

Д.М. БЕНИН, В.Л. СНЕЖКО, И.И. АБДУЛЛАЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКЦИОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ РАСХОДА

Коэффициент полезного действия оросительной системы может быть повышен путем снижения непроизводительных сбросов воды из каналов. Гидродинамические регуляторы расхода осуществляют управление водоподачей по требованию и включаются в работу при снижении водопотребления в нижнем бьефе сооружения ниже расчетной величины. Теоретическому и экспериментальному изучению гидравлических характеристик рассматриваемых сооружений посвящено много работ, но до сих пор не получено универсальной зависимости для непосредственного определения величины сливающихся в регуляторе расходов и точности водоподачи. Общепринятой схемой слияния потоков в регуляторе была схема течения в вытяжном тройнике, что в дальнейшем требовало внесения эмпирических поправок для согласования теоретических зависимостей с экспериментальными данными. В работе предложен принципиально новый подход к расчету гидродинамических регуляторов – рассмотрение их как инжекционных устройств и применение соответствующих расчетных зависимостей. Результаты теоретических расчетов сопоставлены с существующими данными экспериментального изучения нескольких вариантов исполнения проточной части регуляторов. Выходной участок всех сооружений был выполнен в виде пирамидального диффузора с безотрывным течением. Поток, поступающий из верхнего бьефа в нижний, являлся инжектирующим, поток, циркулирующий между камерой смешения и выходным сечением диффузора, был инжектируемым. Сравнение экспериментальных данных и полученной теоретической кривой показало их хорошее совпадение. В результате проведенных исследований выяснено, что точность регулирования может быть задана целенаправленным поддержанием необходимого горизонта воды в пространстве над диффузором и его увязкой с величиной расхода, поступающего из нижнего бьефа через водослив.

Гидротехническое сооружение, оросительный канал, трубчатый водовыпуск, инжекция, регулирование расхода

Введение. По данным Федерального агентства водных ресурсов на нужды орошения и сельскохозяйственного водоснабжения в России используется порядка 7 млрд м³ воды в год, или 13% от ежегодного объема водозабора свежей воды из источников. На протяжении последних пяти лет этот показатель остается практически неизменным. Экономия водных ресурсов возможна за счет повышения коэффициента полезного действия (КПД) мелиоративных систем. К факторам, влияющим на КПД оросительной системы, относятся расходы воды в каналах и периодичность их действия. К примеру, для Самур-Апшеронского канала суммарные потери на непроизводительный сброс из магистральных, распределительных каналов и внутривладельческой сети могут составлять 15% от общего объема водопотерь [1]. По данным Российского научно-исследовательского института проблем мелиорации,

отношение объема сброса воды к объему водозабора на обследованных оросительных системах при неблагоприятных условиях может достигать до 20%, а отношение количества автоматизированных ГТС к общему их числу может составлять не более 5% [2].

Средства гидроавтоматики повышают эффективность функционирования оросительной системы. Внедрение прогрессивных технологий, обеспечивающих экономное использование оросительной воды, является обязательным требованием к эксплуатации оросительных систем [3]. Это требование распространяется как на гидротехнические сооружения, входящие в состав систем, так и на отдельно стоящие гидротехнические сооружения. В РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проводилась разработка технических решений, позволяющих автоматизировать пропускную способность низконапорных водовыпусков.

На рисунке 1 приведена схема гидродинамического регулятора. Сооружение можно получить дооборудованием выходной части трубчатого водовыпуска 1 диффузором и обеспечением подачи воды из нижнего бьефа в сечение трубопровода 4 через отверстие 5 в крышке диффузора 3. Кромка водослива 2 расположена на минимальной отметке воды в отводящем канале, соответствующей максимальному водопотреблению в нижнем бьефе. Снижение водопотребления приводит к росту уровня воды в отводящем

канале, подаче потока в пространство над диффузором, формированию промежуточного бьефа 6 и началу процесса регулирования. Расход Q_0 поступает из промежуточного бьефа и в камере смешения 7 соединяется с расходом Q_1 , поступающим из верхнего бьефа. Суммарный расход сооружения Q_2 является суммой расходов Q_1 и Q_0 , но фактически в нижний бьеф поступает только расход Q_1 , величина которого меньше, чем пропускная способность нерегулируемого водовыпуска при равном напоре.

