

## Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений

Кандидаты техн. наук, доценты Г. Г. Круглов<sup>1)</sup>, Н. Н. Линкевич<sup>1)</sup>,  
О. В. Немеровец<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Бетонные плотины, входящие в состав речных гидроузлов, сопрягаются с земляными сооружениями или с берегами с помощью береговых устоев. Если грунт берега или земляной плотины водопроницаем, то в зоне примыкания возникает фильтрация воды вокруг берегового устоя. Расчет фильтрации в обход берегового устоя при заданных отметках уровней воды в верхнем и нижнем бьефах выполняется с целью построения опоясывающей устой кривой депрессии и определения градиента фильтрационного потока, контролирующего фильтрационную прочность грунта за устоем. Теоретических решений эта задача не имеет ввиду ее сложности, для отдельных расчетных схем разработаны приближенные методы расчета. Для случая, когда грунт за береговым устоем однородный и изотропный, приток грунтовых вод со стороны берега отсутствует или незначительный (им можно пренебречь), а береговой устой располагается на водоупоре, предложены приближенные методы В. П. Недриги и Р. Р. Чугаева. Опыт обследования ряда белорусских гидроузлов показал, что отсутствие обоснованного расчетами прогноза положения уровней грунтовых вод за устьем ведет к снижению прочности и устойчивости берегового устоя и к возможному его разрушению. В лабораторных условиях выполнена экспериментальная проверка разработанного Р. Р. Чугаевым приближенного метода расчета фильтрации в обход берегового устоя. По результатам опыта построена опоясывающая устой кривая депрессии, которая показала хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных, что позволяет использовать этот метод для обоснованного проектирования конструкций береговых устоев, обеспечивающих их надежную эксплуатацию.

**Ключевые слова:** бетонные сооружения, земляная плотина, берег, береговой устой, обходная фильтрация, кривая депрессии, контролирующий градиент

**Для цитирования:** Круглов, Г. Г. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич, О. В. Немеровец // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 252–257. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>

## Filtration Bypassing Retaining Hydraulic Structures

G. G. Kruglov<sup>1)</sup>, N. N. Linkevich<sup>1)</sup>, O. V. Nemerovets<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Concrete dams that are part of river waterworks are integrated with earthworks or with banks using coastal abutments. If the soil of cost or earthen dam is permeable, then in the zone of contiguity water filtration occurs around the coastal abutment. Calculation of filtration bypassing the coastal abutment at specified water levels in the upper and lower pools is performed with the aim of constructing an encircling curve of depression and determining a gradient of filtration flow that controls the filtration strength of the soil beyond the abutment. This problem has no theoretical solutions – in view of its complexity, approximate calculation methods have been developed for individual calculation schemes. For the case when the soil behind the coastal abutment is homogeneous and isotropic, groundwater inflow from the coast is absent or insignificant and can

### Адрес для переписки

Круглов Георгий Георгиевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 268-84-50  
hidrokaf@bntu.by

### Address for correspondence

Kruglov Georgiy G.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 268-84-50  
hidrokaf@bntu.by

be neglected, and the coastal abutment is located on a water bed and approximate methods by V. P. Nedrigi and R. R. Chugaeva are proposed in the paper. The experience of surveying a number of Belarusian hydropower stations has shown that the absence of a justified prediction pertaining to the position of groundwater levels beyond the estuary leads to a decrease in the strength and stability of the coastal abutment and its possible destruction. An experimental verification of the approximate method for calculation filtration bypassing the coastal abutment developed by R. R. Chugaev has been carried out in laboratory conditions. According to the obtained experience a depression curve encircling the abutment has been constructed which show good agreement between experimental and calculated data that allows to use this method for reasonable design of coastal abutment structures ensuring their reliable operation.

