

УДК 627.83:627.81

Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайлов

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗЕРВНЫХ ВОДОСБРОСОВ В ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ ДЛЯ ПРОПУСКА ПАВОДКОВЫХ РАСХОДОВ

Целью работы является анализ существующих конструкций водосбросных сооружений и выработка рекомендаций по применению резервных водосбросов в составе речных гидроузлов с грунтовыми плотинами. Для снижения стоимости водосбросных сооружений в ряде случаев в составе гидроузла предусматривают несколько водосбросов: один основной и один или два вспомогательных (резервных). При этом основной водосброс рассчитывают на паводочный расход более частой повторяемости, а резервные – на расход редкой повторяемости. Рассматривается применение резервных водосбросов на примере гидроузлов Эппалак в Австралии и Бокс Бьют в США. Основной водосброс гидроузла Эппалак выполнен в виде открытого берегового быстротока, который рассчитан на расход повторяемостью 1 раз в 100 лет, а один из резервных водосбросов – на расход повторяемостью 1 раз в 1000 лет, другой – на расход повторяемостью 1 раз в 10000 лет. Дается краткое описание резервных водосбросов с размываемыми вставками, которые защищены авторскими свидетельствами и патентами на изобретения. Также дается описание быстровозводимого резервного водосброса в низконапорных гидроузлах, который представляет искусственный проран трапецеидального сечения, защищенный от размыва покрытием из геомембраны. Одним из основных требований, предъявляемых к резервным водосбросам, является простота конструкции и невысокая стоимость. Для повышения эффективности их работы в составе водосброса могут устраиваться размываемые вставки с отметкой гребня на отметке форсированного подпорного уровня или несколько ниже.

Ключевые слова: резервный водосброс, грунтовая плотина, паводочные расходы частой и редкой повторяемости, размываемая грунтовая вставка.

Yu. M. Kosichenko, Ye. D. Mikhaylov

Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

RESERVE SPILLWAY IN EARTH DAMS FOR PASSING FLOOD DISCHARGES

The purpose of the research is to analyze existing designs of spillway constructions and develop recommendations on applying reserve spillways for earth dams at the river hydro systems. To decrease the cost of spillway constructions in some cases several spillways are provided. One of them is the main and one or two others are auxiliary (reserve). The main spillway is calculated for flood discharge of more frequent repeatability and the reserve ones for discharge of the rare repeatability. The use of reserve spillways at the example of Eppalock, Australia, and Box Butte, USA, is considered. The main spillway of Eppalock hydro system is designed as an open coastal chute, which is calculated for discharge of the repeatability 1 time in 100 years, and one of the reserve spillways is designed for discharge of the repeatability 1 time in 1000 years, and another one reserve spillway for the discharge of the repeatability 1 time in 10000 years. The brief description of reserve spillways with scoured inserts is given. Those spillways are protected by copyrights and patents for inventions. The de-

scription of the rapid built reserve spillway at a low-head hydro system is also presented, which is an artificial closure channel of trapezoidal section protected from scouring by geomembrane. One of the main requirements for reserve spillways is the simplicity of design and low cost of the construction. To increase the operation efficiency of the spillway, scouring inserts with the mark of a surcharged reservoir level at the top of a dam or slightly lower are included.

Keywords: reserve spillway, earth dam, flood discharge, frequent and rare repeatability, scouring earth insect.

На крупных гидроузлах с грунтовыми плотинами для пропуска паводочных расходов обычно применяют водосбросы большой пропускной способности, которые рассчитывают в зависимости от класса сооружения на максимальные расходы редкой повторяемости с ежегодной вероятностью превышения 1,0-0,01 % [1]. Так, для грунтовых плотин IV класса повторяемость паводочных расходов составляет один раз в 100 лет, а для плотин I класса – один раз в 10000 лет. Стоимость таких водосбросов весьма высока, при этом за весь период эксплуатации водосброс ни разу не будет работать на полную мощность [2, 3]. Поэтому в ряде случаев в составе гидроузла предусматривают несколько водосбросов: один основной, который будет работать достаточно часто, и один или два вспомогательных (резервных), которые будут работать очень редко [2-5]. Как известно, на грунтовых плотинах, которые относятся к глухим, т. е. не допускающим перелива через гребень, для пропуска паводковых вод предусматриваются открытые или закрытые водосбросные сооружения в виде открытого обводного тракта с сопрягающим сооружением (трубчатые, туннельные, шахтные, сифонные и другие). Однако применение одного водосбросного сооружения в составе гидроузла в ряде случаев оказывается недостаточным, следовательно, целесообразно использовать дополнительные или резервные водосбросы.