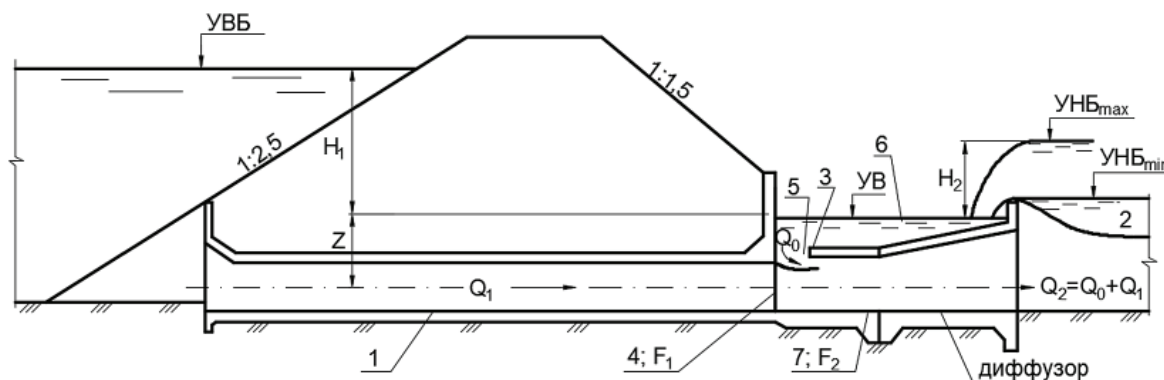


Рис. 1. Трубчатый водовыпуск-регулятор:

- 1 – напорный водовыпуск; 2 – кромка водослива; 3 – крышка диффузора;
4 – выходное сечение трубы; 5 – отверстие; 6 – промежуточный бьеф; 7 – камера смешения

Исследование работы регуляторов расхода по нижнему бьефу приведено в ряде работ [4, 5, 6]. Основным недостатком теоретических предпосылок, заложенных в основу их гидравлического расчета, являлось рассмотрение камеры смешения как вытяжного тройника. Это приводило к расхождению экспериментальных и расчетных зависимостей, которые исправлялись с помощью эмпирических коэффициентов. Непосредственное определение величин сливающихся в регуляторе расходов было невозможно. Это затрудняло определение точности регулирования как функции от уровня воды в верхнем и нижнем бьефах. Для решения этих проблем впервые было предложено рассматривать гидравлическую картину течения потоков в регуляторе как процесс инъекции [7]. При этом транзитный поток Q_1 является инжектирующим потоком, а поток Q_0 , поступающий из промежуточного бьефа – инжектируемым, то есть поднимаемым до уровня нижнего бьефа энергией транзитного потока. Регулятор представляет собой подобие асимметричных струйных насосов, конструкции которых достаточно разнообразны и совершенствуются [8, 9].

Применительно к рассматриваемому сооружению сопло формируется не твердотельными границами, а границей раздела потоков в камере смешения.

Цель исследований – апробация новых теоретических зависимостей для определения основных гидравлических характеристик регуляторов расхода на данных экспериментального изучения работы сооружений.

Материал и методы. Теоретической базой для выполнения расчетов стали основные законы гидродинамики и классические принципы определения гидравлических характеристик инжекционных устройств [10]. Рассмотрение регулятора расхода как водоструйного насоса позволило составить и решить систему уравнений, согласно которой скорость инжектирующего потока J_1 и скорость инжектируемого потока J_2 определяются по зависимостям:

$$Q_1^2 = \frac{2 \cdot g \cdot H_1 \cdot B^2 - 2 \cdot A \cdot C + \sqrt{(2 \cdot A \cdot C - 2 \cdot g \cdot H_1 \cdot B^2)^2 + 4 \cdot C^2 \cdot (B^2 - A^2)}}{2 \cdot (B^2 - A^2)} \quad (1)$$

