

УДК 627.83:627.81

Ю. М. Косиченко, К. В. Морогов (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

БЫСТРОВОЗВОДИМЫЙ РЕЗЕРВНЫЙ ВОДОСБРОС НИЗКОНАПОРНОГО ГИДРОУЗЛА МАЛОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В статье предлагается новая конструкция быстровозводимого резервного водосброса из полимерных материалов для применения на низконапорных гидроузлах малых водохранилищ. Целью данной работы является получение методики расчета основных параметров резервного водосброса, которые определяются на основании гидравлических расчетов, исходя из обеспечения пропуск максимального расчетного расхода половодья, превышающего максимальную расчетную обеспеченность. Исходными данными для расчета принимаются параметры ΔQ и H . Последовательность расчетов состоит в следующем. Вначале задается предварительная ширина по дну русла прорана ϵ . Затем определяются коэффициенты скорости φ по формуле и сжатия ϵ по формуле. Вычисляется коэффициент, учитывающий пространственность потока K . Подставляя найденные значения коэффициентов φ , ϵ и K и исходные данные ΔQ и H в конечную формулу найдем ширину русла прорана в первом приближении ϵ_1 . Дальнейшие расчеты повторяются до тех пор пока значение ширины последнего приближения будет отличаться от предыдущего не более, чем на 5-10 %. Таким образом, на основании проведенных расчетов ширина прорана по дну будет равна $\epsilon = 3,82$ м, которая обеспечит пропуск расчетного расхода $\Delta Q = 11,5$ м³/с при напоре на входе $H = 1$ м. В случае, когда длина искусственного прорана превышает $L_{\text{п}} > 10 H$, гидравлический расчет его проводят, как для короткого канала с учетом потерь напора.

Ключевые слова: резервный водосброс, быстровозводимый, ширину русла, расчетный расход, проран, грунтовая плотина, геомембрана, обеспечение безопасности.

Yu. M. Kosichenko, K. V. Morogov (FSBSE "RSRILIP")

RAPID BUILT AUXILIARY SPILLWAY FOR A LOW-HEAD HYDRO SYSTEM OF A SMALL RESERVOIR

The new construction of a rapid built auxiliary spillway made from polymer materials for a low-head hydro system of a small reservoir is proposed. The objective of the study is to develop the methodology for calculation of the main parameters of the auxiliary spillway which are defined on the basis of hydraulic calculations assuming the pass of a peak design flood discharge higher than the rated probability. Basic data for calculation were the parameters of ΔQ and H . The calculation sequence is the following. First the preliminary width of the closing gap bottom ϵ , is set. Then the coefficients of speed φ , and compression ϵ , are determined according to the formulas. The coefficient taking into account the spatiality of the flow K is calculated. Substituting the found values of the coefficients φ , ϵ , K and basic data ΔQ and H into the end formula the width of the closing gap can be estimated in the first approximation ϵ_1 . Subsequent calculation is repeated before the values of the width in the end approximation will be varying from the previous one less than 5-10 %. Thereby, based on the conducted calculations the width at the bottom of the closing gap is $\epsilon = 3.82$ m, which can provide the rated discharge $\Delta Q = 11.5$ m³/sec at the inlet pressure head $H = 1$ m. If the

length of the artificial closing gap is exceeded $L_{\text{п}} > 10H$, the hydraulic calculation is made as for a short-channel assuming the head loss.

Keywords: auxiliary spillway, rapid built, channel width, rated discharge, closing gap, earth dam, geomembrane, safeguarding.

Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) во многом зависит от оперативного и качественного решения вопроса пропуска через гидроузел весеннего половодья [1]. Основные направления в обеспечении безопасности – это оценка современного уровня безопасности гидротехнических сооружений, диагностика их технического состояния, оценка возможных ущербов в случае аварии, разработка декларации безопасности для потенциально опасных объектов [2].

Для повышения безопасности и снижения общей стоимости строительства водосбросных сооружений применяют резервные водосбросы в компоновках речных гидроузлов. Обычно предусматривают несколько водосбросов: один основной бетонный, рассчитанный на пропуск паводков частой повторяемости, и один или два резервных, рассчитанных на пропуск паводков редкой повторяемости [3].

Резервные водосбросы нашли широкое применение в ряде стран Северной Америки, Европы, России, Японии, в странах с жарким климатом (в ЮАР, Австралии, Средней Азии и др.).