Целью работы является анализ существующих конструкций водосбросных сооружений и выработка рекомендаций по применению резервных водосбросов в составе речных гидроузлов с грунтовыми плотинами.

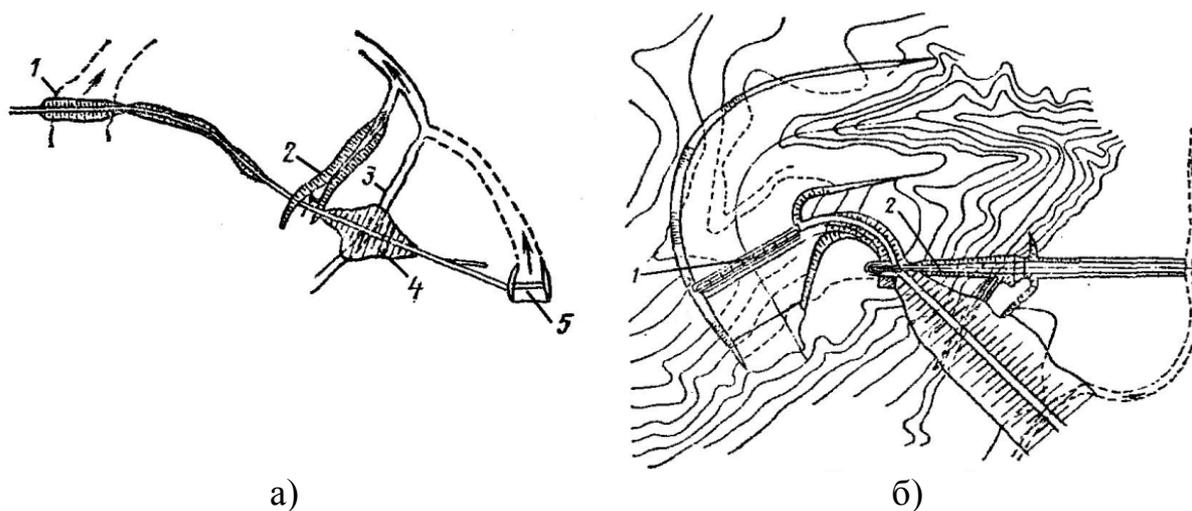
Для снижения стоимости гидроузла основной водосброс проектиру-

ют на меньшие расчетные максимальные расходы, чем требуют действующие нормы в зависимости от класса плотины [1]. Например, для грунтовых плотин II класса вместо поверочного максимального расхода 0,1 % обеспеченности учитывают расход основного расчетного случая 1,0 % обеспеченности, а для сооружений III класса – расход 3,0 % обеспеченности, для сооружений IV класса – расход 5,0 % обеспеченности. В результате снижения величины расчетного максимального паводочного расхода существенно уменьшаются размеры основного водосброса, а следовательно уменьшается его стоимость. В то же время резервные водосбросы гидроузла проектируют на большие расходы, чем основной водосброс, которые должны соответствовать классу плотины (для II класса – 0,1 %, для III класса – 0,5 % и для IV класса – 1,0 % обеспеченности). Резервные водосбросы стремятся делать простыми и дешевыми. При их работе допускаются повреждения самого водосброса и размывы русла и берегов, что, тем не менее, не должно снизить надежность основных сооружений. Часто в дополнение к водосбросу обычной конструкции используют возможности пропуска части максимального расхода по естественному береговому склону с устройством облегченного крепления или без него. В состав резервного водосброса может быть включена размываемая вставка, которая представляет собой отсыпанную на бетонный порог часть грунтовой плотины, размываемую при подъеме уровня верхнего бьефа до некоторой критической отметки (например, отметки ФПУ или несколько ниже) [4].

Рассмотрим применение резервных водосбросов на примере гидроузлов Эппалак в Австралии и Бокс Бьют в США (рисунок 1) [3].

