

Расход твердого стока при размыве низового откоса грунтовой плотины

Канд. техн. наук, доц. П. М. Богославчик¹⁾, В. А. Евдокимов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В соответствии с принятой расчетной схемой размыв грунтовой плотины при переливе разделен на две стадии. В статье рассмотрена первая стадия, когда происходит размыв низовой упорной призмы. Ключевым фактором при расчете деформаций размыва является выбор формулы расхода твердого стока. Исследования показывают, что механизм формирования и транспортирования твердого стока при размыве моделей плотин из песчаных грунтов весьма схож с ранее описанным многими авторами для условий размыва речных русел. Особенность процесса в том, что размыв происходит при больших скоростях, поэтому твердый сток практически сразу переходит во взвешенное состояние. Для выбора искомой формулы проведены эксперименты на моделях плотин из песчаных грунтов различного гранулометрического состава. Установлено, что при больших скоростях, имеющих место в рассмотренных условиях, значение расхода твердого стока зависит исключительно от гидравлических характеристик потока. Влияние же физико-механических свойств размываемого грунта на величину расхода твердого стока незначительно, и они могут не учитываться. Выполнены расчеты по известным из речной гидравлики формулам, которые показали, что ни одна из них не дает достаточной сходимости с опытными данными. На основе анализа большого числа экспериментальных данных получена формула расхода твердого стока для условий размыва моделей плотин при переливе. При этом учитывался тот факт, что размыв плотины переливом имеет высокую степень стохастичности и трудно поддается теоретическому описанию. Особенно это проявляется в условиях пространственного размыва, когда одновременно с классическим размывом дна периодически происходит обрушение бортов размываемого прорана, что трудно учесть при расчетах.

Ключевые слова: перелив через гребень, уравнения деформации, размыв, расход твердого стока, песчаный грунт

Для цитирования: Богославчик, П. М. Расход твердого стока при размыве низового откоса грунтовой плотины / П. М. Богославчик, В. А. Евдокимов // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 384–388. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-384-388>

Consumption of Solid Runoff during Erosion of Bottom Slope of Soil Dam

P. M. Bohaslauchyk¹⁾, V. A. Evdokimov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Erosion is divided into two stages in accordance with the accepted design scheme for erosion of a soil dam during overflow. The paper deals with the first stage, when the downstream thrust prism is washed out. The key factor in calculating erosion deformations is the choice of the solid flow rate formula. Studies show that the mechanism of formation and transportation of solid runoff during erosion of dam models from sandy soils is very similar to that previously described by many authors for the condition of river channel erosion. The peculiarity of the process is that the erosion occurs at high speeds. Therefore, solid runoff almost immediately goes into a suspended state. To select the required formula, experiments have been carried out on models of dams made of sandy soils having various granulometric composition. It has been established that at high velocities under the considered conditions, the value of the solid waste flow rate depends solely on hydraulic characteristics of the flow. The influence of physical and mechanical properties of the eroded soil on the value of the flow rate of solid runoff is insignificant, and they may not be taken into account. Calculations have been carried out using formulas known from river hydraulics, which show that none of them gives sufficient convergence with experimental data. Based on the analysis of a large number of experimental data, a formula for the discharge of solid runoff for erosion conditions of dam models during overflow has been obtained in the paper. This has taken into account the fact that the dam erosion by the overflow has a high degree of stochasticity and is difficult to describe theoretically. This is especially evident in conditions of spatial erosion, when, simultaneously with the classical erosion of the bottom, the sides of the eroded hole periodically collapse, which is difficult to take into account in the calculations.

