опасным для подпорной стенки является давление от грунта засыпки при отсутствии воды с противоположной стороны.

Высота стенки  $H_{st} = H = 5,8 \text{ м}$ , угол наклона задней грани  $\theta = 0^\circ$ , угол внутреннего трения грунта (естественного откоса)  $\varphi = 21,0^\circ$ , поверхность грунта горизонтальна. Активное сопротивление грунта  $P_{gr}$ , кН определяем по теории Соколовского:

$$P_{gr} = 0,5q_{gr} \cdot H, \quad (1)$$

где  $q_{gr} = \frac{q_0}{\cos\alpha} = q_0$  – максимальное значение эпюры давления грунта на подпорную стенку (см. рисунок 3), определяется по формуле:

$$q_0 = \gamma_{gr} \cdot H \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – пористость грунта,  $\varepsilon = 0,702$  (ИГЭ-1 – аQiv из таблицы показателей физико-механических свойств грунтов).

Подставляя в уравнение (2), получим:

$$q_0 = 17,1 \cdot 5,8 \cdot 0,702 = 69,62 \text{ кН/м},$$

а из выражения (1) найдем:

$$P_{gr} = 0,5 \cdot 69,62 \cdot 5,8 = 201,91 \text{ кН}.$$

Условием, удовлетворяющим устойчивости против сдвига, является:

$$\sum G \cdot f \geq P_{gr},$$

$$363,83 \cdot 0,62 = 225,58 > P_{gr} = 201,91 \text{ кН},$$

где  $f$  – коэффициент трения подпорной стенки о подошву, представленный на рисунке 4.

Сопротивление подпорной стенки сдвигу достаточно от ее собственного веса без учета анкерной способности сетки армогрунта, которая удерживает стенку от сдвига.

6 Определяем разрывающее усилие  $P$ , действующее на сеточный каркас габиона, кН/м:

$$P = K \cdot \gamma_1 \cdot H_{cl}, \quad (3)$$

где  $K = 1,5$  – коэффициент надежности (запаса);

$\gamma_1$  – объемный вес металлической сетки,  $\gamma_1 = 17,5 \text{ кН/м}^3$ ;

$H_{cl}$  – высота габионной кладки,  $H_{cl} = 5,8 \text{ м}$ .

Подставляя в формулу (3), получим:

$$P = 1,5 \cdot 17,5 \cdot 5,8 \cdot 1 = 152,25 \text{ кН/м}.$$

Габионная сетка двойного кручения с диаметром проволоки 2,7 мм и ячейкой  $80 \times 100 \text{ мм}$  имеет сопротивление разрыва  $P_r = 43 \text{ кН/м}$  [16].

Таким образом:  $P_r = 43 \text{ кН/м} < P = 152,25 \text{ кН/м}$ .

Прочность сетки недостаточна. Необходимо увеличить диаметр проволоки до 5 мм.

Если учесть, что большая часть габионов находится под водой, то объемный вес наполнителя (камня) уменьшается на величину объема воды, т. е.  $\gamma_1 = 17,5 - 10 = 7,5 \text{ кН/м}^3$ . В этом случае, получим:

$$P_r = 1,5 \cdot 7,5 \cdot 5,8 \cdot 1 = 65,25 \text{ кН/м} > 43 \text{ кН/м}.$$

Во взвешенном состоянии габиона прочность проволоки диаметром 2,7 мм также недостаточна для жесткости короба габиона.

7 Расчет ледовых нагрузок на берегоукрепление. Прочностные характеристики ледяного покрова следует вычислять по формулам:

$$R_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i + \Delta_i)^2}, \quad (4)$$

$$R_f = 0,4(C_b + \Delta_b), \quad (5)$$

где  $R_c$  и  $R_f$  – пределы прочности льда при сжатии и изгибе соответственно, МПа;

$N$  – количество слоев одинаковой толщины, на которое разбивается (по толщине) рассматриваемое ледяное поле, при этом  $N \leq 3$  шт.;

$C_i$  – значение прочности льда на одноосное сжатие, МПа, в  $i$ -м слое при температуре  $t_i$ , град;

$\Delta_i$  – доверительная граница случайной погрешности определений  $C_i$ , определяемая методами математической статистики, МПа;

$C_b$  и  $\Delta_b$  – значение прочности льда на одноосное сжатие в нижнем слое рассматриваемого ледяного поля при температуре  $t_b$ , определяемые так же, как  $C_i$  и  $\Delta_i$ , МПа;

$t_b$  – температура льда на границе лед-вода (температура замерзания), равная для пресной воды 0 °С.

