

УДК 550.76:574:627.834

**И. В. Войтов**

Белорусский государственный технологический университет

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ОТКРЫТЫХ БЕРЕГОВЫХ ВОДОСБРОСОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПОЛОВОДЬЯХ И ПАВОДКАХ**

Разработана методика расчета пропускной способности открытых береговых водосбросов для обеспечения пропуска максимальных катастрофических расходов половодий и дождевых паводков. Предложены формулы для определения параметров сечения гидравлически наимыгоднейшего профиля подводящего и отводящего каналов.

Разработана методика гидравлического расчета быстротока на основе дифференциального уравнения движения жидкости, которое представлено в виде расчетного уравнения в конечных разностях.

**Ключевые слова:** гидротехническое строительство, водные ресурсы, геоэкология, гидравлические расчеты, береговые водосбросы.

**I. V. Voitau**

Belarusian State Technological University

**CALCULATING PROCEDURE FOR DISCHARGE CAPACITY  
OF OPEN-TYPE COAST SPILLWAYS FOR ENSURING  
OF ENVIRONMENTAL SAFETY  
DURING DISASTROUS FLOODS AND HIGH WATERS**

It has been developed calculation procedure of open-type coast spillways discharge capacity which are used for passing of maximum disastrous water consumptions in cases of floods and rainfall floods. There have been offered formulas for defining of water flow section parameters with the most beneficial hydraulic shape for headrace and tailrace canals.

It has been developed procedure of hydraulic calculation for waterway canal on the basis of liquid movement differential equation which has been presented in the form of design equation in finite differences.

**Key words:** hydraulic engineering, water resources, geoecology, hydraulic calculations, coastal spillways.

**Введение.** Важнейшим элементом любого гидроузла являются водопропускные сооружения. В общем случае при глухой плотине устраивают следующие водопропускные сооружения [1, 2]:

– водосброс, служащий для сброса лишней воды из водохранилища (верхнего бьефа) во избежание переполнения его и перелива воды через гребень плотины; входной порог водосброса, имеющего поверхностное входное отверстие, устраивают на уровне НПУ (нормальный подпорный уровень) или несколько ниже, на высоту затвора, устанавливаемого на этом пороге;

– хозяйственный водовыпуск, устраиваемый для осуществления полезных попусков воды из водохранилища в русло реки или в специально устроенный в нижнем бьефе канал, транспортирующий воду потребителю; порог входного отверстия закладывают несколько ниже УМО (уровень мертвого объема), с тем чтобы при самом низком уровне воды в водохранилище можно было подать потребителю необходимое количество воды; хозяйственный

водоспуск именуют иногда рабочим водоспуском или водовыпуском;

– аварийный водоспуск, служащий для полного опорожнения водохранилища в случае необходимости его очистки от наносов или аварийного состояния плотины; входной порог водосброса устраивают на уровне дна водохранилища.

**Основная часть.** Среди водопропускных сооружений наиболее ответственным является водосброс, от надежной работы которого зависит безаварийная эксплуатация гидроузла. В случае отказа конструкции в работе сооружения или неправильно выполненного расчета его пропускной способности может возникнуть аварийная ситуация. Если водосброс не в состоянии пропустить максимальный катастрофический расход половодья или дождевого паводка, то уровень воды может подняться выше гребня плотины. Вода, переливаясь через плотину, может вызвать ее размыв и затопление нижнего бьефа. Волной прорыва могут быть снесены сооружения в нижнем бьефе, здания

и хозяйственные объекты на затопляемой территории.

Для обеспечения безаварийной надежной работы водосбросов гидроузлов очень важным является правильное назначение расчетного расхода и сам расчет пропускной способности сооружений, позволяющих сбрасывать воду в нижний бьеф в периоды прохождения половодий и паводков, поддерживая тем самым уровень воды в верхнем бьефе на проектных отметках, соответствующих нормальному подпорному или форсированному уровню.

Максимальный расчетный уровень воды устанавливают, пользуясь понятием ежегодной вероятности превышения максимальных расходов воды [3]. При этом поступают следующим образом.