Keywords: ridge overflow, deformation equations, erosion, solid runoff flow rate, sandy soil

For citation: Bohaslauchyk P. M., Evdokimov V. A. (2020) Consumption of Solid Runoff during Erosion of Bottom Slope of Soil Dam. *Science and Technique*. 19 (5), 384–388. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-384-388> (in Russian)

Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-06-79
pmih@tut.by

Address for correspondence

Bohaslauchyk Petr M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-06-79
pmih@tut.by

Введение

Ключевым фактором при расчете деформаций размыва является выбор формулы расхода твердого стока. Ранее установлено [1], что размыв грунтовой плотины при переливе можно условно разделить на две стадии. Размыв начинается со стороны низового откоса, и на первой стадии отметка гребня размываемого водослива со стороны верхового откоса остается постоянной до полного размыва низовой призмы плотины. Данные экспериментальных исследований показывают, что механизм формирования и транспортирования твердого стока при размыве моделей плотин из песчаных грунтов весьма схож с ранее описанным многими авторами для условий размыва речных русел. Особенность процесса в том, что размыв происходит при больших скоростях, поэтому твердый сток практически сразу переходит во взвешенное состояние. Существует достаточно большое количество формул расхода твердого стока, которые в соответствии с характером перемещения частиц грунта в потоке подразделяются в основном на два типа: формулы расхода донных (влекомых) наносов и формулы расхода взвешенных наносов. Задачей проведенных авторами статьи исследований являлся выбор формулы расхода твердого стока для расчета деформации низового откоса при переливе воды через гребень грунтовой плотины.

Основная часть

Удельный расход твердого стока равен произведению концентрации грунта в потоке (мутности) на удельный расход воды

$$q_s = Sq. \quad (1)$$

Известно, что средняя весовая концентрация частиц грунта в потоке S зависит от следующих величин: плотности воды ρ и частиц грунта ρ_s , гравитационного ускорения g , вязкости воды μ , гранулометрического состава транспортируемого грунта (в большинстве случаев обходятся средним диаметром частиц d), динамической скорости v_* :

$$S = f(\rho, \rho_s, g, \mu, d, v_*). \quad (2)$$

К. В. Гришанин [2] отмечал, что в области развитого транспорта наносов, т. е. при скоростях, значительно превышающих неразмываемые, картина транспорта существенно упрощается. Здесь независимо от диаметра частиц вязкого подслоя на дне нет и, следовательно, вязкость воды влияет на процесс размыва лишь

в той мере, в какой она влияет на гидравлическую крупность частиц. То же самое можно сказать о величинах ρ_s , g , d . Эти параметры вместе определяют гидравлическую крупность. Кроме того, поскольку в практических расчетах оперировать динамической скоростью сложно, введем в (2) вместо v_* определяющие ее величины, а именно: среднюю скорость потока u , глубину h , гидравлическую крупность w и диаметр d , как количественную характеристику шероховатости песчаного дна. Таким образом, уравнение (2) преобразуется к следующему виду:

$$S = f(u, w, h, d). \quad (3)$$

Удельный расход твердого стока

$$q_s = qf(u, w, h, d). \quad (4)$$

Имеющиеся формулы расхода твердого стока в том или ином виде содержат аргументы, фигурирующие в (4). Кроме того, уравнения расхода взвешенных наносов, несмотря на их большое количество, разнообразием не отличаются, и практически многие из них приводятся к следующему виду:

$$q_s = D \frac{u^m}{w^n h^k} q. \quad (5)$$

Диаметр частиц грунта в отдельных формулах включен с каким-либо показателем степени, или же определяет величину параметра D .

С целью выбора формулы транспортирующей способности потока для условий размыва грунтовых плотин переливом проведен ряд экспериментов на моделях из песчаных грунтов и выполнены расчеты по известным формулам. Опыты проводились в лотке со стеклянными стенками. В верхний бьеф подавался определенный расход. При переполнении верхнего бьефа происходили перелив через гребень и последующий размыв модели. Процесс размыва фиксировался с помощью фотосъемки через определенные промежутки времени или видеосъемки. Опыты проводились с песчаными грунтами различного гранулометрического состава. Далее представлены результаты по четырем сериям опытов.

Серия 1. Диаметр частиц $d = 0,1-0,5$ мм; средний диаметр $d_{50} = 0,30$ мм; средневзвешенная гидравлическая крупность $w = 0,030$ м/с; плотность $\rho_0 = 1,65$ г/см³; коэффициент неоднородности $d_{60}/d_{10} = 3,3$.