По таблице 15 принимаем  $C_i + \Delta_i = 4,8 \pm 0,3$  МПа при температуре льда в  $i$ -м слое ледяного поля  $t_i = -15^\circ$  С и, подставив в (4) и (5), получим:  $R_c = 2,89$  МПа;  $R_f = 1,96$  МПа [17].

Определяем количество жидкой фазы в  $i$ -м слое ледяного поля,  $\xi_i$ , г/л:

$$\xi_i = s_{w,t} \frac{1,06 - 0,005 t_i}{0,03 - 0,014 i_i} = 0,5 \frac{1,06 - 0,005 \cdot 15}{0,03 - 0,014 \cdot 15} = 16,31 \text{ г/л,}$$

где  $s_{w,t} = 0,5$  г/л – соленость воды водохранилища.

При  $\xi_i = 16,31$  г/л из таблицы 16 принимаем  $C_i + \Delta_i = 4,91$  МПа (интерполированием) [17].

На секцию откосного профиля шириной в 1 пог. м, с наклонной передней гранью (рисунок 5) нагрузку от воздействия движущегося ледяного поля следует определять по формулам:

а) горизонтальную составляющую нагрузки  $F_h$ , МН:

$$F_h = k_\beta k_\Delta R_f b h_d \operatorname{tg}(\alpha + \operatorname{arctg} f) + m_h [1 + A_1(f - 0,1) + A_2(f - 0,1)^2] b; \quad (6)$$

б) вертикальную составляющую нагрузки  $F_v$ , МН:

$$F_v = k_\beta k_\Delta R_f b h_d + m_v [1 + A_3(f - 0,1)] b, \quad (7)$$

где  $k_\beta = 1,185$  – коэффициент, принимаемый по таблице 23 [17];

$k_\Delta = 0,0696$  – коэффициент, принимаемый по таблице 24 [17];

$m_h = 0,5352$  МН/м = 535,2 кН/м – коэффициент, принимаемый по таблице 25 [15];

$b$  – ширина ледяного поля,  $b = 1$  пог. м;

$h_d$  – толщина расчетного слоя лед-вода,  $h_d = 0,5$  м;

$\alpha$  – угол заложения берегового откоса,  $\alpha = 33,7^\circ$ ;

$f$  – коэффициент трения,  $f = 0,3–0,45$ ;

$A_1 = 1,953$ ,  $A_2 = 1,741$ ,  $A_3 = 1,804$  – коэффициент, принимаемый по таблице 26 [17];

$m_v$  – коэффициент, принимаемый по таблице 27;  $m_v = 0,6365$  МН/м = 636,5 кН/м [17].

Коэффициенты  $k_\Delta$ ,  $m_h$  и  $m_v$  принимаются в зависимости от высоты  $\Delta h$ , надводного скопления обломков льда у откоса:

$$\Delta h = [3,7 + 1,6 \sin(\alpha - 30)] \sqrt{h_d} = [3,7 + 1,6 \sin(33,7 - 30)] \sqrt{0,5} = 2,69 \text{ м.}$$

Из формул (6) и (7) находим:  $F_h = 1014,3$  кН,  $F_v = 1038,8$  кН.