Имея для данного створа реки соответствующий гидрограф, т. е. кривую  $Q = f(t)$  (где  $Q$  – наблюдаемый мгновенный расход в водотоке и  $t$  – время), отмечают на нем для каждого года максимальный мгновенный расход, а затем на основании полученных ежегодных мгновенных максимальных расходов строят соответствующую кривую обеспеченности максимальных расходов или их модульных коэффициентов. По имеющейся кривой обеспеченности устанавливают расчетный расход воды для водосброса в зависимости от класса сооружения для двух расчетных случаев – основного и поверочного [4]. Так, для распространенных в Беларуси сооружений IV класса расчетная вероятность превышения (обеспеченность)  $P$  устанавливается  $P = 5\%$  для основного случая и  $1\%$  для поверочного случая (повторяемость максимального расхода 1 раз в 100 лет); для сооружений III класса соответственно обеспеченность принимается  $3\%$  для основного случая и  $0,5\%$  для поверочного).

**Гидравлический расчет каналов открытых береговых водосбросов.** Береговой водосброс в общем случае состоит из подводящего канала, водослива фронтального типа или шлюза-регулятора, отводящего промежуточного канала, сопрягающего сооружения (быстротока, многоступенчатого перепада), конечного участка (рис. 1) [2].

Подводящий канал обеспечивает плавный подвод потока к водосливу. В зависимости от рельефа в плане он может быть криволинейного или прямолинейного очертания и переменной ширины по длине и сужаться на подходе к водосливу. Уклон дна принимают нулевым на значительных глубинах, обратный – при малых. Дно и откосы укрепляют каменной наброской или бетонными плитами в зоне, где скорости потока выше допустимых для имеющихся грунтов. Коэффициент заложения откосов трапецидального сечения канала принимают  $1,5...2,5$ .

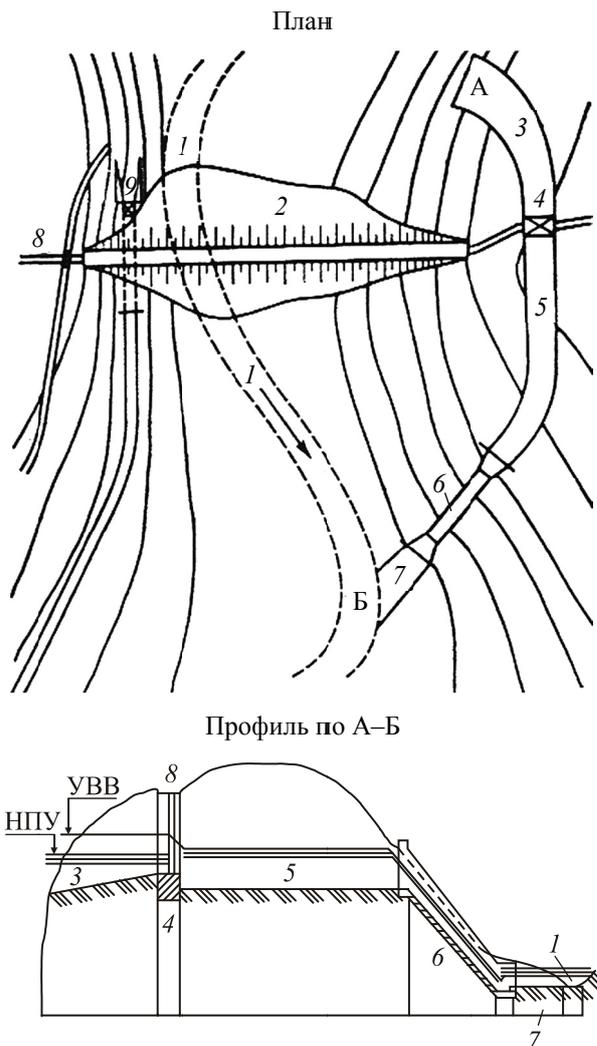


Рис. 1. Схема гидроузла с грунтовой плотиной и открытым береговым водосбросом и водовыпуском:

- 1 – река; 2 – плотина; 3 – подводящий канал водосброса; 4 – сбросной регулятор;
- 5 – промежуточный канал; 6 – сопрягающее сооружение (быстроток); 7 – отводящий канал;
- 8 – дорога; 9 – водозаборное сооружение

Отводящий промежуточный канал предназначен для выравнивания потока и плавного подвода его к сопрягающему сооружению. Гидравлический расчет канала выполняют по формулам равномерного движения [5].

Сопрягающее сооружение – быстроток применяют на береговых открытых водосбросах довольно часто. Это по существу канал, выполненный в бетонном или железобетонном русле с уклоном более критического. Наиболее распространены уклоны быстротока  $0,05...0,25$ . Быстроток может быть постоянной или переменной ширины. В плане быстроток обычно прямолинейный. Поперечное сечение быстротока чаще всего трапецидальное, реже прямоугольное или полигональное.

В зависимости от топографических и гидро-геологических условий и характера сопряжения потока русло подводящего и отводящего (промежуточного) каналов может проектироваться гидравлически наивыгоднейшего сечения или с параметрами поперечного сечения, соответствующего заданной глубине  $h$ .

Сечение гидравлически наивыгоднейшего профиля характеризуется максимально возможной средней скоростью, а следовательно, минимальной площадью живого сечения. При трапециевидальном сечении для этого профиля должно соблюдаться следующее соотношение  $\beta_{г.н}$  между шириной по дну  $b$  и глубиной  $h$ , выраженное через коэффициент заложения откоса  $m$  [5]:

$$\beta_{г.н} = \left(\frac{b}{h}\right)_{г.н} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right). \quad (1)$$

Гидравлический радиус таких русл  $R = 0,5h$ .

Расчет производится обычно по формулам равномерного движения воды:

$$v = C \cdot \sqrt{RI} \quad \text{и} \quad Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{RI}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость течения воды, м/с;  $R = \frac{\omega}{\chi}$ ;

$Q$  – расчетный максимальный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $I$  – уклон водной поверхности руслового потока;  $\omega, \chi, R$  – элементы живого сечения соответственно: площадь (м<sup>2</sup>), смоченный периметр (м), гидравлический радиус (м).

Скоростной коэффициент  $C$  определяют обычно по формуле Н. Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y, \quad (3)$$

где

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10)$$

или в упрощенной форме (погрешность до 2...3%)

$$y = 1,5 \cdot \sqrt{n} \quad \text{при} \quad R < 1; \\ y = 1,3 \cdot \sqrt{n} \quad \text{при} \quad R > 1 \text{ м}. \quad (3a)$$

Для русла гидравлически наивыгоднейшего сечения можно получить формулу, позволяющую непосредственно определять глубину и, соответственно, ширину русла, при которых будет обеспечиваться пропуск заданного расхода  $Q$  [6].

Формулу (2) для равномерного движения воды запишем с учетом формулы (3) и (1) в следующем виде:

$$Q = \omega C \sqrt{RI} = \omega \frac{1}{n} (0,5h)^y \cdot (0,5hI)^{0,5} = \\ = h^2 (\beta_{г.н} + m) \cdot \frac{1}{n} 0,5^y h^y 0,5^{0,5} \cdot I^{0,5},$$

откуда

$$Qn = 0,707 \cdot 0,5^y (\beta_{г.н} + m) I^{0,5} h^{2,5+y}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) после преобразований получим

$$h = \frac{(1,414Q \cdot n)^{1/(2,5+y)}}{0,5^{y/(2,5+y)} \cdot (\beta_{г.н} + m)^{1/(2,5+y)} I^{0,5/(2,5+y)}}, \quad (5)$$

или

$$h = \frac{1}{0,5^{(0,5+y)/(2,5+y)} I^{0,5/(2,5+y)}} \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{\beta_{г.н} + m}\right)^{1/(2,5+y)}. \quad (6)$$

В этих формулах значение показателя степени  $y$  в формуле (3) можно принимать по сокращенной формуле Павловского (3а). В натуральных условиях очень часто среднее значение  $y = 0,2$ , тогда формула (6) упрощается:

$$h = \frac{1,197}{I^{0,185}} \left(\frac{Qn}{\beta_{г.н} + m}\right)^{0,37},$$

или

$$h = \frac{1,197}{I^{0,185}} \left(\frac{Qn}{2\sqrt{1+m^2} - m}\right)^{0,37}, \quad (7)$$

где коэффициент заложения откоса  $m$  принимается из условия устойчивости русла.