Серия 2. $d = 0,5-1,0$ мм; $d_{50} = 0,75$ мм; $w = 0,078$ м/с; $\rho_0 = 1,59$ г/см³.

Серия 3. $d = 0,25-0,5$ мм; $d_{50} = 0,35$ мм; $w = 0,037$ м/с; $\rho_0 = 1,61$ г/см³.

Серия 4. $d = 0,1-1,0$ мм; $d_{50} = 0,38$ мм; $w = 0,0745$ м/с; $\rho_0 = 1,74$ г/см³; $d_{60}/d_{10} = 3,4$.

Опыты проводились в лотках шириной 0,10 м и 0,32 м. Размеры моделей: высота 0,4 м, ширина по гребню от 0,2 до 0,3 м, заложение верхового откоса 1:2,0, низового в опыте – от 1:2,0 до 1:3,0. Расход воды, поступающей в верхний бьеф (приточность), от 2,0 до 6,2 л/с.

На рис. 1 представлена фотография модели размываемой плотины, на рис. 2 показан процесс размыва по одному из опытов в виде зафиксированных в отдельные моменты профилей плотины и кривой свободной поверхности.

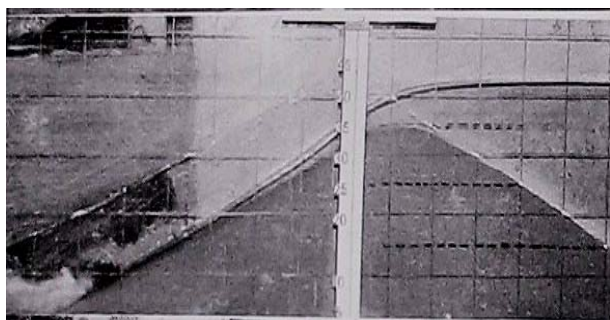


Рис. 1. Экспериментальная модель

Fig. 1. Experimental model

Зафиксирована следующая картина. Размыв происходит примерно параллельными низовому откосу слоями. До полного размыва низовой призмы отметка гребня водослива остается постоянной. Транспорт размываемого грунта на этой стадии происходит во взвешенном состоянии. Опытные значения расхода твердого стока определялись по величине деформаций (рис. 3) по следующей формуле:

$$q_s^{on} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \rho_0, \quad (6)$$

где ΔV – объем смытого за расчетный интервал времени $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ грунта; ρ_0 – плотность грунта тела плотины.

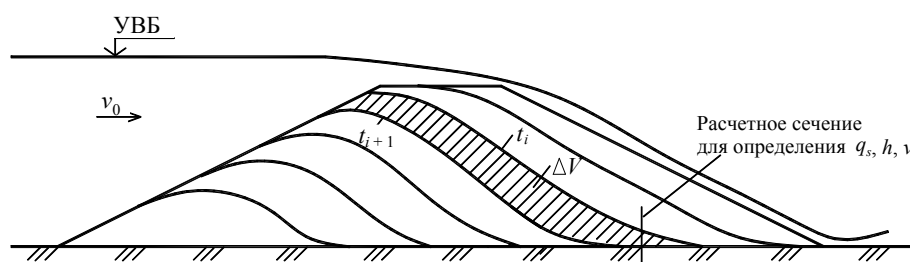


Рис. 3. Схема размыва грунтовой плотины

Fig. 3. Scheme of soil dam erosion

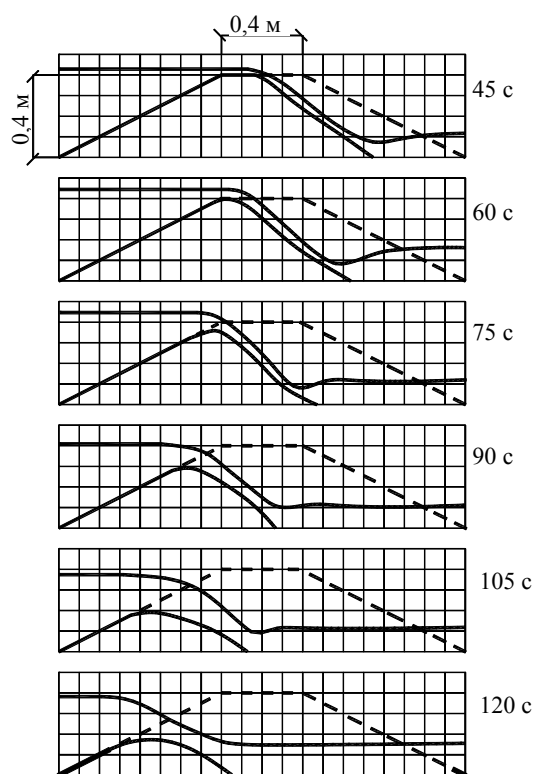


Рис. 2. Размыв модели из песка крупностью 0,1–1,0 мм в лотке шириной 0,1 м

Fig. 2. Blurring sand model with a particle size of 0.1–1.0 mm in a tray with 0.1 m width

На рис. 4 представлены графики зависимости $q_s = f(t)$ для размываемых вставок из песчаных грунтов различной крупности. Из графиков видно, что в рассмотренном диапазоне не прослеживается зависимость расхода твердого стока от крупности частиц песчаных грунтов. То есть признается правильным утверждение о незначительном влиянии характеристик грунта на расход твердого стока при скоростях, значительно превышающих неразмываемые.

С целью сравнения и последующего выбора формулы расхода твердого стока для рассматриваемого случая были выполнены расчеты по известным из речной гидравлики формулам.

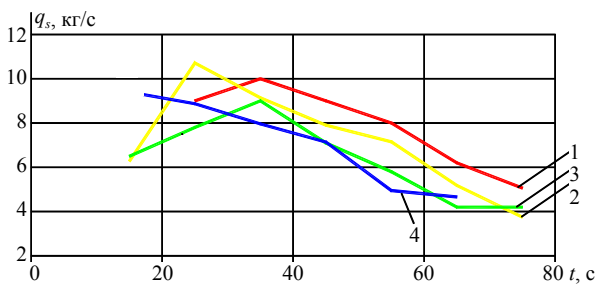


Рис. 4. Зависимость $q_s = f(t)$ для размываемых вставок из песчаных грунтов различной крупности по данным экспериментов: 1 – $d = 0,1 - 0,5$ мм; 2 – $0,5 - 1,0$ мм; 3 – $0,25 - 0,5$ мм; 4 – $d = 0,1 - 1,0$ мм

Fig. 4. Dependence $q_s = f(t)$ for eroded inserts from sand soils of various sizes according to experimental data: 1 – $d = 0.1 - 0.5$ mm; 2 – $0.5 - 1.0$ mm; 3 – $0.25 - 0.5$ mm; 4 – $d = 0.1 - 1.0$ mm

Вычисления проводили следующим образом. В каждом опыте для отдельных промежутков времени продолжительностью $\Delta t = 5 - 10$ с по данным измерений определялся расход воды через размываемую модель. За расчетное сечение для середины каждого расчетного промежутка времени принималось сечение в нижнем бьефе непосредственно за размываемой плотиной, т. е. сжатое сечение (рис. 3). Глубина в расчетном сечении измерялась по фото и для контроля определялась как средняя за время Δt

$$q = \varphi_0 h \sqrt{2g(z - h)}, \quad (7)$$

где φ_0 – коэффициент скорости, принимали 0,95; z – уровень верхнего бьефа относительно дна лотка (средний за Δt).

Скорость в расчетном сечении u определяли по удельному расходу q и глубине h : $u = q/h$.