При подвижке смерзшегося с сооружением ледяного поля горизонтальная составляющая нагрузки  $F_{h,f}$ , кН, определяется по формуле:

$$F_{h,f} = k_{\beta i} \cdot F_{b,p},$$

где  $k_{\beta i} = 0,449$  – коэффициент, принимаемый по таблице 28 [17];

$F_{b,p}$  – нагрузка от воздействия движущихся ледяных полей на откос сооружения, определяется по формуле:

$$F_{b,p} = mk_b k_v R b h_d = 1 \cdot 2,75 \cdot 0,3 \cdot 0,289 \cdot 100 \cdot 50 = 1192 \text{ кН},$$

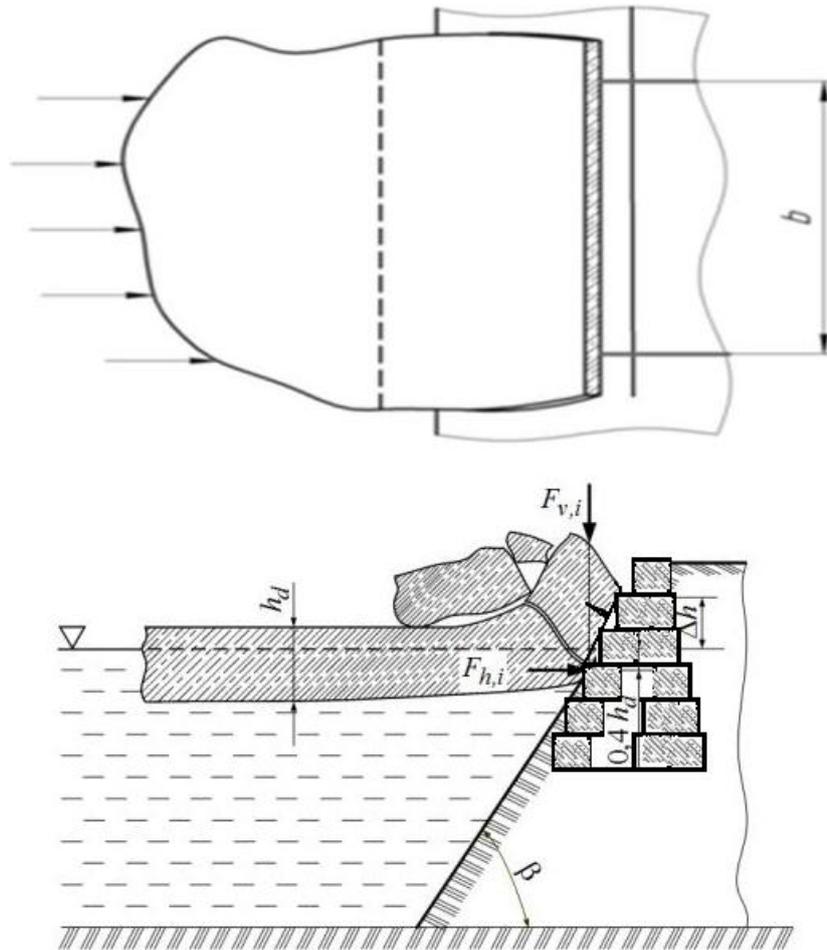
где  $m = 1$  – коэффициент, определяемый по таблице 17 [17];

$k_b = 2,75$  – коэффициент, определяемый по таблице 18 [17];

$k_v = 0,3$  – коэффициент, определяемый по таблице 19 [17];

$R$  – расчетное сопротивление слоя лед-вода,  $R = 0,289 \text{ кН/см}^2$ .

Тогда  $F_{h,f} = 0,449 \cdot 1192 = 535,3 \text{ кН} = 535,3 \text{ кН/1 пог. м}$ .



**Рисунок 5 – Схема приложения нагрузок от движущегося ледяного поля на элемент сооружения откосного профиля**

Выполняем проверку надежности и безопасности крепления из габионов на уровне ледяного поля от действия движущегося льда по рекомендации п. 8.16 СП [15]:

$$\gamma_f \gamma_{lc} F_{hf1} \leq \frac{R \gamma_c \gamma_m}{\gamma_n}, \quad (8)$$

где  $\gamma_f = 1,1$  – коэффициент надежности по ледовой нагрузке п. 8.17 [15];

$\gamma_{lc} = 0,95$  – коэффициент для основного сочетания нагрузок и воздействий в период строительства и ремонта п. 8.16 [15];

$F_{hf1}$  – расчетное значение силового воздействия движущегося льда;

$R = 43$  кН/м – предел прочности сетки с ячейками  $80 \times 100$  мм из оцинкованной проволоки диаметром 2,7 мм;