Анализ существующих конструкций резервных водосбросов [4-9] показывает, что в основном они имеют в своем составе различные бетонные элементы в виде водосливных стенок, защитное крепление быстроточной части водосброса из сборных железобетонных плит, а также облицовку низовой грани грунтовой плотины из армированного грунта или синтетических мешков, заполненных булыжниками.

К недостаткам этих типов водосбросов можно отнести необходимость достаточно длительного времени на их возведение, значительную трудоемкость работ, относительно высокую стоимость, недостаточную эффективность работы. Кроме того, большинство резервных водосбросов

малоприемлемы для низконапорных гидроузлов малых водохранилищ.

Резервные водосбросы низконапорных гидроузлов малых водохранилищ с грунтовыми плотинами должны удовлетворять следующим требованиям: легкость и быстрота возведения, надежность защиты гребня и низового откоса грунтовой плотины от размыва при переливе потока.

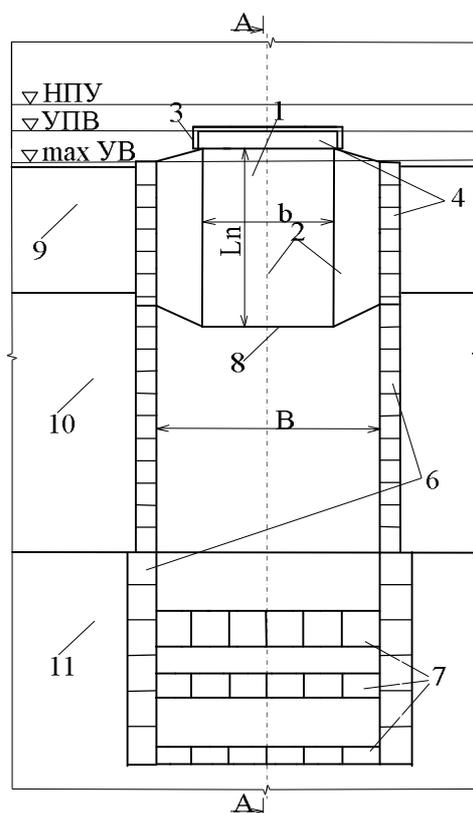
Учитывая вышеприведенные требования, нами разработана новая конструкция быстровозводимого резервного водосброса, предназначенная для малых водохранилищ объемом до 10 млн м³, на которую составлена заявка на изобретение и получена приоритетная справка ФИПС (№ 2012114853/13(022440).

Целью применения быстровозводимого водосброса является пропуск чрезвычайного паводка и предотвращение разрушения плотины вследствие перелива воды через гребень, который рекомендуется в качестве резервного (или основного при его отсутствии) на земляных плотинах IV класса и рассчитан на работу от уровня перелива воды. При этом часть паводка пропускается через основной водосброс (береговой или шахтный).

Резервный водосброс грунтовой плотины (рисунок 1) представляет собой искусственный проран трапецеидального сечения или как вариант прямоугольного сечения, устроенный в гребне плотины, в ложе которого укладывают защитное покрытие из геомембраны, пригружаемое и заведенное под пригрузки в приямках со стороны верхнего бьефа и на бровках. Для крепления геомембраны могут использоваться коробчатые габионы или тюфяки из тканного геотекстиля, наполненные каменным материалом, или как вариант крепление шпильками. Водопрводящая и водобойная части резервного водосброса грунтовой плотины выполнены виде водопроводящего лотка с дном из двойного полотнища геомембраны с несопадающими отверстиями, предназначенными для свободного отвода фильтрационного потока, а также гибких оболочек из материала геомембраны, заполненных песком, образующих стенки водопропускной и водо-

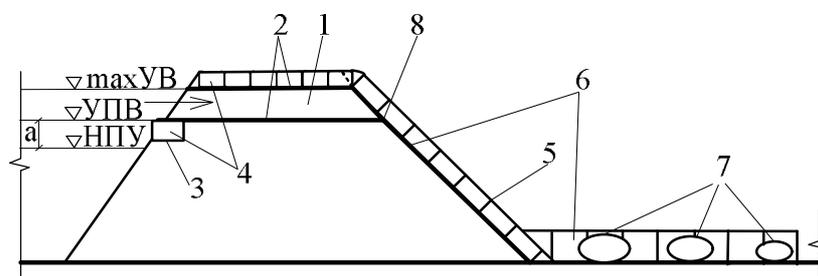
бойной частей и гасители энергии водного потока. Как вариант, гибкие оболочки могут быть заполнены водой. Двойное полотнище геомембраны крепят к защитному покрытию искусственного прорана с выполнением сварного шва, а нижнее полотнище крепится при помощи шпилек.