Расчеты выполнялись по формулам, предложенным в работах: В. Л. Гончарова [3], Б. И. Студеничкина [4], В. С. Россинского (из [5]), И. И. Леви [6], А. Н. Гостунского (из [7]), С. Х. Абальянца [8], К. В. Гришанина [9]. В данной статье формулы перечисленных авторов не приводятся, так как сравнение опытных значений с расчетными показало, что ни одно из этих уравнений не дает совпадений с показателями, полученными опытным путем. Однако следует обратить внимание на две формулы:

– К. И. Россинского

$$q_s = 0,00475 \frac{u^3}{wh} q; \quad (8)$$

– С. Х. Абальянца

$$q_s = 0,018 \frac{u^3}{wh} q. \quad (9)$$

Эти два уравнения хоть и не дают численных совпадений с опытными данными, но схо-

же отражают динамику изменения расхода твердого стока во времени.

Нельзя не привести формулу, полученную А. И. Тищенко и Е. Д. Михайловым, которая представляет интерес по той причине, что получена на основании экспериментов, проведенных для условий размыва плотин [10]:

$$q_s = 186,25 \gamma_{гр} d w \left(\frac{\gamma_{гр} - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \times \left(\frac{6,3gd}{w^2 + 0,48(gd)^{0,33}} + 0,33 \right)^{3,4}. \quad (10)$$

Уравнение (10) вызывает сомнение по следующей причине. Согласно этой формуле, расход твердого стока зависит исключительно от характеристик размываемого грунта и не зависит от параметров потока (скорости и глубины), что противоречит экспериментальным данным, представленным в этой статье.

Возникает предположение, что в рассматриваемом случае транспортирующая способность потока выражается формулой (5). Физическая суть параметра D в данном уравнении в литературе толкуется по-разному. У одних авторов – это характеристика турбулентности потока [8], у других дана попытка его энергетической концепции [5]. В речной гидравлике для расчетов величина его принимается по данным экспериментов. По мнению авторов статьи, при выборе формулы твердого стока для случая размыва низовых откосов плотин переливом оправдан более упрощенный подход по следующим причинам. Процессы деформаций в речной гидравлике, из которой заимствованы все вышеприведенные формулы, имеют стабильный характер, близкий к плавно изменяющемуся. Размыв плотины при переливе – процесс стохастический, отличающийся от деформаций в речной гидравлике нестабильностью как в лабораторных условиях для плоской задачи, так и для одного и того же грунта. В пространственных условиях, кроме размыва дна, происходит обрушение откосов. Поэтому попытки найти более точные зависимости для определения расхода твердого стока не приведут к увеличению точности расчета процесса размыва в целом.

Введем в (5) новый параметр $A = D/w$. Остается подобрать величину параметра A и показателей степени m и k . Путем анализа результатов многочисленных экспериментов установлено, что наибольшую сходимость с опытными данными дает формула, в которой $A = 0,055$, $m = 3,0$ и $k = 1,25$. Таким образом, получено следующее уравнение расхода твердого стока при размыве низового откоса плотины из песчаных грунтов:

$$q_s = 0,055 \frac{u^3}{h^{1,25}} q. \quad (11)$$

На рис. 5 представлены графики зависимости $q_s = f(t)$ для размываемых моделей из песчаных грунтов с крупностью частиц $d = 0,1-1,0$ мм по данным экспериментов и по полученной формуле. Из рисунка видно следующее. Во-первых, наблюдается некоторый разброс опытных данных, хотя во всех опытах модель отсыпалась из одного и того же грунта. Во-вторых, график, построенный по предлагаемой формуле (11), хорошо вписывается в общую картину размыва, что говорит о возможности использования ее при расчете деформаций размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень.

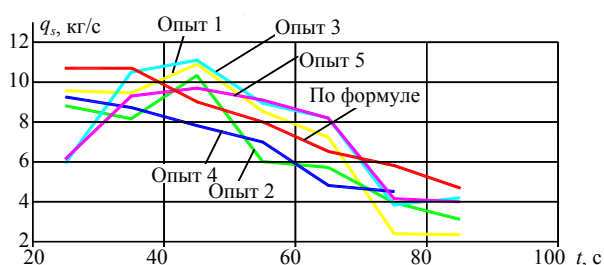


Рис. 5. Зависимость $q_s = f(t)$ для размываемых вставок из песчаных грунтов с крупностью частиц $d = 0,1-1,0$ мм по данным экспериментов и по полученной формуле