Основной водосброс гидроузла Эппалак выполнен в виде открытого берегового быстротока с водобойным колодцем, который рассчитан на расход повторяемостью 1 раз в 100 лет (рисунок 1, а). На этом гидроузле применены два резервных водосброса. Первый водосброс имеет отметку гребня, на 1,8 м превышающую отметку НПУ, что соответствует прохож-

дению паводкового расхода повторяемостью 1 раз в 1000 лет ($P = 0,1 \%$). Длина водосливного фронта водосброса составляет 198 м, что обеспечивает наибольшие удельные расходы и позволяет отказаться от крепления отводящего канала. Второй водосброс имеет водосливной фронт длиной 366 м и представляет собой каменную дамбу с гребнем на отметке, превышающей отметку НПУ на 3,7 м, что соответствует условиям прохождения паводкового расхода повторяемостью 1 раз в 10000 лет ($P = 0,01 \%$). Применение такого технического решения позволило вдвое снизить стоимость водосбросных сооружений.



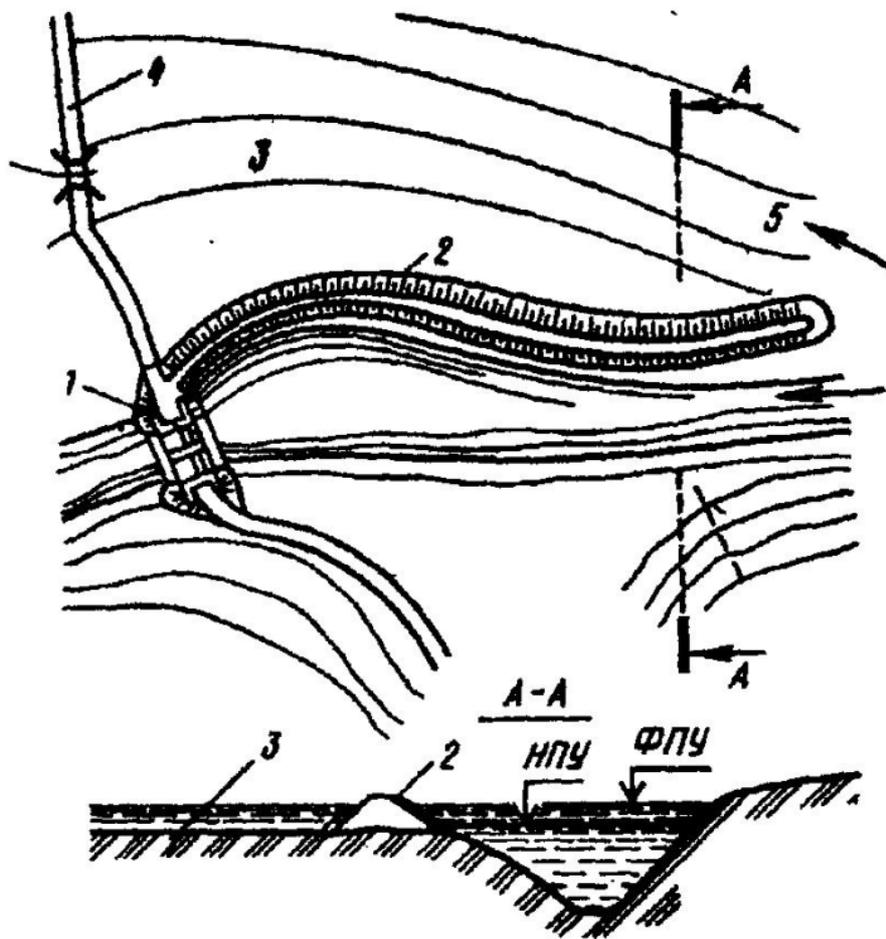
а – гидроузел Эппалок (Австралия); б – гидроузел Бокс Бьют (США);

1, 5 – резервные водосбросы (второй) с размываемой дамбой («плавающая вставка») и (первый) с выемкой в скале; 2 – основной водосброс; 3 – река; 4 – башенный водоспуск

Рисунок 1 – Гидроузлы и вспомогательные водосбросы

Компоновка основных сооружений гидроузла Бокс Бьют включает также основной и резервный водосбросы (рисунок 1, б). Основной бетонный водосброс выполнен ковшовым. Резервный водосброс представляет смываемую перемычку на наклонном бетонном флютбете. Длина перемычки – 135 м, она состоит из 9 секций шириной по 15 м. Каждая секция ограничена с двух сторон бетонными стенками, которые на 1,5 м выше размываемых перемычек. Гребни перемычек расположены на различной высоте для последовательного их смыва по мере нарастания расхода. От-