**Keywords:** concrete structures, earth dam, coast, abutment, bypass filtration, depression curve, controlling gradient

**For citation:** Kruglov G. G., Linkevich N. N., Nemerovets O. V. (2020) Filtration Bypassing Retaining Hydraulic Structures. *Science and Technique*. 19 (3), 252–257. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257> (in Russian)

## Введение

В состав любого речного подпорного гидроузла в Республике Беларусь входят: земляная плотина, бетонные водосбросные и водозаборные сооружения, здания ГЭС и др. Сопряжение бетонных сооружений с земляной плотиной или берегом осуществляется с помощью береговых устоев. Береговые устои предназначены для защиты земляной плотины или берега от действия воды, сливающейся через водосбросы, для направления ее в водосбросное отверстие и обеспечения плавного ее растекания в нижнем бьефе, а также для предотвращения опасного воздействия фильтрационного потока, идущего в обход бетонных сооружений в зоне примыкания их к берегу или земляной плотине.

Береговой устой состоит из трех основных элементов [1]: вертикальной продольной стенки, верхового и низового сопрягающих открылков (рис. 1).

Под действием напора (разности уровней в верхнем и нижнем бьефах гидроузла) происходит фильтрация воды через земляную плотину, в грунте основания под бетонными сооружениями и в обход их, вокруг береговых устоев. Расчет фильтрации в обход берегового устоя при заданных отметках уровней воды в верхнем и нижнем бьефах выполняется с целью:

- построения опоясывающей устой кривой депрессии, знание которой необходимо для проверки устойчивости и прочности открылков береговых устоев;
- определения градиента фильтрационного потока, по величине которого проверяется фильтрационная прочность (отсутствие фильтрационных деформаций) грунта за устоем.

Как показало изучение проектной документации ряда белорусских гидроузлов, запроектированных и возведенных в середине прошлого века (гидроузел Заславского водохранилища на р. Свислочь (Минское море), гидроузлы Тетеринской ГЭС на р. Друть и Клястицкой ГЭС на р. Нища), расчеты обходной фильтрации не выполнялись. Произведенные в 2013–2018 гг. натурные обследования этих гидроузлов выявили наличие достаточно серьезных проблем, связанных с обходной фильтрацией.

На Заславском водохранилище на низовом открылке правобережного берегового устоя (рис. 2) имеются многочисленные белые пятна выщелоченного бетона, потемнение и подтеки воды, что свидетельствует о постоянном высоком стоянии кривой депрессии за устоем [2, 3]. Причиной могут быть достаточно короткий путь фильтрационного потока вокруг устоя, отсутствие противофильтрационного устройства в зоне примыкания устоя к земляной плотине. Кроме того, обратная засыпка пазух устоя со стороны верхнего бьефа выполнена суглинком, а со стороны нижнего бьефа – песком. Суглинок при замерзании и оттаивании пучинится, в нем появляются трещины. Разуплотнение грунта на контакте с тыловой гранью устоя могло произойти также вследствие осадок и деформаций устоя. Все это привело к усиленной фильтрации вдоль берегового устоя и к высокому стоянию уровней грунтовых вод за устоем.

В процессе натурных обследований выполнены исследования прочности бетонных конструкций берегового устоя неразрушающим методом с помощью измерителя прочности бетона ИПС-МГ4.03 [4].

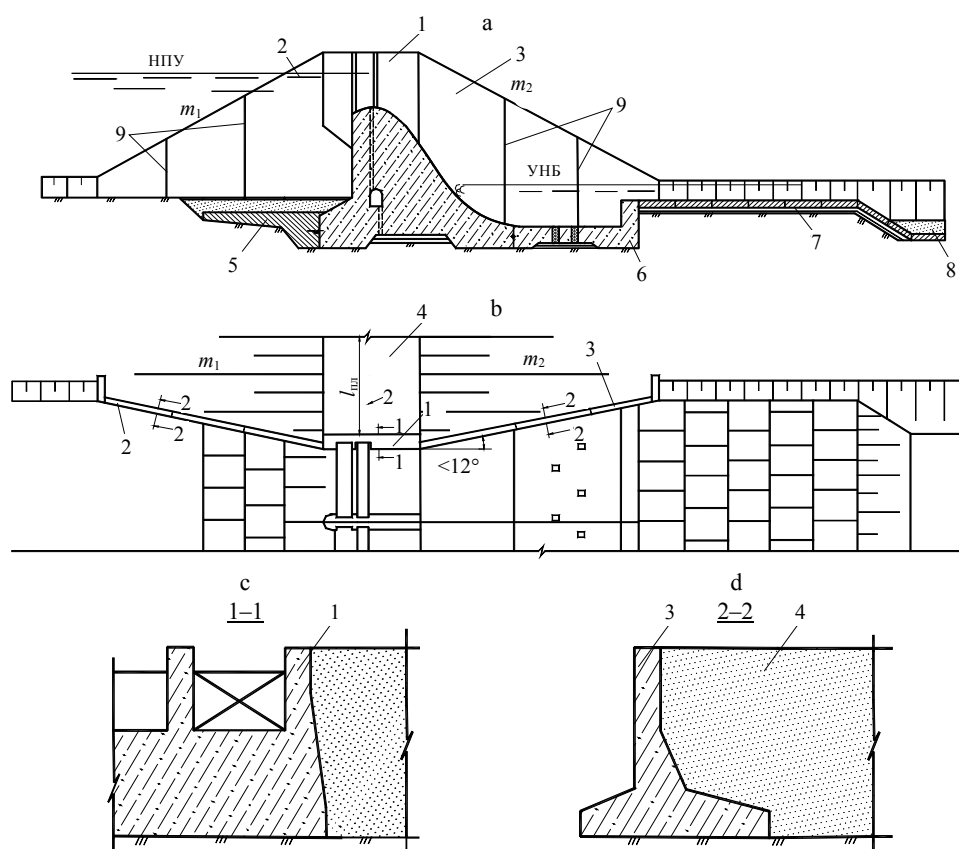


Рис. 1. Конструкция берегового устоя: а, с, d – поперечный разрез по водосливной плотине, по вертикальной продольной стенке и по сопрягающим открькам; б – план; 1 – вертикальная продольная стенка; 2, 3 – верховой и низовой сопрягающие открьки; 4 – земляная плотина; 5 – понур; 6 – водобой; 7 – рисберма; 8 – ковш; 9 – конструктивные швы

Fig. 1. Design of coastal abutment: a, c, d – cross-section along spillway dam, along vertical longitudinal wall and along mating abutment walls; b – plan; 1 – vertical longitudinal wall; 2, 3 – upstream and bottom wing walls; 4 – earthen dam; 5 – upstream floor; 6 – apron; 7 – downstream apron; 8 – bucket; 9 – structural joints



Рис. 2. Подтеки на низовом открьке правобережного устоя

Fig. 2. Smudges on lower wing wall of right bank abutment

В десяти точках низового открька правобережного устоя произведены измерения прочности бетона, которые показали, что в двух точках его прочность составляла 10,1 и 10,9 МПа, что соответствовало марке бетона М150, а в оставшихся восьми точках – 4,3–6,5 МПа (М35–М50). Как видно, высокий уровень грунтовых вод за устоем вызывает фильтрацию воды через бетон открька, выщелачивание бетона и снижение его прочности до значений,

существенно меньших минимально допустимых, которые для подпорных гидротехнических сооружений соответствуют марке М200.

Проведенные в 2008 г. ремонтные работы по штукатурке лицевой поверхности открька необходимого эффекта не дали, так как не была устранена причина (обходная фильтрация и плохая гидроизоляция тыловой грани устоя), вызывающая выщелачивание бетона и его разрушение.

На Тетеринской ГЭС на низовом открьке левобережного устоя под действием фильтрационного потока, идущего в обход устоя, образовалось отверстие в бетоне (рис. 3) [5]. Была предпринята попытка установить арматурную сетку и забетонировать отверстие, что также не дало положительного результата (не устранена причина разрушения). С течением времени бетон, которым заделали отверстие, разрушился, арматурные сетки оголились, и фильтрационный поток выходит через отверстие на левый берег нижнего бьефа.



Рис. 3. Разрушение низового открылка левобережного устоя Тетеринской ГЭС

Fig. 3. Destruction of lower wing wall of left bank abutment at Teterinskaya hydroelectric power plant

В неудовлетворительном состоянии находится и низовой открылок правобережного устоя Клястицкой ГЭС (рис. 4), где также происходят выщелачивание бетона, разрушение и отслаивание штукатурки.



Рис. 4. Низовой открылок правобережного устоя Клястицкой ГЭС

Fig. 4. Lower wing wall of right bank abutment at Klyastitskaya hydroelectric power plant

Таким образом, данные натурных обследований указывают на необходимость выполнения расчетов обходной фильтрации при проектировании и конструктивных мероприятий понижающих уровней грунтовых вод за устоем, уменьшающих градиент фильтрационного потока.

Теоретических решений эта задача не имеет ввиду ее сложности, для отдельных расчетных схем разработаны приближенные методы расчета. Для случая, когда грунт за береговым устоем однородный и изотропный, приток грунтовых вод со стороны берега отсутствует или он незначительный (им можно пренебречь), а береговой устой располагается на водоупоре, предложены приближенные методы В. П. Недриги [6], Р. Р. Чугаева [7], Г. Г. Круглова [8].

Метод В. П. Недриги основан на приведении берегового устоя к фрагментам определенного очертания и получении зависимости для построения опоясывающей этот фрагмент кривой депрессии. Данный метод не нашел широкого применения, так как конструкцию реального берегового устоя привести к имеющимся схемам фрагментов не всегда возможно.

Согласно методу Р. Р. Чугаева, береговой устой заменяется фиктивным (воображаемым) подземным контуром такого же очертания, как и устой, рассчитываемый по методу коэффициентов сопротивления, разработанному Р. Р. Чугаевым для расчета напорной фильтрации под сооружением. При этом наклонные откосы грунтового массива за устоем (берега или земляной плотины) в верхнем и нижнем бьефах, к которым примыкает устой, заменяются вертикальными откосами, доходящими до расчетного водоупора и отстающими от урезов воды на откосах на расстоянии: в верхнем бьефе  $a_1 = 0,4h_1$ , в нижнем  $a_2 = 0,4h_2$  (где  $h_1$ ,  $h_2$  – глубина воды в верхнем и нижнем бьефах). Принимается условие, что воображаемый подземный контур располагается на водопроницаемом основании бесконечной мощности, т. е.  $T_d = \infty$ . На этот контур действует напор  $H$ , равный разности уровней воды в верхнем и нижнем бьефах плотины [9, 10].

В результате расчета подземного контура определяется контролирующий градиент фильтрационного потока и строится эпюра фильтрационного давления на фиктивный подземный контур. На эпюре фильтрационного давления выбираются пять-шесть ординат в разных точках контура ( $h_1^H, h_2^H, \dots, h_i^H$ ) и вычисляются ординаты  $h_i^6$  опоясывающей устой кривой депрессии по зависимости

$$h_i^6 = \sqrt{(h_1 + h_2)h_i^H + h_2^2}.$$

Фильтрационная прочность грунта за береговым устоем проверяется по условию

$$J_k < J_{\text{доп}},$$

где  $J_{\text{доп}}$  – допустимый градиент фильтрационного потока, определяемый по [11] в зависимости от грунта за устоем и класса сооружения;  $J_k$  – контролирующий градиент,  $J_k = \frac{H}{\sum \xi T_p}$ ;  $\sum \xi$  – суммарный коэффициент сопротивления подземного контура;  $T_p$  – расстояние до расчетного водоупора.

Опытная проверка этого метода расчета проводилась в лаборатории гидротехнических сооружений кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ на лабораторной установке, оборудованной в грунтовом лотке длиной 202 см, шириной 65 см и высотой 40 см (рис. 5).





Рис. 5. Общий вид лабораторной установки

Fig. 5. General view of laboratory plant

Модель берегового устоя, состоящая из вертикальной продольной стенки, верхового и низового отсыпков и противофильтрационной диафрагмы, выполненная из дерева, примыкает к берегу, отсыпанному из песка средней крупности. Водупором является дно лотка, на котором стоит устой. Вдоль берегового устоя размещаются семь пьезометров, первый и седьмой из которых фиксируют глубину воды

в верхнем и нижнем бьефах, а второй–шестой – ординаты опоясывающей кривой депрессии. Пьезометры резиновыми трубами выведены на щиток, закрепленный на стенке лотка. В верхнем и нижнем бьефах берегового устоя оборудованы водосливные воронки, поддерживающие постоянные уровни воды в бьефах.

Вода в верхний бьеф устоя подавалась из водопровода за 2–3 ч до начала опыта. При установившемся режиме фильтрации снимались показания пьезометров, по ним строилась опытная опоясывающая кривая депрессии, а также вычисленная по вышеприведенному методу.

Как видно из табл. 1 и рис. 6, вычисленные ординаты опоясывающей устоя кривой депрессии практически совпадают с их опытными значениями, что позволяет использовать приближенный метод расчета Р. Р. Чугаева для прогнозирования положения уровней грунтовых вод за береговым устоем и принимать при необходимости обоснованные конструктивные мероприятия по их снижению, избегая тем самым непредвиденных проблем, вызванных фильтрацией грунтовых вод вокруг береговых устоев.

Таблица 1

Ординаты опоясывающей устоя кривой депрессии

Ordinates of depression curve encircling abutment

Кривая депрессии	Ордината кривой депрессии в пьезометре						
	1 (верхний бьеф)	2	3	4	5	6	7 (нижний бьеф)
Опытная	25,3	21,4	17	16,93	16,37	14,6	8,8
Вычисленная	25,3	21,15	19,28	–	16,27	14,8	8,8

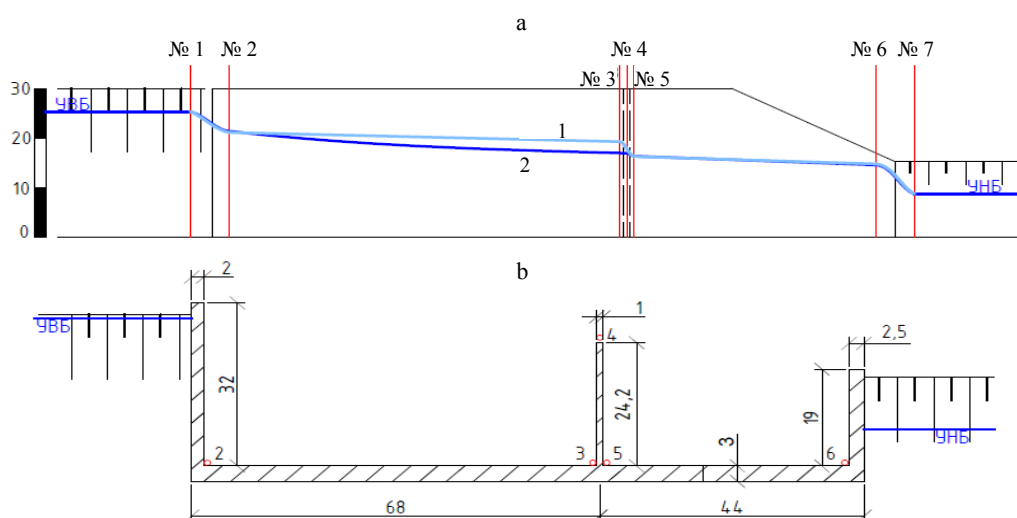


Рис. 6. Вычисленная (1) и опытная (2) опоясывающие устой кривые депрессии: а – план устоя; б – продольный вид

Fig. 6. Calculated (1) and experimental (2) depression curves encircling abutment: a – abutment plan; b – longitudinal view

## ВЫВОДЫ

1. При проектировании речных подпорных гидроузлов необходимо производить расчеты фильтрации в обход береговых устоев для определения положения уровней грунтовых вод за устоем и при необходимости их регулирования с помощью обоснованных конструктивных мероприятий.

2. Выполненная экспериментальная проверка разработанного Р. Р. Чугаевым приближенного метода расчета фильтрации в обход берегового устоя показала хорошее совпадение опытных и расчетных данных, что позволяет рекомендовать его использование в практике проектирования речных подпорных гидроузлов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик, П. М. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: Вышэйш. шк., 2018. 367 с.
2. Исследование технического состояния сооружений гидроузла на водохранилище «Заславское». Минск, 2013. 76 с.
3. Круглов, Г. Г. Результаты натурных обследований гидротехнических сооружений водохранилища «Заславское» и мероприятия по предотвращению их разрушения фильтрационным потоком / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. 2015. Т. 73, № 1. С. 160–165.
4. Линкевич, Н. Н. Эксплуатация гидротехнических сооружений / Н. Н. Линкевич, М. В. Нестеров. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 520 с.
5. Оценка опасности Тетеринского водохранилища на реке Друть Круглянского района Могилевской области / В. В. Ивашечкин [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2017. № 1. С. 62–71.
6. Недрига, В. П. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / В. П. Недрига. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.
7. Чугаев, П. П. Подземный контур гидротехнических сооружений / П. П. Чугаев. Л.: Энергия, 1974. 237 с.
8. Круглов, Г. Г. Гидротехнические сооружения. Лабораторный практикум / Г. Г. Круглов, Ю. А. Медведева. Минск: Вышэйш. шк., 2019. 109 с.
9. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов / П. М. Богославчик [и др.]; под ред. Г. Г. Круглова. Минск: БНТУ, 2006. 585 с.
10. Богославчик, П. М. Гидротехнические сооружения ТЭС и АЭС / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: Вышэйш. шк., 2010. 270 с.

11. Плотины из грунтовых материалов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.04-150–2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2010. 54 с.

Поступила 05.06.2019

Подписана в печать 10.09.2019

Опубликована онлайн 29.05.2020

## REFERENCES

1. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2018) *Design and Calculations of Hydraulic Structures*. Minsk, Vyshayshaya Shkola Publ. 367 (in Russian).
2. *Investigation of Technical Condition of Waterworks Facilities at the Zaslavskoye Reservoir*. Minsk, 2013. 76 (in Russian).
3. Kruglov G. G., Linkevich N. N. (2015) Results of Field Surveys on Hydraulic Structures of the Zaslavskoye Reservoir and Measures to Prevent their Destruction by Filtration Flow. *Melioratsiya* [Melioration], 73 (1), 160–165 (in Russian).
4. Linkevich N. N., Nesterov M. V. (2019) *Operation of Hydraulic Structures*. Minsk, Publishing House of Data Processing Centre of Ministry of Finance. 520 (in Russian).
5. Ivashchkin V. V., Veremenyuk V. V., Kruglov G. G., Linkevich N. N., Murashko O. A., Nedashkovskaya I. V. (2017) Hazard Assessment of the Teterinsky Reservoir on the Drute River of the Kругlyansky District of the Mogilev Region. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoi Zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, (1), 62–71 (in Russian).
6. Nedriga V. P. (1983) *Hydraulic Works: Designer's Handbook*. Moscow, Stroyizdat Publ. 543 (in Russian).
7. Chugaev P. P. (1974) *Underground Circuit of Hydraulic Structures*. Leningrad, Energiya Publ. 237 (in Russian).
8. Kruglov G. G., Medvedeva Yu. A. (2019) *Hydrotechnical Structures. Laboratory Practice*. Minsk, Vyshayshaya Shkola Publ. 109 (in Russian).
9. Bogoslavchik P. M., Bogdanovich M. I., Gatillo S. P., Kruglov G. G., Linkevich N. N. (2006) *Hydrotechnical Structures of Complex Waterworks*. Minsk, Belarusian National Technical University. 585 (in Russian).
10. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2010) *Hydraulic Structures of Thermal Power Plants and Nuclear Power Plants*. Minsk, Vyshayshaya Shkola Publ. 270 (in Russian).
11. ТКП 45-3.04-150–2009 (02250) *Dams from Soil Materials. Building Design Standards*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 54 (in Russian).

Received: 05.06.2019

Accepted: 10.09.2019

Published online: 29.05.2020