$\gamma_c = 1$  – коэффициент условий работы металлической сетки [18];

$\gamma_m = 1,05$  – коэффициент надежности по материалу, таблица 3 [18];

$\gamma_n = 1,15$  – коэффициент надежности по ответственности сооружения III класса;

Подставив значения составляющих величин в формулу (8), получим:

$$1,1 \cdot 0,95 \cdot 535,26 = 559,35 \text{ кН/м} > 43 \cdot 1 \cdot 1,05 / 1,15 = 39,26 \text{ кН/м}.$$

Условие прочности сетки из оцинкованной проволоки диаметром 2,7 мм не соблюдается при действии на нее ледяного покрова, движущегося со скоростью 0,15 м/с.

Ширина полосы наплесковых форм льда на поверхности откоса сооружения в осенне-зимний период до ледостава принимается равной ширине наката расчетных волн и определяется в соответствии с формулой (25) СП [17]. От уровня воды в период ледостава линия сопряжения льда с дном находится на глубине  $H_f = 2,45$  м ( $H_f$  – разность отметок уровней Ур(2) – Ур(3) (рисунок 6)).

Ширина припая  $l_f$ , м (см. рисунок 6) вычисляется по формуле:

$$l_f = (H_f + h_d) \operatorname{ctg} \alpha = (2,45 + 0,5) \operatorname{ctg} 33,7^\circ = 4,42 \text{ м}.$$

Линейная нагрузка на береговой откос или берегозащитное сооружение от ледяного покрова  $q$ , кН/м, рассчитывается по формуле:

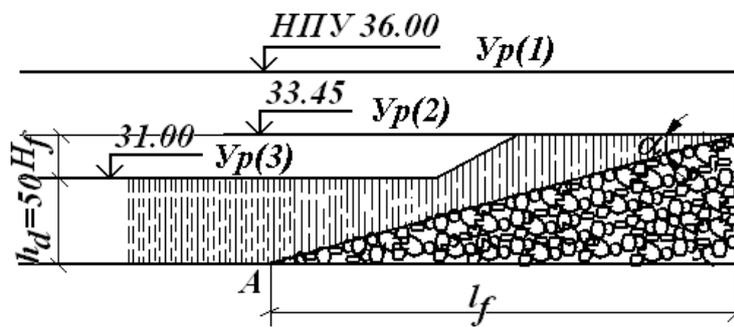
$$q = \gamma_f (P_t + P_a + P_v), \quad (9)$$

где  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузкам, равный 1,05 при III классе капитальности сооружения;

$P_t$  – нагрузка от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении, кН/м;

$P_a$  – нагрузка, вызываемая ветром, т. е. трением воздуха о наружную поверхность ледяного покрова, кН/м;

$P_v$  – нагрузка, вызываемая течением, т. е. трением водяного потока о нижнюю поверхность ледяного поля, кН/м.



Ур(1) – уровень открытой воды; Ур(2) – уровень воды периода ледостава;  
Ур(3) – уровень воды в период вскрытия льда

**Рисунок 6 – Расчетные уровни воды в водоеме**

Нагрузки, приведенные в формуле (9) определены по зависимостям и графикам методических рекомендаций [19] и имеют следующие значения:

$$P_t = 43,15 \text{ кН/м,}$$

$$P_a = 0,00361 \text{ кН/м,}$$

$$P_v = 0,0069 \text{ кН/м,}$$

тогда  $q = 45,32 \text{ кН/м.}$

Выполняем проверку прочности сетки габиона от действия ледовых нагрузок ледяного поля:

$$\gamma_f \gamma_{lc} q \leq \frac{R \gamma_c \gamma_m}{\gamma_n}, \text{ или } 1,05 \cdot 1 \cdot 45,32 > \frac{43 \cdot 1 \cdot 1,05}{1,15} = 39,26 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Условие прочности сетки из проволоки  $d = 2,7 \text{ мм}$  не выполняется.