а)



б)

разрез А-А



а – в плане; б – в разрезе;

- 1 – искусственный проран; 2 – защитное покрытие из геомембраны;
 3 – приямок; 4 - пригрузы; 5 – двойное полотнище геомембраны; 6 – гибкие оболочки;
 7 – гасители энергии водного потока; 8 – сварной шов; 9 – гребень грунтовой плотины,
 10 – низовой откос, 11 – участок нижнего бьефа

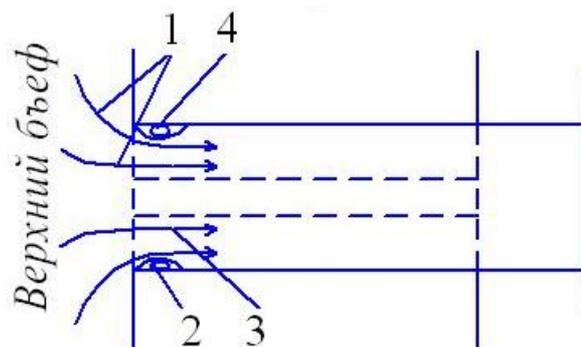
Рисунок 1 – Резервный водосброс для малых водохранилищ

Преимуществами данной конструкции является простота выполнения и быстровозводимость, что обуславливается изготовлением основных элементов в заводских условиях и использование местных материалов для заполнения оболочек.

Резервный водосброс грунтовой плотины работает следующим образом: при подъеме уровня воды в верхнем бьефе водохранилища и достижении уровня перелива воды (УПВ) поток устремляется в ложе искусственного прорана и далее в водопропускной лоток, ограниченный стенками из гибких оболочек, после чего на водобойной части с гасителями происходит гашение его избыточной энергии и успокоение до скоростей, не размывающих отводящее русло. Фильтрационный поток, проходящий через тело грунтовой плотины, отводится в водопропускной лоток через несовпадающие отверстия в двойном полотнище геомембраны.

Поскольку предлагается новая конструкция водосброса, важным вопросом является обоснование основных параметров входной части в виде искусственного прорана трапецеидального сечения, расчет которого отличается от прямоугольного сечения [10]. Рассмотрим методику определения следующих параметров входной части: расход пропускаемого через проран, его ширину для условий работы по типу водослива с широким порогом или короткого канала. Остальные элементы водосброса – водопроводящий лоток и водобойная часть – рассчитываются по общеизвестным рекомендациям [10].

Прежде всего, опишем физику явления истечения через входную часть водосброса в виде искусственного прорана трапецеидального сечения. Так как ширина входной части по дну будет значительно меньше длины плотины по гребню ($b \ll L_{пл}$), то при истечении наблюдается горизонтальное сжатие потока в плане, а затем расширение потока, что обуславливает потери на вход (рисунок 2) [11]. Одновременно с боковым сжатием потока на входе будет происходить также вертикальное сжатие.



1 – направление движения струй; 2 – сжатие потока;
3 – расширение потока; 4 – области водоворота

Рисунок 2 – Картина течения потока на входном участке водосброса (искусственном проране)

Размеры искусственного прорана определяются, исходя из обеспечения пропуска максимального расчетного расхода половодья или паводка, превышающего расчетную обеспеченность. Гидравлический расчет искусственного прорана (рисунок 3) выполняется аналогично, как для водослива с широким порогом при длине порога $L_n > 10 H$, где H – напор на входе.