$$g_2 = \frac{F_1 \cdot g_1 + F_0 \cdot \sqrt{g_1^2 - 2gH_1}}{F_2} \quad (2)$$

где H_1 и H_2 – напор, отсчитываемый между уровнем воды в промежуточном бьефе и верхнем или нижнем бьефе соответственно; A, B, C – константы, известные до начала расчета и равные:

$$A = \frac{F_1}{F_2} + \frac{F_0}{F_2} - \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2 - \left(\frac{F_0}{F_2}\right)^2 - \frac{1}{2} - \frac{(\xi-1)}{2} \cdot \left[\left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{F_0}{F_2}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$B = (1 - \xi) \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{F_0}{F_2} - 2 \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{F_0}{F_2} \quad (4)$$

$$C = gH_2 + gH_1 \cdot \left[2 \cdot \frac{F_0}{F_2} - 1 - \left(\frac{F_0}{F_2}\right)^2 \cdot (\xi + 1) \right] \quad (5)$$

здесь F_1 и F_0 – площади, занимаемые инжектирующим и инжектируемым потоком в камере смешения; F_2 – площадь камеры смешения; ξ – коэффициент сопротивления диффузора с учетом выхода части энергии в нижний бьеф.

Экспериментальные данные представлены результатами изучения в зеркальном гидравлическом лотке регуляторов расхода с пирамидальным диффузором со степенью расширения $n = 2,25$ и углами расширения в горизонтальной плоскости 6° в направлении верхне бьефа 5° . Диффузор обеспечивал безотрывное течение потока. Площадь отверстия 5 (рис. 1) принимала значения 0.6, 0.8, 1.0 и 1.15 от поперечной площади транзитной части водовыпуска. Торцевая стенка вблизи отверстия имела угол наклона 120° [11]. Общий объем экспериментального материала составлял 70 вариантов испытаний (без учета повторов). Каждый вариант относительной площади отверстия был исследован при различных уровнях верхнего, нижнего и промежуточного бьефов. До настоящего времени теоретические расчеты описанных конструкций базировались на гидравлических потерях в вытяжных тройниках с углом бокового подвода 120° при различных соотношениях площади прямого и бокового проходов k и площади сборного рукава, равной площади прямого прохода.

Результаты и обсуждение. Для использования расчетных зависимостей (1-5) необходимо знать площади, занимаемые инжектируемым и инжектирующим потоками в камере смешения. Коэффициентом сжатия ε считалось отношение $\frac{Q_1}{Q_0}$. Для указанных конструкций регулятора значения ε

были определены экспериментально и незначительно уменьшались с ростом инжектируемого потока. Для упрощения расчетов величина ε была принята постоянной и равной 0,77. Результаты сравнения вычисленных теоретически и определенных экспериментально отношений $\frac{H_1}{H_2}$ и $\frac{Q_1}{Q_0}$ приведены на рисунке 2. Экспериментальные точки, соответствующие различным площадям отверстия в крышке диффузора, одинаково хорошо описываются единой теоретической зависимостью. Следовательно, рассмотрение течения в регуляторе допустимо описывать уравнениями инжекции и величина сливающихся расходов в меньшей степени зависит от площади отверстия, подающего инжектируемый поток, а связана с уровнем воды в промежуточном бьефе и степенью стеснения инжектируемым потоком камеры смешения.

Напор на сооружение равен $H = H_1 - H_2$, и отношение напоров над уровнем промежуточного бьефа всегда больше единицы $\frac{H_1}{H_2} > 1$. Зависимость $\frac{Q_1}{Q_0} = f\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$ имеет два характерных участка: значительное превышение расхода Q_0 , забираемого из промежуточного бьефа над расходом Q_1 , поступающим из верхнего бьефа в нижний и практически постоянное соотношение сливающихся в регуляторе расходов, при котором из промежуточного бьефа забирается от 20% расхода транзита. Каждой форме исполнения проточной части регулятора и положению водовыпуска относительно уровней воды в бьефах соответствует свой участок кривой, которому будут подчиняться сливающиеся в регуляторе расходы. Положение пика кривой зависит от коэффициента сжатия ε : чем меньшую часть поперечного сечения камеры смешения занимает инжектирующий поток, тем пик острее и расположен ближе к точке с абсциссой $\frac{H_1}{H_2} = 1$, при этом ордината пика остается практически неизменной.

Наполнение промежуточного бьефа осуществляется за счет перелива потока через кромку водослива 2 (рис. 1). Для обеспечения требуемого отношения сливающихся в регуляторе расходов достаточно поддерживать в промежуточном бьефе соответствующий уровень воды. Другими словами, через водослив из нижнего бьефа должен поступать расход $Q_{\text{вод}}$, часть которого Q_0 будет

инжектирована в камеру смешения, а оставшаяся часть останется в наддиффузорном пространстве. Точность регулирования будет

непосредственно связана с точностью поддержания уровня воды в промежуточном бьефе, который можно назвать регулирующим.

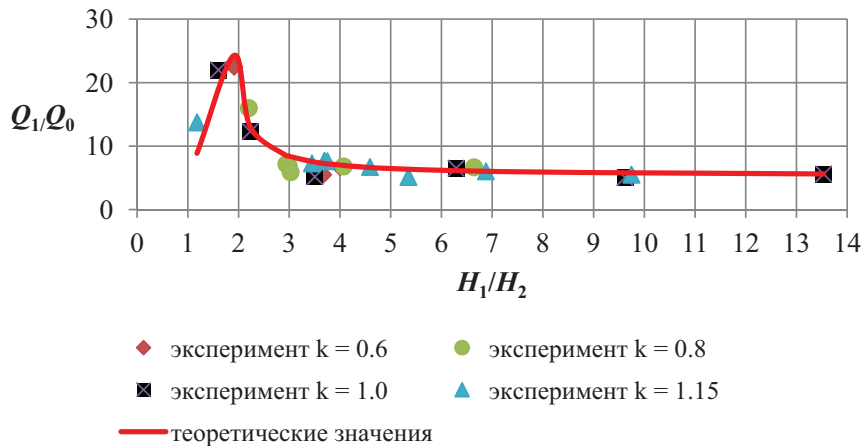


Рис. 2. Связь расходов и напоров регулятора по нижнему бьефу

Заключение

Сопоставление экспериментальных данных и теоретических зависимостей показало правомерность рассмотрения течения воды в регуляторе расхода по нижнему бьефу как в инжекционном устройстве. Поток, поступающий из верхнего бьефа в нижний, является инжектирующим, поток, циркулирующий между нижним бьефом и выходным сечением регулятора – инжектируемым. Расчеты допустимо проводить при постоянном значении коэффициента сжатия, характеризующего долю поперечного сечения камеры смешения, занятую инжектирующим потоком. Точность регулирования связана с возможностью поддержания необходимого уровня воды в наддиффузорном пространстве, который формируется излишком расхода, подаваемого через водослив на крышке диффузора.

Библиографический список

1. Пашаев Э.П. Общие вопросы эксплуатации оросительных систем при договорных отношениях с водопользователем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 4 (24). – С. 250-261.
2. Щедрин В.Н., Колганов А.В., Чураев А.А. Подходы к определению технического уровня мелиоративных систем и обоснование поколений их развития // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2012. – № 3 (07). – С. 28-51.
3. ГОСТ Р 58376-2019 Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Эксплуатация. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 38 с.

4. Снежко В.Л., Хусни, И. Автоматизация водопропускных сооружений мелиоративных гидроузлов // В сб.: Новые направления в решении проблем АПК на основе современных ресурсосберегающих инновационных технологий. Мат-лы Междун. научно-практ. конф., посвященной 65-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Волгоград: Изд-во ВГАУ, 2010. – С. 264-266.

5. Гайсин А.А. Способ совершенствования гидродинамических регуляторов расхода // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2015. – № 3. – С. 159-170. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=351&id=364> (дата обращения – 10.08.2020 г.).

6. Снежко В.Л., Гайсин А.А., Бенин Д.М. Ресурсосберегающие водопропускные сооружения для оросительных каналов // Природообустройство. – 2015. – № 5. – С. 26-31.

7. Снежко В.Л., Бенин Д.М. Инжекционные регуляторы расхода для напорных водопропускных сооружений // В сб.: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства [Электронный ресурс]: Доклады III Всероссийского научно-практ. семинара. – Электрон. дан. и прог. (1,2 Мб). М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2020.

8. Водоструйный насос: пат. 193930 СССР: МПК F05d/Фабриков А.И. – № 1037590/25-8; заявл. 17.11.1965; опубл. 13.03.1967, Бюл. № 7. – 2 с.

9. Струйный насос пат. RU2246642 С2: МПК F04, F5/46/Александрова В.О., Бредихин И.В., Грипа А.Д., Кулько А.П., Худяков К.В.;

№ 2003108552/06; заявл. 20.10.2004; опубл. 20.02.2005, Бюл. № 5. – 10 с.

10. **Лямаев Б.Ф.** Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 256 с.

11. **Хусни С.И.** Совершенствование конструкций регулирующих сооружений на оросительных каналах с применением гидродинамического саморегулирования: дис. ... канд. техн. наук. М.: 1993. – 218 с.

Материал поступил в редакцию 04.07.2020 г.

Сведения об авторах

Бенин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры

«Информационные технологии в АПК» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Прянишникова, 19; e-mail: dbenin@rgau-msxa.ru

Снежко Вера Леонидовна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Информационные технологии в АПК» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева», 127550, г. Москва, Б. Академическая 44; e-mail: VL_Snejko@mail.ru

Абдуллаев Икран Икрам Оглы, аспирант кафедры «Информационные технологии в АПК» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева», 127550, г. Москва, Б. Академическая 44; e-mail: abdullaev.ikram@yandex.ru

D.M. BENIN, V.L. SNEZHKO, I.I. ABDULLAEV

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF INJECTION FLOW REGULATORS

The efficiency of the irrigation system can be increased by reducing unproductive water discharges from channels. Hydrodynamic flow regulators control water supply on demand and are activated when water consumption in the downstream of the structure is reduced below the design value. Many works have been devoted to the theoretical and experimental study of the hydraulic characteristics of the structures under consideration, but no universal dependence has yet been obtained for directly determining the amount of flow rates that merge in the regulator and the accuracy of water supply. The generally accepted scheme for merging flows in the regulator was the flow scheme in the exhaust tee, which later required making empirical corrections to align the theoretical dependencies with experimental data. In this paper, a fundamentally new approach to the calculation of hydrodynamic regulators is proposed – consideration of their operation as injection devices and the application of appropriate computational dependencies. The results of theoretical calculations are compared with the existing data of experimental study of several versions of the flow part of the regulators. The output section of all structures was made in the form of a pyramidal diffuser with a continuous flow. The flow coming from the upstream to the downstream was injecting, the flow circulating between the mixing chamber and the outlet section of the diffuser was injectable. Comparison of experimental data and the obtained theoretical curve showed a good match. As a result of the research, it was found out that the accuracy of regulation can be set by purposefully maintaining the necessary water horizon in the space above the diffuser and linking it with the amount of flow coming from the downstream through the spillway.

Hydraulic structure, irrigation channel, tubular water outlet, injection, flow control.

References

1. **Pashaev E.P.** Obshchie voprosy ekspluatatsii orositelnyh sistem pri dogovornyh otnosheniyah s vodopolzovatelem // Nauchny zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. – 2016, № 4 (24). – S. 250-261.

2. **Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Churaev A.A.** Podhody k opredeleniyu technicheskogo urovnya meliorativnyh sistem i obosnovanie pokolenij ih razvitiya // Nauchny zhurnal Rossijskogo NII

problem melioratsii. – 2012. – № 3 (07). – S. 28-51.

3. GOST R58376-2019 Meliorativnye sistemy i gidrotehnicheskie sooruzheniya. Expluatatsiya. Obshchie trtrebovaniya. – M.: Standardinform, 2019. – 38 s.

4. **Snezhko V.L., Khusni I.** Avtomatizatsiya vodopropusknyh sooruzhenij meliorativnyh gidrouzlov // V sb.: Noveye napravleniya v reshenii problem APK na osnove sovremennyh resursosberegayushchih innovatsionnyh

tehnologij. Mat-ly Mezhdun. nauchno-prakt. konf., posvyashchennoj 65-letiyu Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne. – Voolgograd: Izd-vo VGU, 2010. – S. 264-266.

5. **Gaisin A.A.** Sposob sovershenstvovaniya gidrodinamicheskikh regulyatorov ras-kho_da // Nauchny zhurnal Rossijskogo NII problem melioratsii. – 2015, № 3. – S. 159-170. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=351&id=364> (data obrashcheniya 10.08.2020).

6. **Snezhko V.L., Gaisin A.A., Benin D.M.** Resursosberegayushchie vodopropusknye sooruzheniya dlya orositelnyh kanalov // Prirodoo-bustrojstvo. – 2015. – No. 5. – S. 26-31.

7. **Snezhko V.L., Benin D.M.** Injeksionnye regulyatory raskhoda dlya napornyh vodopropusknyh sooruzheniy // V sb.: Sovemennye problemy gidrauliki i gidrotehnicheskogo stroitelstva [Elektronnyy resurs]: SDoklady III Vserosij-skogo nauchno-prakt. seminar. – Electron. dan. i progr. (1,2 Mb). – M.: Izd-vo MISI-MGSU, 2020.

8. Vodostruyny nasos: pat. 193930 SSSR: MPK G 05d / Fabrikov A.I. № 1037590/25-8; zayavl. 17.11.1965; opubl. 13.03.1967, byul. № 7. – 2 s.

9. Strujny nasos: pat. RU2246642 S2: MPK F 04 F 5/46 / Alexandrova V.O., Bredikhin I.V., Gripa A.D., Kulko A.P., Khudyakov K.V.; № 2003108552/06; zayavl. 20.10.2004; opubl. 20.02.2005, byul. № 5. – 10 s.

10. **Lyamaev B.F.** Gidrostrujnye nasosy i ustanovki. – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1988. – 256 s.

11. **Husni S.I.** Sovershenstvovanie konstruksij reguliruyushchih sooruzhenij nba

orositelnyh kanalah s primeneniem gidrodinamicheskogo samoregulirovaniya: dis. ... cand. tehn. nauk. – M.: 1993. – 218 s.

The material was received at the editorial office
04.07.2020

Information about the authors

Benin Dmitry Mikhailovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Information technologies in AIC», Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation: 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19; e-mail: dbenin@rgau-msha.ru;

Snezhko Vera Leonidovna, doctor of technical sciences, professor, head of the chair «Information technologies in AIC», Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation: 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, 44; E-mail: VL_Snejko@mail.ru; Phone

Abdullayev Imran Ikram Ogly, postgraduate student of the Department «Information technologies in AIC», Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation: 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, 44; 19; e-mail: abdullaev.ikram@yandex.ru

УДК 502/504:627.8:614.7

DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-91-99

Я.В. ВОЛОСУХИН¹, Т.В. ИВАНКОВА², Ю.Я. ПОТАПЕНКО³

¹ Инженерный консалтинговый центр «Безопасность гидротехнических сооружений», г. Новочеркасск, Российская Федерация

² Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Российская Федерация

³ Северо-Кавказская региональная межведомственная стратиграфическая комиссия, Эссентуки, Российская Федерация

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ОСНОВНОГО ИСТОЧНИКА ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА-КУРОРТА КИСЛОВОДСКА

Авторы изучали последствия дождевого паводка 22 июня 2002 г. за весь прошедший период до 2020 г., в том числе комплексно обследовали состояние Эшкаконского водохранилища. Русло обследовалось пешеходными маршрутами, состояние склонов оценивалось в маршрутах с фиксацией тропиной эрозии и проявлений природных экзогенных процессов. Были проведены маршруты по долине р. Эшкакон выше водохранилища, по долине р. Подумок от устья р. Эшкакон до перевала Гум-Баши и далее на юго-восток в верховья р. Эшкакон. Вода в верхнем и среднем течении