Длина однослойного надвига льда на откос  $l_c$ , м, высота однослойного

надвига льда на берег ( $H_c$ , м) и высота навала льда ( $H_p$ , м) были определены по рекомендациям СП [20]:  $l_c = 1,02$  м,  $H_c = 0,066$  м,  $H_p = 0,4$  м.

### **Выводы.**

1 Надежность и долговечность работы Цимлянского водохранилища можно обеспечить путем укрепления берегов современными средствами защиты земляных русел – габионами.

2 Найденное расчетное напряжение показало, что условие прочности на продавливание грунта основания выполняется с большим запасом.

3 Расчет устойчивости подпорной стенки на опрокидывание показал, что удерживающий момент больше опрокидывающего в 5 и более раз.

4 Сопротивление подпорной стенки сдвигу достаточно от ее собственного веса без учета анкерной способности сетки армогрунта, которая удерживает стенку от сдвига.

5 При расчете ледовых нагрузок на берегоукрепление установлено, что прочность сетки из оцинкованной проволоки диаметром 2,7 мм недостаточна при действии на нее ледяного покрова, движущегося со скоростью 0,15 м/с.

### **Список использованных источников**

1 Кашин, Ю. С. Берега Цимлянского водохранилища / Ю. С. Кашин // Природа. – М., 1953. – № 12. – С. 95–99.

2 Кокоулин, П. П. Некоторые материалы наблюдений за формированием берегов Цимлянского водохранилища / П. П. Кокоулин, Л. В. Кокоулина // Сборник работ Цимлянской гидрометеорологической обсерватории. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С. 13–34.

3 Шумова, Н. А. Анализ динамики разрушения берегов Цимлянского водохранилища / Н. А. Шумова // Аридные экосистемы. – М., 2017. – Т. 23, № 3(72). – С. 95–103.

4 Назаров, Н. Н. Устойчивое функционирование водохранилищ / Н. Н. Назаров // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 29 мая – 1 июня 2017 г.). Т. 1: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами. – Пермь: Пермский гос. ун-т, 2011. – С. 113–117.

5 Вендров, С. Л. Изменение рельефа берегов и дна Цимлянского водохранилища в 1952–1956 гг. / С. Л. Вендров // Известия академии наук СССР. Серия географическая. – 1957. – № 3. – С. 75–80.

6 Кашин, Ю. С. Предполагаемые типы берегов Цимлянского водохранилища / Ю. С. Кашин // Известия академии наук СССР. Серия географическая. – 1952. – № 4. – С. 5–11.

7 Новикова, Н. М. Режим вод водохранилища и грунтовых вод на побережье /

Н. М. Новикова, О. Г. Назаренко // Природные комплексы побережья Цимлянского водохранилища. – М.: Агронаучсервис, 2014. – С. 47–58.

8 Шаврак, Е. И. Оценка показателей состояния Цимлянского водохранилища / Е. И. Шаврак, И. А. Генераленко, В. М. Сапельников // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – Спецвып. 3. – С. 60–71.

9 Шумова, Н. А. Прогнозные и наблюдаемые смещения береговой линии Цимлянского водохранилища / Н. А. Шумова // Аридные экосистемы. – 2013. – Т. 19, № 3(56). – С. 43–50.

10 Васильев, С. М. Повышение экологической безопасности способов орошения для формирования устойчивых агроландшафтов в аридной зоне: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 06.01.02 / Васильев Сергей Михайлович. – Волгоград, 2006. – 35 с.

11 Васильев, С. М. Регулирование управленческих процессов в структурированных проблемных ситуациях АПК / С. М. Васильев, Ю. Е. Домашенко // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – № 4. – С. 12–13.

12 Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ, 2004. – 388 с.

13 Косиченко, Ю. М. Высоконадежные конструкции противofiltrационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 8. – С. 18–25.

14 Тищенко, А. И. Обеспечение надежной работы сбросных гидротехнических сооружений / А. И. Тищенко // Техносферная безопасность, надежность, качество, энергоснабжение: материалы 14 Междунар. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону – Новомихайловский, 2012 г.). Вып. XIV: в 3 т. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2012. – Т. 3. – С. 156–161.

15 Гидротехнические сооружения. Основные положения: СП 58.13330.2012: утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М., 2012. – 38 с.