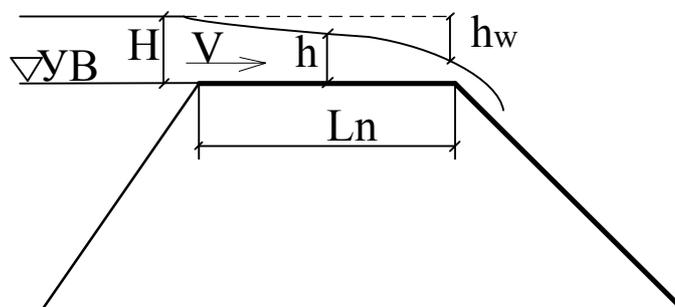


Рисунок 3 – Схема к гидравлическому расчету искусственного прорана водосброса

Для определения расхода водослива используем известную формулу гидравлики:

$$\Delta Q = \omega \cdot v, \tag{1}$$

где ΔQ – расчетный расход прорана, определяемый из условия превышения максимального паводочного расхода над проектным расходом обеспеченностью $P=0,5-1\%$;

$$\Delta Q = Q_{P_{\max}} - Q_p ;$$

v – средняя скорость истечения через проран;

ω – площадь живого сечения трапецеидальной формы.

Скорость истечения через водослив найдем по формуле [11]:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (2)$$

где φ – коэффициент скорости;

g – скорость свободного падения;

H – напор на входе.

Коэффициент скорости, входящий в формулу (2), вычисляется с учетом всех сопротивлений в искусственном проране:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi}}, \quad (3)$$

где $\sum \xi$ – суммарный коэффициент сопротивлений, учитывающий сопротивление на входе и по длине [11]:

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{дл}},$$

где $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент сопротивления устоев, принимаемый по рекомендациям [11];

$\xi_{\text{дл}}$ – коэффициент сопротивления по длине, определяемый по формуле:

$$\xi_{\text{дл}} = \lambda \frac{L_{\text{п}}}{4R},$$

где $L_{\text{п}}$ – длина прорана;

R – гидравлический радиус, мм.

Коэффициент Шези для русла прорана целесообразно определять по формуле А. Д. Альтшуля [9], учитывающей шероховатость защитного покрытия прорана:

$$C = 25 \left[\frac{R}{k_s + \frac{0,025}{\sqrt{R \cdot i}}} \right]^{1/6}, \quad (4)$$

где k_s – эквивалентная шероховатость защитного покрытия в виде геомембраны, принимаемая ориентировочно по справочным данным [9] $k_s = 0,75$ мм.

Коэффициент гидравлического трения λ с учетом микрошероховатости поверхности защитного покрытия рассчитывается по формуле:

$$\lambda = 8g / C^2, \quad (5)$$

где C – коэффициент Шези.

Подставляя вышеприведенные формулы в формулу (1) и, учитывая пространственность течения потока и боковое сжатие, получим следующую зависимость для определения расчетного расхода прорана, работающего как водослив с широким порогом:

$$\Delta Q = \varepsilon \cdot \varphi \cdot K \cdot \sqrt{2gH} (v + m_0 H), \quad (6)$$

где ε – коэффициент бокового сжатия, зависящий от условий входа;

K – коэффициент учитывающий пространственность истечения потока через проран трапецеидального сечения.

Коэффициент сжатия ε определим по Френсису-Кригеру [11]:

$$\varepsilon = 1 - 0,1n\xi \frac{H_0}{v}, \quad (7)$$

где ξ – коэффициент формы береговых устоев водосброса при входе;

n – число боковых сжатий.

Коэффициент, учитывающий пространственность потока, найдем согласно исследований А. Р. Березинского [11] по формуле:

$$K = 1 - \frac{a}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{p}{H}}} \sqrt[4]{\frac{L_{\Pi}}{v} \left(1 - \frac{L_{\Pi}}{v}\right)}, \quad (8)$$

где a – коэффициент Кориолиса;

p – высота порога;

L_{Π} – длина порога.

С использованием зависимости (6) авторам получена следующая расчетная формула для определения необходимой ширины искусственного прорана трапецеидального сечения по дну:

$$b = \frac{\Delta Q}{\varepsilon \cdot \varphi \cdot K \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} - m_0 H, \quad (9)$$

где m_0 – коэффициент заложения откосов прорана;

$H = Z_{\max \text{ УВ}} - Z_{\text{УПВ}}$ – напор в проране, равный разности максимально возможного уровня воды в водоеме и отметки порога прорана, соответствующего уровню перелива.

Методика гидравлического расчета входной части водосброса по определению ширины входа b , работающей по типу водослива с широким порогом, с использованием вышеприведенных зависимостей будет заключаться в использовании метода последовательных приближений ввиду включения ширины по дну трапецеидального русла прорана в промежуточные формулы (7) и (8) в качестве известного параметра. Исходными данными для расчета принимаются параметры ΔQ и H .

Последовательность расчетов состоит в следующем:

- вначале задается предварительная ширина по дну русла прорана b ;
- затем определяются коэффициенты скорости φ по формуле (3) и сжатия ε по формуле (7);
- вычисляется коэффициент K , учитывающий пространственность потока, по формуле (8);
- подставляя найденные значения коэффициентов φ , ε и K и исходные данные ΔQ и H в формулу (9), находится ширина русла прорана в первом приближении b_I ;
- далее, подставляя ширину b_I в формулы (3), (7) и (8), находится ширина русла прорана во втором приближении b_{II} ;
- дальнейшие расчеты повторяются до тех пор, пока значение шири-

ны последнего приближения будет отличаться от предыдущего не более, чем на 5-10 %. Полученное таким образом значение v считается окончательным.

В случае, когда длина искусственного прорана превышает $L_n > 10 H$, гидравлический расчет его проводят как для короткого канала с учетом потерь напора [10].

Потери напора в искусственном проране будут складываться и потерь по длине и местных потерь (рисунок 3):

$$h_w = h_e + h_M,$$

где h_e – потери по длине;

h_M – местные потери.

Указанные потери вычисляются по формулам:

$$h_M = \lambda \frac{L_n}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

$$h_M = \xi_M \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, определяемый по формуле (5);

ξ_M – коэффициент местных сопротивлений, равный сопротивлению на вход ξ_{ex} , назначаемый по рекомендациям [11].

Расчет параметров сечения искусственного прорана в этом случае выполняется для условий неравномерного установившегося движения по формуле:

$$\omega = \frac{\Delta Q}{C \sqrt{RJ}}, \quad (10)$$

где ω – площадь живого сечения прорана;

C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус;

$J = \frac{h_w}{L_{\Pi}}$ – гидравлический уклон в проране, равный отношению потерь

напора к его длине.

Тогда ширина искусственного прорана трапецеидального сечения определяется по формуле:

$$b = \frac{\Omega}{h} - m_0 h, \quad (11)$$

где h – средняя глубина, которая устанавливается в проране (рисунок 3).

Для иллюстрации применения изложенной методики расчета рассмотрим пример расчета при следующих исходных данных: $\Delta Q = 11,5 \text{ м}^3/\text{с}$; $H_0 = 1 \text{ м}$; $L_{\Pi} = 8 \text{ м}$; $i = 0,0004$; $m_0 = 1$; $k_s = 0,75 \text{ мм}$; $p = 1,5 \text{ м}$; $\xi = 1$; $\xi_{\text{вх}} = 1,0$.

При расчете используются выше приведенные формулы:

$$\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{дл}} = \xi_{\text{вх}} + \frac{8g}{C^2} + \frac{L_{\Pi}}{4R} = 1 + \frac{8 \cdot 9,81}{83,2^2} + \frac{8}{4 \cdot 1,098} = 2,71,$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2,71}} = 0,52,$$

$$C = 25 \left[\frac{R}{k_s + \frac{0,025}{\sqrt{R \cdot i}}} \right]^{1/6} = 25 \cdot \left[\frac{1098}{0,75 + \frac{0,037}{\sqrt{1098 \cdot 0,0004}}} \right]^{1/6} = 83,2 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

Примем $\epsilon = 4 \text{ м}$, тогда:

$$\epsilon = 1 - 0,1n\xi \frac{H_0}{\epsilon} = 1 - 0,1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot \frac{1}{4} = 0,95,$$

$$K = 1 - \frac{a}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{p}{H}}} \sqrt[4]{\frac{L_{\Pi}}{\epsilon} \left(1 - \frac{L_{\Pi}}{\epsilon}\right)} = 1 - \frac{0,1}{\sqrt[3]{0,2 + \frac{1,5}{1}}} \sqrt[4]{\frac{8}{4} \left(1 - \frac{8}{4}\right)} = 1,09.$$

Подставив полученные значения коэффициентов в общую формулу (9), получим ширину прорана в первом приближении:

$$b_1 = \frac{\Delta Q}{\epsilon \cdot \varphi \cdot K \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} - m_0 H = \frac{11,5}{0,95 \cdot 0,52 \cdot 1,09 \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 1^{3/2}} - 1 \cdot 1 = 3,82 \text{ м}.$$

Так как найденная ширина $b_1 = 3,82$ м, отличается от предварительно принятой $b = 4$ м незначительно – на 4,5 %, то ее и принимаем за окончательную.