Fig. 5. Dependence $q_s = f(t)$ for eroded inserts from sand soils with a particle size of $d = 0.1-1.0$ mm according to experimental data and obtained formula

ВЫВОД

На основании экспериментальных исследований получены опытные данные по величине расхода твердого стока для условий размыва низовых откосов грунтовых плотин при переливе воды через гребень. Установлено, что при больших скоростях, имевших место в рассмотренных условиях, значение расхода твердого стока зависит исключительно от гидравлических характеристик потока. Влияние же физико-механических свойств размываемого грунта на величину расхода твердого стока незначительно, и они могут не учитываться. А это, принимая во внимание нестабильность процесса размыва, практически не повлияет на точность расчетов. Получена формула расхода твердого стока (11), которая позволит вычислять деформации размыва низовой упорной призмы грунтовых плотин при переливе воды через гребень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>.

2. Гришанин, К. В. Расход русловых наносов в реках с песчаным дном / К. В. Гришанин // Русловые процессы и методы их моделирования. Л.: Энергия, 1977. С. 8–14.
3. Гончаров, В. Л. Динамика русловых потоков / В. Л. Гончаров. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 373 с.
4. Студеничников, Б. И. Размывающая способность потока и методы русловых расчетов / Б. И. Студеничников. М.: Стройиздат, 1964. 184 с.
5. Лапшенков, В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов / В. С. Лапшенков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 239 с.
6. Леви, И. И. Динамика русловых потоков / И. И. Леви. Л.: Госэнергоиздат, 1957. 342 с.
7. Указания по расчету заилиния водохранилищ при строительном проектировании. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 55 с.
8. Абальянц, С. Х. Движение взвесей в открытых потоках / С. Х. Абальянц // Труды САНИИРИ. Ташкент, 1958. Вып. 96. С. 3–156.
9. Гришанин, К. В. Устойчивость русел рек и каналов / К. В. Гришанин. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 144 с.
10. Тищенко, А. И. Результаты исследований транспортирующей способности потока при размыве песчаной вставки резервного водосброса / А. И. Тищенко, Е. Д. Михайлов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия, ФГБНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. Т. 62, вып. 2. С. 140–149.

Поступила 06.11.2019

Подписана в печать 11.02.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Bogoslavchik P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away due to Overflow. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296> (in Russian).
2. Grishanin K. V. (1977) Channel Sediment Discharge in Rivers with a Sandy Bottom. *Channel Processes and Methods of their Modeling*. Leningrad, Energiya Publ., 8–14 (in Russian).
3. Goncharov V. L. (1962) *Channel Flow Dynamics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 373 (in Russian).
4. Studenichnikov B. I. (1964) *Flow Erosion and Channel Calculation Methods*. Moscow, Stroyizdat Publ. 184 (in Russian).
5. Lapshenkov V. S. (1979) *Forecasting of Channel Deformations in the Basins of River Waterworks*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 239 (in Russian).
6. Levi I. I. (1957) *Channel Flow Dynamics*. Leningrad, Gosenergoizdat. 342 (in Russian).
7. *Guidelines for the Calculation of Siltation of Reservoirs in Construction Design*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 55 (in Russian).
8. Abalyants S. Kh. (1958) Suspension Movement in Open Streams. *Trudy SANIIRI* [Proceedings of Central Asian Research Institute of Irrigation]. Tashkent, 96, 3–156 (in Russian).
9. Grishanin K. V. (1974) *Stability of River Bed and Canals*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 144 (in Russian).
10. Tishchenko A. I., Mikhailov E. D. (2016) The Results of Studies of the Transporting Ability of the Flow During Erosion of the Sand Insert of the Reserve Spillway. *Puti Povysheniya Effektivnosti Oroshaemogo Zemledeliya* [Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture]. Novocherkassk, Publishing House of "Russian Scientific Research Institute for Land Reclamation Problems", 62 (2), 140–149 (in Russian).

Received: 06.11.2019

Accepted: 11.02.2020

Published online: 30.09.2020