Зная глубину  $h$ , ширину русла по дну  $b$  легко определить по (1).

Приведенные выше зависимости позволяют непосредственно рассчитывать параметры гидравлически наивыгоднейшего сечения.

Площадь трапециевидального сечения определяют по формуле

$$\omega = (b + mh)h. \quad (8)$$

Средняя скорость будет

$$v = Q / \omega. \quad (9)$$

Сравнивают расчетную скорость  $v$  с допускаемой скоростью течения воды в канале в заданных грунтовых условиях  $v_{доп}$ . Для обеспечения устойчивости русла средняя скорость русла должна быть  $v \leq v_{доп}$ . Если окажется, что  $v < v_{доп}$ , то устойчивость русла обеспечена, если  $v > v_{доп}$ , то предусматривается крепление каналов.

Для определения допускаемых на размыв скоростей рекомендуется использовать формулы Э. И. Михневича [7], которые учитывают все основные физические и физико-механические свойства грунта и позволяют отдельно оценивать устойчивость к размыву откосов и дна русла в различных характерных стадиях движения наносов.

Гидравлический расчет канала при заданной глубине русла производят обычно графо-аналитическим способом [5]. При назначенной глубине канала  $h$  задаются рядом значений (обычно 4–5) ширины по дну  $b$  и сравнивают текущие модули расхода с заданным  $K_0$ :

$$K_0 = Q / \sqrt{I}. \quad (10)$$

По значениям расходных характеристик  $K$  и ширины русла по дну  $b$  строят график  $K = f(b)$ , из которого снимают расчетное значение  $b$  при  $K = K_0$ . При известных  $h$  и  $b$  определяют площадь поперечного сечения  $\omega$ , а затем среднюю скорость  $v = Q / \omega$ . Рассчитывают  $v_{\text{доп}}$ . Если  $v > v_{\text{доп}}$ , русло крепят обычно каменной наброской или резе бетонными плитами.

Крупность зерен наброски можно рассчитать по формуле [7]:

$$D = \frac{K_3 v^3}{8,74R^{0,5} (g\rho_1 \cdot \rho_B)^{1,5} (f_n^2 - 1/m^2)^{0,75}}, \quad (11)$$

где  $v$  – скорость течения воды, м/с;  $\rho_1$  – плотность материала пригрузки с учетом взвешивания его водой, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – коэффициент заложения откоса;  $f_n$  – коэффициент внутреннего трения материала пригрузки в воде, принимается равным 0,8–0,9 для гравия и мелко-го щебня;  $f_n = 1$  – для камня и крупных сортированных фракций щебня;  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий неравномерность распределения наброски на откосе, принимаемый равным  $1 + 0,3\sqrt{h}$  ( $h$  – высота крепления, м).

#### Гидравлический расчет быстротока.

Быстротоком называют канал с уклоном больше критического, обычно в пределах 0,05–0,25. Быстроток выполняют в виде бетонного лотка с прямоугольным, чаще трапецидальным или резе полигональным поперечным сечением.

Гидравлический расчет быстротока при заданных параметрах поперечного сечения, длины и уклона заключается в построении кривой свободной поверхности, а также расчете сопряжения бьефов.

Неравномерное движение жидкости в не-призматическом русле (форма и размеры его изменяются по длине потока) в общем виде описывается дифференциальным уравнением (12), которое для участка, определяемого граничными условиями, представлено нами в виде расчетного уравнения (13) в конечных разностях [8].

$$I = \frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} + \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial l}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}; \quad (12)$$

$$Z_i - Z_{i+1} = \Delta Z = \frac{1 + \zeta}{2g} \left( \alpha_{i+1} \frac{Q_{i+1}^2}{\omega_{i+1}^2} - \alpha_i \frac{Q_i^2}{\omega_i^2} \right) + \frac{(l_{i+1} - l_i)}{2} \left( \frac{Q_i^2}{K_i^2} + \frac{Q_{i+1}^2}{K_{i+1}^2} \right). \quad (13)$$

В тех случаях, когда расход воды  $Q$  на расчетном участке можно принять постоянным, уравнение (13) упрощается, принимая известный вид [5]:

$$\Delta Z = Q^2 \left[ \frac{\alpha}{2g} (1 + \zeta) \left( \frac{1}{\omega_{i+1}^2} - \frac{1}{\omega_i^2} \right) + \frac{l}{K_{cp}^2} \right]. \quad (14)$$

В этих формулах  $Q$ ,  $\omega$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $C$  – соответственно: расход воды, площадь живого сечения, гидравлический радиус, ширина по верху русла и коэффициент Шези для рассматриваемого сечения глубиной  $h$ ;  $i$  – уклон дна (уклон трения);  $l$  – уклон свободной поверхности;  $\alpha$  – корректив кинетической энергии, принимается  $\alpha = 1,1$ ;  $\Delta Z = (Z_i - Z_{i+1})$  – разность отметок свободной поверхности воды в начале  $Z_1$  и конце  $Z_{i+1}$  расчетного участка, м;  $l = (l_{i+1} - l_i)$  – длина заданного участка русла, м;  $\omega_i$ ,  $\omega_{i+1}$  – площадь живого сечения соответственно в начале и конце расчетного участка, м<sup>2</sup>;  $K_i$ ,  $K_{i+1}$  – модули расхода в  $i$ -том и  $(i + 1)$ -том створе, м<sup>3</sup>/с;  $K_{cp}$  – средняя расходная характеристика на расчетном участке, м<sup>3</sup>/с:

$$K_{cp} = \frac{Q}{\sqrt{i_{cp}}}, \quad \text{или} \quad K_{cp} = (\omega C \sqrt{R})_{cp}. \quad (15)$$

$\zeta$  – коэффициент местного сопротивления: для расширяющихся потоков (скорость уменьшается вдоль течения)  $\zeta = 0,5 \dots 1,0$  (чаще всего принимают  $\zeta = 1,0$ ); для плавно сужающихся потоков (скорость увеличивается вдоль течения) принимают  $\zeta = 0$ .

Для расчета призматических русел

$$\Delta Z = Q^2 \frac{l}{K_{cp}^2}. \quad (16)$$

Уравнения (13), (14) или (16) могут быть использованы для построения линии свободной поверхности потока при решении задач двух типов:

- определение длины участка русла  $l$  между двумя поперечными сечениями, для которых заданы глубины  $h_{i+1}$  и  $h_i$ ;
- определение одной из глубин при заданных значениях другой глубины и длины  $l$ .

Обычно при расчетах нет необходимости строить всю кривую спада. Достаточно определить глубины на входе и на выходе быстротока (рис. 2) [1].

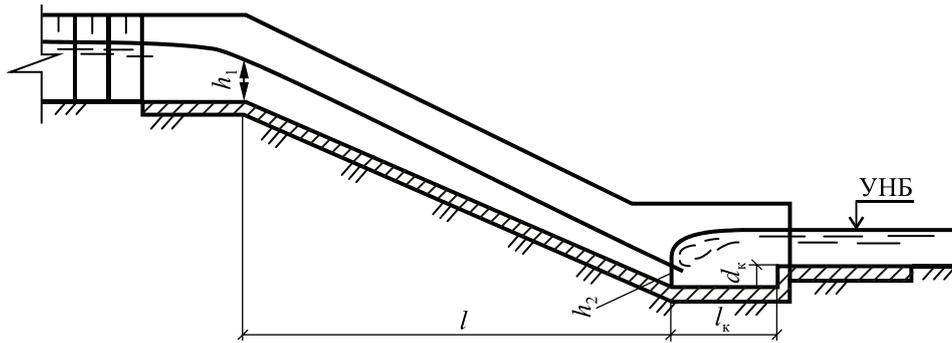


Рис. 2. Быстроток берегового водосброса

Глубина воды на входе в быстроток ( $h_1$ ) принимается равной критической [1]:

$$h_1 = h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{b_0^2 g}}, \quad (17)$$

где  $\alpha = 1,1$  – коэффициент Кориолиса;  $Q$  – расход воды в быстротоке;  $b_0$  – ширина быстротока.

Задавая рядом значений глубины потока, определяют глубину в конце быстротока  $h_2$ .

Рассчитывают максимальную скорость в конце быстротока

$$v_{max} = \frac{Q}{b_0 h_2}. \quad (18)$$

Величина  $v_{max}$  не должна превышать значения допускаемой скорости  $v_{доп}$  для материала быстротока.

**Заключение.** Разработана методика расчета пропускной способности открытых береговых водосбросов для обеспечения пропуска максимальных катастрофических расходов половодий и дождевых паводков. Предложены формулы для определения параметров сечения гидравлически наиболее выгодного профиля подводящего и отводящего каналов. Разработана методика гидравлического расчета быстротока на основе дифференциального уравнения движения жидкости, которое представлено в виде расчетного уравнения в конечных разностях.

### Литература

1. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов: учебное пособие / П. М. Богославчик [и др.]; под ред. Г. Г. Круглова. Минск: БНТУ, 2006. 585 с.
2. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / под ред. В. П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.
3. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения: ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). Введ. 01.07.2010. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. 64 с.
4. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП 45-3.04-170-2009. Введ. 01.07.2010. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. 80 с.
5. Михневич Э. И. Устойчивость русел открытых водотоков Минск: Ураджай, 1988. 240 с.
6. Михневич Э. И. Пропускная способность русел регулируемых рек и водопроводящих каналов // Природнае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця: тэзісы дакладаў IV Міжнароднай навуковай канферэнцыі, Брэст, 10–12 верасня 2008 г. Брэст, 2008. С. 259.
7. Михневич Э. И. Методика проектирования креплений каналов на основе эпюр распределения скоростей по ширине русла // Вестник БНТУ. 2009. № 5. С. 5–8.
8. Михневич Э. И. Формирование гидрологического режима реки при заилении водохранилищ, расположенных в каскаде // Природнае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця: зборнік навуковых прац. 2010. Вып. 3, т. 1. С. 101–104.

### References

1. Bogdanovich M. I., Bogoslavchik P. M., Gatillo S. P., Kruglov G. G., Linkevich N. N. *Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya kompleksnykh gidrouzlov* [Hydraulic facilities of complex waterworks facilities]. Minsk, BNTU Publ., 2006. 585 p.
2. *Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya: spravochnik proektirovshchika* / pod red. V. P. Nedrigi [Hydraulic facilities: Designer's reference book]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 543 p.
3. ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). Technical code of common practice 45-3-04-168-2009 (02250). Estimated hydrological characteristics. Determining procedure. Minsk, RUP "Stroytekhnorm" Publ., 2010, 64 p. (In Russian).

4. ТКР 45-3.04-170-2009. Technical code of common practice 45-3.04-170-2009. Hydraulic facilities. Procedure for determining of loads and exposures (waves, ice and vessels). Minsk, RUP “Stroytekhnorm” Publ., 2010. 80 p. (In Russian).
5. Mikhnevich E. I. *Ustoychivost’ rusl otkrytykh vodotokov* [Stability of estuaries of open-type water courses]. Minsk, Uradzhay Publ., 1988. 240 p.
6. Mikhnevich E. I. [Discharge capacity of estuaries of controlled rivers and water supply canals]. *Tezisy dokladau IV Mizhnarodnay navukovay kanferentsyi (“Pryrodnaye asyaroddze Palesnya: asablivastsi i perspektyvy razvitstsiya”)* [Collection of scientific papers (“Natural environment of Polesie: specific features and development prospects”)]. Brest, 2008. P. 259 (In Russian).
7. Mikhnevich E. I. Procedure of designing of canals’ mounts based on curve distribution of velocities over estuary’s width. *Vestnik BNTU* [The Herald of Belarusian National Technical University]. 2009, no. 5, pp. 5–8 (In Russian).
8. Mikhnevich E. I. Forming of hydraulic mode of river at silting of water reservoirs situated in cascade. *Pryrodnaye asyaroddze Palesnya: asablivastsi i perspektyvy razvitstsiya: zbornik navukovykh prats* [Natural environment of Polesie: specific features and development prospects], 2010, issue 3, vol. 1, pp. 101–104 (In Russian).

#### Информация об авторе

**Войтов Игорь Витальевич** – доктор технических наук, доцент, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rector@belstu.by

#### Information about the author

**Voitau Ihar Vital’evich** – DSc (Engineering), Associate Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rector@belstu.by

*Поступила 07.02.2017*