Таким образом, на основании проведенных расчетов ширина прорана по дну будет равна $b = 3,82$ м, которая обеспечит пропуск расчетного расхода $\Delta Q = 11,5$ м³/с при напоре на входе $H = 1$ м.

В заключение отметим, что использование покрытия из геомембраны с трапецеидальным сечением искусственного прорана позволит повысить пропускную способность водосброса и обеспечит неразмываемость грунта плотины.

В сравнении с существующими резервными водосбросами предлагаемая конструкция отличается быстротой возведения, которое осуществляется в течение 2-3 дней. В случае если возникает необходимость более быстрой его установки в течение 6-12 часов, сооружение выполняется как временное на период пропуска паводка. При этом все гибкие оболочки водопроводящей и водобойной частей должны заполняться водой, что значительно ускорит возведение сооружения.

Выводы.

1 Предложена принципиально новая конструкция быстровозводимого резервного водосброса с защитным покрытием из геомембраны, которая может использоваться в гидротехническом строительстве для малых водохранилищ и прудов объемом до 10 млн м³.

2 Для определения ширины искусственного прорана (входа) водосброса получены необходимые формулы и разработана методика гидравлического расчета работы искусственного прорана в виде водослива с широким порогом или короткого канала, которая иллюстрируется примером.

3 Резервный водосброс предназначен для пропуска чрезвычайного паводка и предотвращения разрушения плотины вследствие перелива воды

через гребень, рекомендуется для применения в качестве резервного или основного на земляных плотинах IV класса.

Список использованных источников

1 Щедрин, В. Н. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 5. – С. 33-38.

2 Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин [и др.]; под ред. В. Н. Щедрина. – М.: Росинформагротех, 2011. – 268 с.

3 Мелиорация и водное хозяйство. Сооружения: справочник / П. А. Полад-заде [и др.]; под ред. П. А. Полад-заде. – М.: Агропромиздат, 1987. – 464 с.

4 Водосброс чрезвычайных паводков для плотин и сооружений подобного типа: пат. 2080433 Рос. Федерация: МПК(6) E 02 B 9/04 / ГТМ Энтрепоз (FR); заявитель и патентообладатель ГТМ Энтрепоз (FR). – № 5010569/15; заявл. 27.12.91; опубл. 27.05.97, Бюл. № 31. – 32 с.

5 Резервный водосброс подпорного сооружения: пат. 2071527 Рос. Федерация: МПК(6) E 02 B 9/04 / Проектно-изыскательский институт «Красноярскгидропроект»; заявитель и патентообладатель Ягин В. П., Руднов В. М. – № 92001646/15; заявл. 20.10.92; опубл. 10.01.97, Бюл. № 29. – 3 с.

6 Водосливная грунтовая плотина: пат. 968150 Рос. Федерация: МПК E 02 B 7/06 / Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт им. В. В. Куйбышева; заявитель и патентообладатель Правдивец Ю. П. – № 2790115/29-15; заявл. 05.07.79; опубл. 23.10.82, Бюл. № 39. – 3 с.

7 Каганов, Г. М. Гидротехнические сооружения из армированного грунта / Г. М. Каганов, И. М. Евдокимова, К. И. Шевченко. – М.: НИА-Природа, 2004. – 607 с.

8 Куприянов, В. П. Резервный водосброс Плявинской ГЭС / В. П. Куприянов, В. П. Тверитнев, Р. Р. Шакиров // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 9. – С. 62-67.

9 Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика: под общ. ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

10 Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. – 5-е изд. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.

11 Богомолов, А. И. Гидравлика / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

Косиченко Юрий Михайлович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»), заместитель директора по науке. Контактный телефон: 8 (8635) 26-51-11.
E-mail: rosniipm@yandex.ru

Kosichenko Yuriy Mikhaylovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSE “RSRILIP”), Deputy Director for Science.
Contact telephone number: 8 (8635) 26-51-11.
E-mail: rosniipm@yandex.ru

Морогов Константин Владимирович – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»), младший научный сотрудник.
Контактный телефон: 8-928-183-80-44.
E-mail: mkv_forever@mail.ru

Morogov Konstantin Vladimirovich – Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSE “RSRILIP”), Junior Researcher.
Contact telephone number: 8-928-183-80-44.
E-mail: mkv_forever@mail.ru