16 Технические указания по применению габионов для усиления земляного полотна; Моск. гос. ун-т путей сообщения. – М.: МПС РФ, 1998. – ЦПИ № 22/43. – 140 с.

17 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*: СП 38.13330.2012: утв. Приказом М-ва регион. развития РФ 29.12.11 № 635/12: введ. в действие с 01.01.13. – М.: Минрегион России, 2012. – 116 с.

18 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*: СП 16.13330.2011: утв. Приказом М-ва регион. развития РФ 27.12.10 № 791: введ. в действие с 20.05.11. – М.: ЦПП, 2011. – 172 с.

19 Методические рекомендации по расчету надвига льда на земляное полотно железных дорог / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т транспортного стр-ва. – М.: МТС, 1984. – 23 с.

20 Проектирование морских берегозащитных сооружений: СП 32-103-97: введ. в действие с 01.01.98. – М.: ТРАНССТРОЙ, 1998. – 90 с.

## References

1 Kashin Yu.S., 1953. *Berega Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [The Tsimlyansk Reservoir Banks]. *Priroda* [Nature]. Moscow, no. 12, pp. 95-99. (In Russian).

2 Kokoulin P.P., Kokoulina L.V., 1958. *Nekotorye materialy nablyudeniy za formirovaniem beregov Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Observations of the Tsimlyansk reservoir banks formation]. *Sbornik rabot Tsimlyanskoi gidrometeorologicheskoi observatorii* [Collect. of Reserch Works of the Tsimlyansk Hydrometeorological Observatory]. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., pp. 13-34. (In Russian).

3 Shumova N.A., 2017. *Analiz dinamiki razrusheniya beregov Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Analysis of the dynamics of the Tsimlyansk reservoir banks degradation]. *Aridnye ekosistemy* [Arid Ecosystems]. Moscow, vol. 23, no. 3(72), pp. 95-103. (In Russian).

4 Nazarov N.N., 2017. *Ustoychivoe funktsionirovanie vodokhranilishch* [Sustainable operation of reservoirs]. *Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov: trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. 1: Gidro- i geodinamicheskie protsessy. Upravlenie vodnymi resursami* [Current Issues of Reservoirs and their Catchment Areas: Proceed. of the VI International scientific-practical conference. V. 1: Hydro and Geodynamic Processes. Water Management]. Perm, Perm State University Press Publ., pp. 113-117. (In Russian).

5 Vendrov S.L., 1957. *Izmenenie rel'efa beregov i dna Tsimlyanskogo vodokhranilishcha v 1952–1956* [Transformations of the relief of the shoreline and bottom of the Tsimlyansk reservoir in 1952–1956]. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya* [Bull. of the Academy of Sciences of the USSR. Geographical series], no. 3, pp. 75-80. (In Russian).

6 Kashin Yu.S., 1952. *Predpolagaemye tipy beregov Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Assumed types of the Tsimlyansk reservoir banks]. *Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya* [Bull. of the Academy of Sciences of the USSR. Geographical series], no. 4, pp. 5-11. (In Russian).

7 Novikova N.M., Nazarenko O.G., 2014. *Rezhim vod vodokhranilishcha i gruntovykh vod na poberezh'e* [Water regime of reservoir and groundwaters in the coastal zone]. *Prirodnye komplekсы poberezh'ya Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Natural Complexes of the Coast of the Tsimlyansk Reservoir]. Moscow, Agronauchservice Publ, pp. 47-58. (In Russian).

8 Shavrak E.I., Generalenko I.A., Sapel'nikov V.M., 2012. *Otsenka pokazateley sostoyaniya Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Evaluation of status of the Tsimlyansk reservoir]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety], sp. issue 3, pp. 60-71. (In Russian).

9 Shumova N.A., 2013. *Prognoznye i nablyudaemye smeshcheniya beregovoy linii Tsimlyanskogo vodokhranilishcha* [Forecast and observed shifts of the coastline of the Tsimlyansk reservoir]. *Aridnye ekosistemy* [Arid Ecosystems], vol. 19, no. 3(56), pp. 43-50. (In Russian).