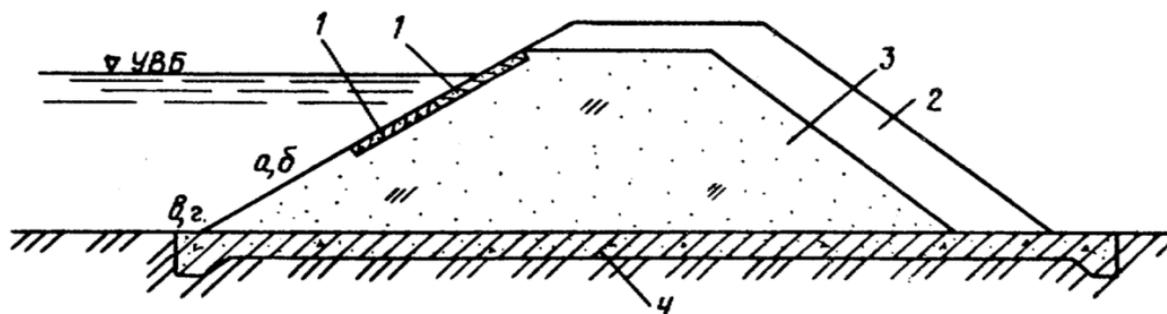
метки перемычек нарастают от центра к бортам канала с шагом 0,5 м. На низконапорных гидроузлах пропуск паводка редкой повторяемости может частично осуществляться в обход плотины по естественной пойме (рисунок 2) [4]. Особое внимание при таком техническом решении уделяется зоне сопряжения бьефов в месте слияния пойменного и руслового потоков. Для исключения больших размывов эта зона и часть поймы укрепляются каменной наброской. Для защиты плотины от подмыва может устраиваться продольная дамба.



1 – водосброс с низким порогом; 2 – сопрягающая дамба; 3 – пойма; 4 – дорога на пойме, затопляемая в паводок; 5 – направление течения воды на пойме в паводок

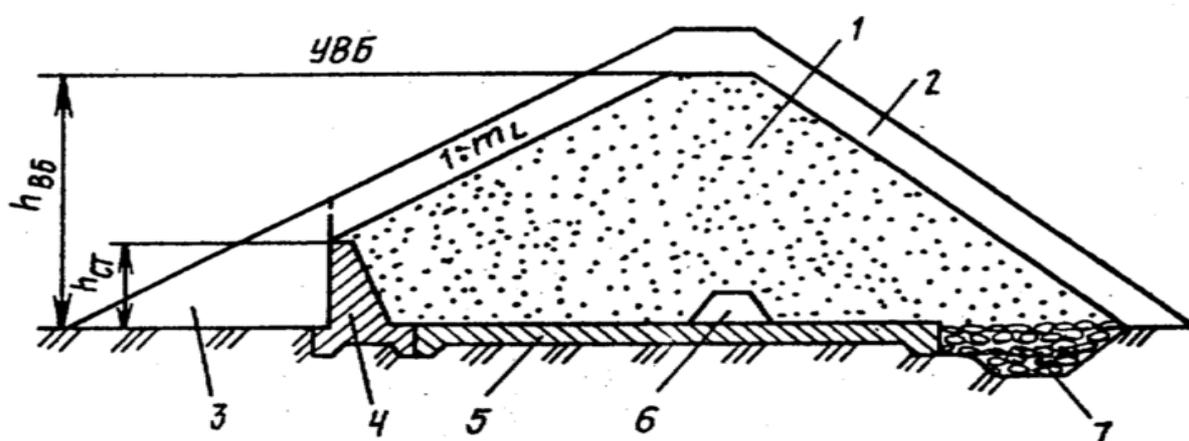
Рисунок 2 – Гидроузел с пропуском части расхода в паводок через пойму

Для резервных водосбросов грунтовых плотин известно несколько технических решений с размываемыми вставками, которые защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами (рисунки 3-5) [6-8].



1 – плиты; 2 – бетонные устои; 3 – грунтовая вставка; 4 – бетонный флютбет

Рисунок 3 – Водосбросное сооружение

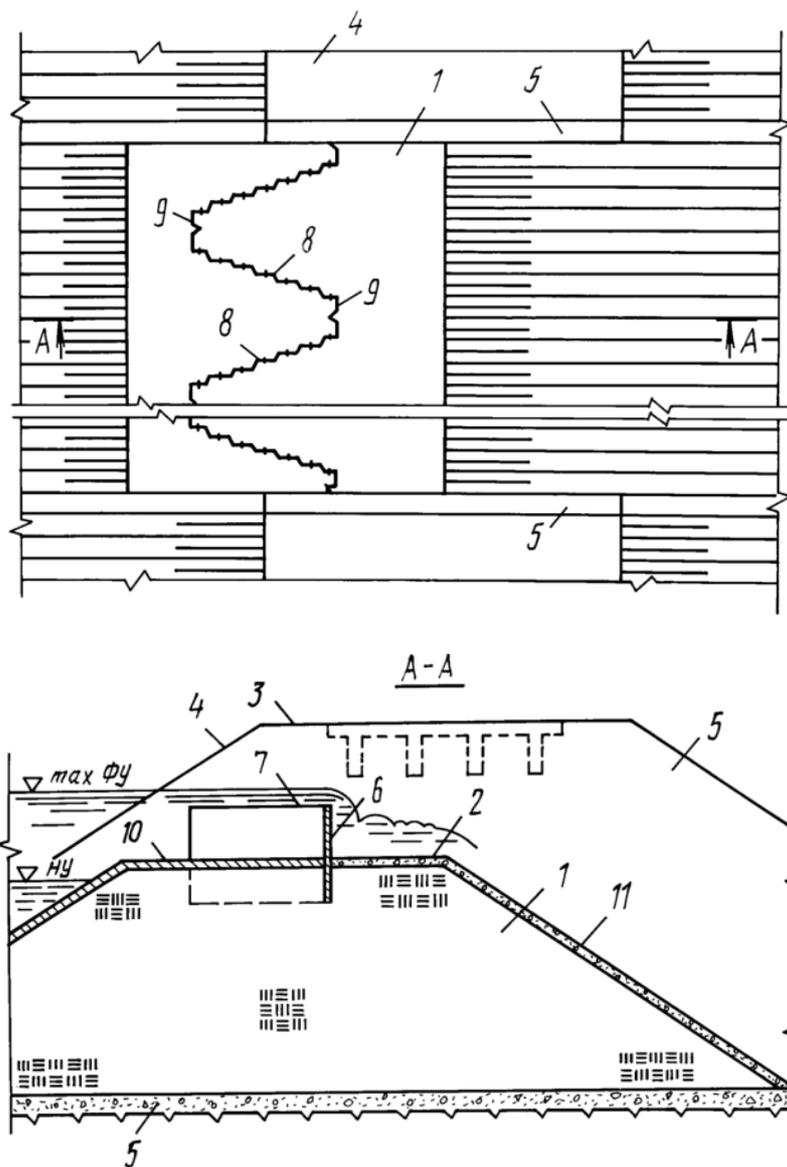


1 – размываемая грунтовая вставка; 2 – бетонные устои; 3 – основная плотина;
4 – водосливная стенка; 5 – плита; 6 – водобой с гасителями; 7 – ковш

Рисунок 4 – Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения

Наиболее простая конструкция резервного водосброса с размываемой вставкой, которая предложена в авторском свидетельстве № 1209754, представлена на рисунке 3. Она включает размываемую грунтовую вставку в виде секции грунтовой плотины с отметкой гребня ниже, чем у плотины. Грунтовая вставка уложена на бетонный флютбет между бетонными устоями, на которые опирается железобетонная плита, уложенная на верхней откос в зоне волнового воздействия. При большом паводке, когда пропускная способность основного водосброса становится недостаточной, уровень воды в верхнем бьефе повышается, происходит перелив через грунтовую вставку и ее разрушение до флютбета и между бетонными ус-

тоями. Часть избыточного расхода сбрасывается через верхнюю кромку плиты, а часть через отверстие под бетонной плитой после размыва грунтовой вставки. По окончании паводка грунтовая вставка восстанавливается до первоначальных размеров. Использование резервного водосброса подобного типа позволит проектировать основные водосбросы с меньшей пропускной способностью.



- 1 – размываемая вставка в виде грунтовой плотины; 2 – гребень грунтовой плотины; 3 – гребень подпорного сооружения; 4 – подпорное сооружение; 5 – одежда из бетона;
 6 – водосливная зигзагообразная стенка; 7 – гребень водосливной стенки;
 8 – водонепроницаемые стальные шпунты зетового профиля; 9 – водонепроницаемые стальные шпунты корытного профиля; 10 – защитный слой из бетона;
 11 – защитный слой из песчано-гравийного материала

Рисунок 5 – Резервный водосброс подпорного сооружения

Аналогичное решение приведено на рисунке 4, где дополнительно для повышения эффективной работы за счет уменьшения глубины сработки водохранилища предлагается выполнить водосливную стенку, высота которой меньше высоты вставки. Высота водосливной стенки определяется из уравнения:

$$Q = m_{\text{ст}} \cdot b \cdot \sqrt{2g} (h_{\text{вб}} - h_{\text{ст}})^{\frac{3}{2}},$$

где Q – сбросной расход, м³/с;

$m_{\text{ст}}$ – коэффициент расхода стенки, принимаемый равным 0,55;

b – ширина вставки, м;

$h_{\text{вб}}$ – глубина в верхнем бьефе, м;

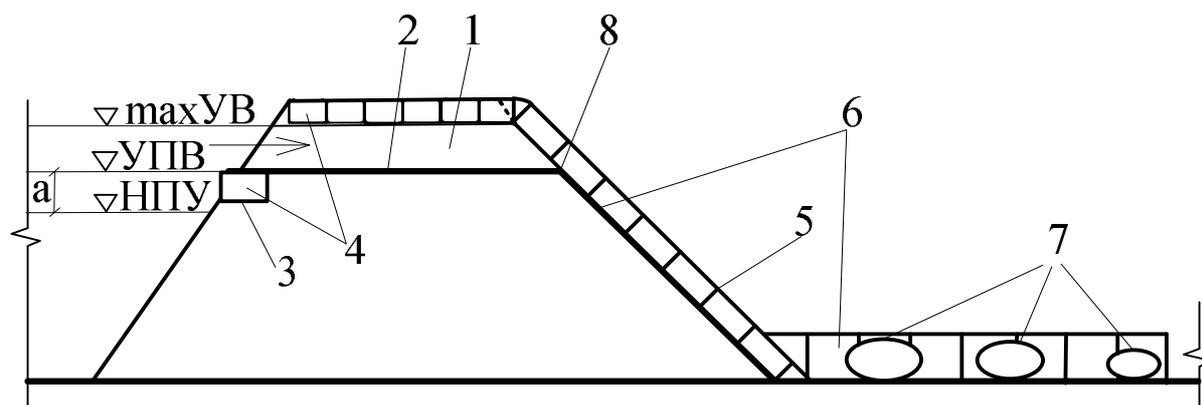
$h_{\text{ст}}$ – высота водосливной стенки, м.

В конструкции, приведенной на рисунке 5, для повышения интенсивности размыва грунтовой вставки водосливную стенку выполняют зигзагообразной в плане формы с отметкой ее гребня выше отметки гребня грунтовой вставки, но ниже отметки гребня грунтовой плотины.

Общим недостатком перечисленных трех технических решений по устройству резервного водосброса с размываемой вставкой является то, что использование для них бетонных (флютбета и устоев) и шпунтовых элементов (водосливной стенки) требует проведения достаточно сложных и дорогостоящих бетонных и шпунтовых работ.

Кроме того, бетонные конструкции водосброса представляют собой элементы, по контуру которых возможно образование неплотностей и пустот, что приведет к снижению надежности работы грунтовой плотины и в целом гидроузла.

Известна конструкция размываемой грунтовой плотины резервного водосброса, которая предложена в патенте на изобретение № 2011736 (рисунок 6) [9]. Она включает верховую и низовую призмы с откосами, комбинированное противофильтрационное устройство, содержащее на-



- 1 – искусственный проран в теле плотины; 2 – защитное покрытие из геомембраны; 3 – приямки в искусственном проране; 4 – пригрузки; 5 – двойное полотнище геомембраны; 6 – гибкие оболочки из геомембраны, заполненные песком; 7 – гасители энергии водного потока; 8 – сварной шов

Рисунок 7 – Резервный водосброс грунтовой плотины

Резервный водосброс грунтовой плотины представляет собой искусственный проран трапецеидального сечения, в ложе которого с целью предотвращения размыва потоком укладывается защитное покрытие из геомембраны, закрепленной на бровках и со стороны верхнего бьефа с помощью коробчатых габионов, заложённых каменным материалом. Водопроточная и водобойная части резервного водосброса выполнены в виде лотка с дном из двойного полотнища геомембраны с несовпадающими отверстиями, предназначенными для свободного отвода фильтрационного потока, а также гибких оболочек из материала геомембраны, заполненных песком, образующих стенки водопропускной и водобойной частей, на которых устроены гасители энергии водного потока так же из гибких оболочек. Отметка порога искусственного прорана устанавливается выше отметки НПУ в водохранилище, но ниже максимальной расчетной отметки ФПУ. Размеры искусственного прорана определяются исходя из обеспечения пропуска максимального расчетного расхода паводка, превышающего расчетную обеспеченность. Для определения необходимой ширины искусственного прорана трапецеидального сечения предложена следующая расчетная формула [11]:

$$b = \frac{\Delta Q}{\varepsilon \cdot \varphi \cdot \kappa \sqrt{2g \cdot H^{3/2}}} - m_0 \cdot H,$$

где ΔQ – расчетный расход прорана ($\text{м}^3/\text{с}$), определяемый из условия превышения максимального паводочного расхода над проектным расходом обеспеченностью 0,5-1,0 % для сооружений III-IV класса:

$$\Delta Q = Q_{\text{P}}^{\text{max}} - Q_{\text{P}},$$

где ε , φ , κ – коэффициенты, соответственно, бокового сжатия потока на входе, скорости и пространственности истечения потока через проран;

H – напор на входе, м;

m_0 – коэффициент заложения откосов прорана.

Преимуществом предлагаемой конструкции резервного водосброса, по сравнению с существующими, является повышенная пропускная способность за счет гладкой поверхности геомембраны, быстрота возведения (в течение 2-3 дней) и сравнительно невысокая стоимость. Такие резервные водосбросы наиболее целесообразно применять в дополнение к основным при эксплуатации малых водохранилищ, если по прогнозу предполагается паводок, превышающий расчетную обеспеченность. В случаях, когда оболочки будут заполняться воздухом или водой, водосброс может использоваться как аварийный с полной его установкой в течение 3-5 часов.

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что надежность и безопасность грунтовых плотин и гидроузлов в целом в значительной степени зависит от работы водосбросных сооружений [12]. Наибольшее число повреждений грунтовых плотин (около 44 %) связано с водосбросами, а наиболее распространенной причиной их аварий (около 35 % случаев) является недостаточная пропускная способность [13]. На основании обобщения данных об отказах (разрушениях) грунтовых плотин малых водохранилищ установлено, что в 30 % случаев аварии происходят на водосбросных сооружениях с вероятностью риска разрушения $2,3 \times 10^{-3}$ 1/год [14].

Таким образом, применение резервных водосбросов в составе речных гидроузлов комплексного и мелиоративного назначения позволит повысить их эксплуатационную надежность и безопасность. Использование одного или двух резервных водосбросов в дополнение к основному водосбросу с точки зрения теории надежности можно рассматривать как систему с резервированием, замещением с ненагруженным резервом [15]. При этом система с ненагруженным резервом дает наибольшую надежность по сравнению с нагруженным и облегченным резервным элементом. В связи с этим представляют значительный интерес исследования таких систем резервирования применительно к комплексу «основной водосброс – резервные водосбросы».

В заключении приведем некоторые общие рекомендации по применению резервных водосбросов в составе гидроузлов с грунтовыми плотинами:

- резервные водосбросы в составе гидроузлов должны применяться в дополнение к основным водосбросам;

- при проектировании резервных водосбросов в составе гидроузлов основные водосбросы целесообразно рассчитывать на максимальные паводочные расходы более частой повторяемости как для основного расчетного случая этого же класса сооружений;

- резервные водосбросы должны удовлетворять таким основным требованиям, как простота конструкции и невысокая стоимость;

- расчетные расходы резервных водосбросов в составе проектов гидроузлов должны приниматься как для паводков редкой повторяемости, соответствующей поверочному случаю данного класса грунтовой плотины;

- для повышения эффективности работы резервных водосбросов в их составе могут устраиваться грунтовые размываемые вставки с отметкой гребня на отметке ФПУ или несколько ниже;

- для низконапорных гидроузлов в качестве резервных водосбросов могут использоваться пойменные участки русел рек;

- при эксплуатации низконапорных гидроузлов для пропуска паводочных расходов, превышающих расчетный расход заданной обеспеченности, должны применяться быстровозводимые резервные водосбросы с непродолжительным временем установки;

- для аварийных водосбросов могут применяться мобильные быстровозводимые водосбросы из готовых сборных элементов с оптимальным временем их монтажа.

Список использованных источников

1 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003: СП 58.13330.2012: утв. М-вом регионального развития Рос. Федерации 29.12.11 № 623: введ. в действие с 01.01.13. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 38 с.

2 Гидротехнические сооружения: учеб. для вузов / Н. П. Розанов [и др.]; под ред. Н. П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 432 с.

3 Гидротехнические сооружения: учеб. для вузов / И. А. Васильева [и др.]; под ред. Н. П. Розанова. – М.: Стройиздат, 1978. – 647 с.

4 Гидротехнические сооружения / Л. Н. Рассказов [и др.]; под ред. Л. Н. Рассказова. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2008. – Ч. 1. – 576 с.

5 Мелиорация и водное хозяйство. Сооружения. Строительство: справочник / И. С. Лапидовская [и др.]; под ред. А. В. Колганова, П. А. Полад-заде. – М.: «Ассоциация Экоост», 2002. – 601 с.

6 А. с. 1209754 СССР, МКИ(4) Е 02 В 7/06. Водосбросное сооружение / П. М. Богословчик (СССР). – № 3776503/29-15; заявл. 30.07.84; опубл. 07.02.86, Бюл. № 5. – 3 с.

7 А. с. 1532656 СССР, МКИ(4) Е 02 В 8/06. Резервный водосброс грунтового подпорного сооружения / Г. Л. Мажбиц (СССР). – № 4348727/23-15; заявл. 25.12.87, опубл. 30.12.89, Бюл. № 48. – 3 с.

8 Пат. 2071527 Российская Федерация, МПК(6) E02B9/04. Резервный водосброс подпорного сооружения / Ягин В. П., Руднов В. М.; заявитель и патентообладатель Проектно-изыскательский ин-т «Красноярскгидропроект». – № 92001646/15; заявл. 20.10.92; опубл. 10.01.97, Бюл. № 29. – 3 с.

9 Пат. 2011736 Российская Федерация, МПК(5) E02B7/06, E02B8/06. Размываемая грунтовая плотина резервного водосброса / Малаханов В. В.; заявитель и патентообладатель Московский инженерно-строительный ин-т им. В. В. Куйбышева. – № 4926435/15; заявл. 08.04.91; опубл. 30.04.94, Бюл. № 12. – 4 с.

10 Косиченко, Ю. М. Быстровозводимый резервный водосброс низконапорного гидроузла малого водохранилища [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко, К. В. Морогов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2012. – № 4(08). – 14 с. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=131&id=138>.

11 Пат. 2498007 Российская Федерация, МПК E02B7/06 (2006.01). Резервный водосброс грунтовой плотины / Косиченко Ю. М., Морогов К. В., Чернов М. А., Михайлов Е. Д.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное

научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации». – № 2012114853/13; заявл. 13.04.12; опубл. 10.11.13, Бюл. № 31. – 9 с.

12 Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Белендир [и др.]. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2003. – Т. 1, 2. – 546 с.

13 Дерюгин, Г. К. Разрушение плотин в связи с пропуском сбросных расходов / Г. К. Дерюгин, О. С. Наумов // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 2. – С. 30-33.

14 Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка надежности грунтовой плотины малого водохранилища с использованием диагностических показателей по данным наблюдений / Ю. М. Косиченко, Е. А. Савенкова // Природообустройство. – 2012. – № 5. – С. 41-45.

15 Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – М.: Росинформагротех, 2005. – 388 с.

Косиченко Юрий Михайлович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке, Российский научно-исследовательский проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация.

Контактный телефон: 8 (8635) 26-51-11.

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Kosichenko Yuriy Mikhaylovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Science, Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novochoerkassk, Russian Federation.

Contact telephone number: 8 (8635) 26-51-11.

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Михайлов Евгений Дмитриевич – младший научный сотрудник, Российский научно-исследовательский проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация.

Контактный телефон: 8-952-584-10-73.

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Mikhaylov Yevgeniy Dmitriyevich – Junior Researcher, Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novochoerkassk, Russian Federation.

Contact telephone number: 8-952-584-10-73.

E-mail: rosniipm@yandex.ru