10 Vasil'ev S.M., 2006. *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti sposobov orosheniya dlya formirovaniya ustoychivyykh agrolandshaftov v aridnoy zone. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk* [Improving the environmental safety of irrigation methods for the formation of sustainable agrolandscapes in the arid zone. Abstract of doctor tech. sci. diss.]. Volgograd, 35 p.

11 Vasil'ev S.M., Domashenko Yu.E., 2016. *Regulirovanie upravlencheskikh protsessov v strukturirovannykh problemnykh situatsiyakh APK* [Regulating management processes in structurized problem situations of agrarian and industrial complex]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bull. of Russian Agricultural Science], no. 4, pp. 12-13. (In Russian).

12 Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., Kolganov A.V., 2004. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' orositel'nykh sistem* [Operational Reliability of Irrigation Systems]. Rostov n/Don, SKNTS VS, 388 p. (In Russian).

13 Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Vysokonadezhnye konstruksii protivofil'tratsionnykh pokrytiy kanalov i vodoemov, kriterii ikh effektivnosti i nadezhnosti* [Highly reliable constructions of anti-filtration coatings of canals and reservoirs, criteria for their efficiency and reliability]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering], no. 8, pp. 18-25. (In Russian).

14 Tischenko A.I., 2012. *Obespechenie nadozhnoy raboty sbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Ensuring reliable operation of waste hydraulic structures]. *Tekhnosfer-naya bezopasnost', nadozhnost', kachestvo, energosnabzhenie: materialy 14 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technosphere Safety, Reliability, Quality, Power Supply: Proceed. 14 International scientific-practical conference], iss. XIV, in 3 vol., vol. 3. Rostov n/Don, RGSU Publ., pp. 156-161. (In Russian).

15 *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya: SP 58.13330.2012*

[Hydrotechnical Constructions. The main provisions: SP 58.13330.2012]. Moscow, 38 p. (In Russian).

16 *Tekhnicheskie ukazaniya po primeneniyu gabionov dlya usileniya zemlyanogo polotna* [Technical Instructions on the Use of Gabions for Reinforcement of Roadbed]. Moscow, Moscow State Transport University, Ministry of Railways of the Russian Federation, 1998, Centre for Applied Research, 140 p. (In Russian).

17 *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.06.04-82\*: SP 38.13330.2012* [Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from vessels). Updated version of SNIp 2.06.04-82\*: SP 38.13330.2012]. Ministry of Regional Development, 2012, 116 p. (In Russian).

18 *Stal'nye konstruksii. Aktualizirovannaya redakciya SNIp II-23-81\*: SP 16.13330.2011* [Steel Structures. Updated version of SNIp II-23-81\*. SP 16.13330.2011]. Ministry of Regional Development of RF, Moscow, 2011, 172 p. (In Russian).

19 *Metodicheskie rekomendatsii po raschetu nadviga l'da na zemlyanoe polотно zheleznykh dorog* [Guidelines for Calculating the Thrust of Ice on the Railway Earthworks]. *Vsesoyuznyj nauchno-issledovatel'skiy institut transportnogo stroitel'stvava* [All-Union Research Institute of Transport Construction]. Moscow, MTS, 1984, 23 p. (In Russian).

20 *Proektirovanie morskikh beregozashchitnykh sooruzheniy: SP 32-103-97* [Design of Sea Shore Protection Structures: SP 32-103-97]. Moscow, Transstroy, 1998, 90 p. (In Russian).

---

#### **Тищенко Александр Иванович**

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: aleks.tishencko2016@mail.ru

#### **Tischenko Alexandr Ivanovich**

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: aleks.tishencko2016@mail.ru

#### **Сенчуков Герман Александрович**

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: заместитель директора по науке и инновациям

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm\_vodreestr\_gmvo@mail.ru

#### **Senchukov German Alexandrovich**

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Deputy Director for science and innovation

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm\_vodreestr\_gmvo@mail.ru

**Гостищев Вячеслав Дмитриевич**

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

**Gostishchev Vyacheslav Dmitriyevich**

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

**Челахов Василий Царукович**

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

**Chelakhov Vasilij Caruckovicj**

Degree Candidate of Technical Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru