

УДК 627.836

НОВЫЕ СПОСОБЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КАНАЛОВ

Э. И. Михневич, доктор технических наук
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Аннотация

Приведены новые, удобные для практического применения способы расчета пропускной способности каналов, позволяющая непосредственно (без подбора) определять по графикам или формулам параметры русла гидравлически наивыгоднейшего профиля при одном заданном размере поперечного сечения. Предложены формулы для определения транспортирующей способности потока и минимально допустимой на заиливание скорости течения воды в русле.

Ключевые слова: канал, гидравлический расчет, пропускная способность, допустимые скорости

Abstract

E.I. Mikhnevich
NEW METHODS OF HYDRAULIC CALCULATION OF CHANNELS

New practical method of calculation of channels bandwidth allows us to find channel parameters of the most profitable profile having definite size of the section by charts and formulas. Some formulas are given to determine conveying capacity of water flow and minimum permissible flow speed for siltation in bed.

Keywords: channel, hydraulic calculation, bandwidth, permissible speeds

Введение

При гидравлическом расчете канала движение жидкости в русле принимается обычно равномерным, при котором гидравлические параметры потока (средняя скорость, размеры и форма живого сечения) по его длине не изменяются, а уклон водной поверхности l равен уклону дна i . Уравнение расхода Q при равномерном движении жидкости имеет вид

$$Q = \omega v = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

в котором средняя скорость течения воды, м/с определяется по формуле Шези:

$$v = C \sqrt{Ri}, \quad (2)$$

где ω – площадь живого сечения, м²;

i – уклон дна канала;

R – гидравлический радиус, равный

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (3)$$

χ – смоченный периметр, м;

C – скоростной коэффициент, м^{0.5}/с, определяемый обычно по формуле Н.Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (4)$$

где n – коэффициент шероховатости русла; показатель степени y может быть определен по упрощенным формулам Н.Н. Павловского:

$$y = 1,5\sqrt{n} \quad \text{при } R < 1 \text{ м} \quad (5)$$

$$y = 1,3\sqrt{n} \quad \text{при } R > 1 \text{ м}$$

Для земляных русел с гидравлическим радиусом $R = 1-3$ м значение y может быть принято приближенно $y = 0,2$ [1, 2].

Используемая в расчетах расходная характеристика (модуль расхода) K определяется по уравнению

$$K = \omega C \sqrt{R}, \quad (6)$$

а для заданного расхода K_0 — по формуле

$$K_0 = Q / \sqrt{i}. \quad (7)$$

Гидравлический расчет канала состоит в определении пропускной способности русла и допускаемых на размыв и заиливание скоростей. Задачи, решаемые при расчете пропускной способности русла, можно подразделить на два основных типа:

1 тип — задачи, в которых требуется определить расход воды, пропускаемый руслом с заданными размерами и уклоном;

2 тип — задачи, когда при заданном расчетном расходе и уклоне русла необходимо определить размеры (или один из них при другом заданном) по-

перечного сечения, способного пропускать максимальный заданный расход. При проектировании нового канала решают задачи 2-го типа.

Задачи 1-го типа решаются непосредственно по приведенной выше формуле (1). Задачи 2-го типа — путем подбора, для чего чаще всего используют табличный способ И.И. Агроскина с применением интерполяции [1] или графо-аналитический способ [3], по которому сравнивают текущие модули расхода по (6) с модулем заданного расхода по (7), задаваясь рядом значений искомого размера, и вычисляют при каждом из этих значений все гидравлические элементы русла. Затем строят график $b = f(K)$ или $h = f(K)$, по которому находят искомый размер русла при $K=K_0$. Такие расчеты являются весьма трудоемкими. Поэтому предпринята попытка разработать для решения практических задач 2-го типа более удобные, менее трудоемкие способы, при использовании которых параметры канала можно было бы определять непосредственно (без подбора) по формулам или графикам.

В водохозяйственном строительстве наиболее распространенной формой поперечного сечения каналов является трапецеидальная, как наиболее удобная для производства работ (рисунок 1). Поэтому такая форма сечения принимается при разработке методики расчета каналов.

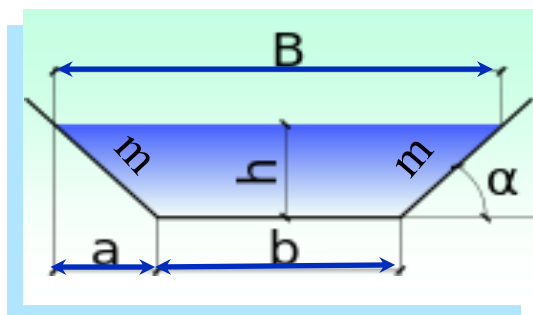


Рисунок 1 – Трапецеидальная форма поперечного сечения канала

На рисунке 1 приведены следующие обозначения:

h – глубина канала, м;

b, B – ширина канала соответственно по дну и по уровню воды, м;

$m = \text{ctg } \alpha = a/h$ – коэффициент заложения откосов.

Используя принятые обозначения, можно записать следующие выражения для основных гидравлических элементов русла и их взаимосвязи:

- **площадь живого сечения ω**

$$\omega = (b + mh)h = b_{cp}h = m_0h^2 / \sigma, \quad (8)$$

где b_{cp} – ширина трапеции по средней линии, вычисляемая по формуле

$$b_{cp} = b + mh, \quad (9)$$

m_0 – характеристика откоса, определяемая формулой

$$m_0 = 2\sqrt{1+m^2} - m, \quad (10)$$

σ – характеристика живого сечения, рассчитанная по формуле

$$\sigma = m_0h / b_{cp} \quad (11)$$

- **смоченный периметр χ**

$$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2} = b_{cp} + h \cdot m_0 \quad (12)$$

- **гидравлический радиус R**

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{b_{cp}h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}} = \frac{h}{1+\sigma} \quad (13)$$

- **ширина по уровню воды B**

$$B = b + 2mh \quad (14)$$

- **отношение ширины русла по дну b к его глубине h**

$$\beta = \frac{b}{h} = \frac{m_0}{\sigma} - m \quad (15)$$

Расчет канала гидравлически наиболее выгодного профиля

Если глубина и ширина канала не ограничиваются какими-либо условиями, то проектируют поперечное сечение русла гидравлически наиболее выгодного профиля, который характеризуется максимально возможной средней скоростью u , а следовательно, минимальной площадью живого сечения ω . Для трапецеидального сечения такой профиль характеризуется соотношением $\beta_{г.н.}$ между шириной по дну b и глубиной h

$$\beta_{г.н.} = (b/h)_{г.н.} = 2(\sqrt{1+m^2} - m). \quad (16)$$

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

Для канала гидравлически наиболее выгодного профиля можно получить формулу, позволяющую непосредственно определять глубину русла. Уравнение (1) для равномерного движения воды запишем с учетом формул (4), (8) и (16) в следующем виде:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} = \omega \frac{1}{n} (0,5h)^y (0,5hi)^{0,5} =$$

$$= h^2 (\beta_{г.н.} + m) \frac{1}{n} 0,5^y h^y 0,5^{0,5} h^{0,5} i^{0,5},$$

откуда

$$Q_n = 0,707 \cdot 0,5^y (\beta_{г.н.} + m) i^{0,5} h^{2,5+y}. \quad (17)$$

Из уравнения (17) после преобразования получим расчетную формулу для определения глубины канала h наивыгоднейшего профиля:

$$h = \frac{(Q_n)^{1/(2,5+y)}}{0,5^{\frac{0,5+y}{2,5+y}} (\beta_{г.н.} + m)^{1/(2,5+y)} i^{0,5/(2,5+y)}} \quad (18)$$

при значении $y = 0,2$

$$h = \frac{1,2}{I^{0,185}} \left(\frac{Q_n}{\beta_{г.н.} + m} \right)^{0,37} \quad \text{или} \quad (19)$$

$$h = \frac{1,2}{I^{0,185}} \left(\frac{Q_n}{m_0} \right)^{0,37},$$

где m_0 – характеристика откоса, определяемая по формуле (10).

Трапецеидальные каналы гидравлически наивыгоднейшего профиля обычно имеют значительную глубину и небольшую ширину по дну, что иногда осложняет их строительство. В связи с этим Д.В. Штеренлихт [2] и Н.Ф. Гульков [4] предлагают увеличивать отношение $u/u_{г.н.}$ и соответственно $\omega/\omega_{г.н.}$ на 1-5 %. При столь малых отклонениях ω от $\omega_{г.н.}$ отклонения b/h при удалении от гидравлически наивыгоднейшего профиля резко возрастают, что создает благоприятные условия для производства работ.

Гидравлический расчет канала при одном заданном размере поперечного сечения

При проектировании каналов чаще всего назначается глубина русла h , исходя из требований сопряжения открытых водотоков в вертикальной плоскости и топографических условий местности. В этом случае неизвестным размером поперечного сечения является ширина русла по дну b . Если задана ширина русла по дну b (обычно из условий производства работ по сооружению канала), то в этом случае искомым является глубина русла h .

Для построения графиков, позволяющих непосредственно (без подбора) определять размеры поперечного сечения (b или h) нами разработаны функциональные зависимости (23-26) между отношениями $h/R_{г.н.}$ и $b/R_{г.н.}$ и параметром $\beta = b/h$.

Для вывода этих зависимостей в качестве исходных приняты уравнения (20) и (21) для гидравлического радиуса R , выраженного через характеристику живого сечения по (13) и гидравлически наивыгоднейший радиус $R_{г.н.}$ [1]:

$$R = \frac{h}{I + \sigma}, \quad (20)$$

$$R = R_{г.н.} \left(\frac{4\sigma}{(I + \sigma)^2} \right)^{\frac{1}{2,5+y}}, \quad (21)$$

Приравняв уравнения (20) и (21), получаем зависимость для определения отношения $h/R_{г.н.}$

$$\frac{h}{R_{г.н.}} = (4\sigma)^{\frac{1}{2,5+y}} \cdot (I + \sigma)^{\frac{0,5+y}{2,5+y}}. \quad (22)$$

Запишем характеристику живого сечения σ по (11) в виде $\sigma = m_0/(\beta+m)$.

Тогда зависимость (22) примет вид:

$$\frac{h}{R_{г.н.}} = \left(\frac{4m_0}{\beta + m} \right)^{\frac{1}{2,5+y}} \left(I + \frac{m_0}{\beta + m} \right)^{\frac{0,5+y}{2,5+y}}, \quad (23)$$

или при $y = 0,2$

$$\frac{h}{R_{г.н.}} = 1,67 \left(\frac{m_0}{\beta + m} \right)^{0,37} \left(1 + \frac{m_0}{\beta + m} \right)^{0,26}. \quad (24)$$

Принимая в формуле (20) значение $h = b/\beta$ и аналогично решая совместно уравнения (20) и (21), получаем зависимость для определения отношения $b/R_{г.н.}$

$$\frac{b}{R_{г.н.}} = \beta \left(\frac{4m_0}{\beta + m} \right)^{\frac{1}{2,5+y}} \left(I + \frac{m_0}{\beta + m} \right)^{\frac{0,5+y}{2,5+y}} \quad (25)$$

или при $y = 0,2$

$$\frac{b}{R_{г.н.}} = 1,67\beta \left(\frac{m_0}{\beta + m} \right)^{0,37} \left(1 + \frac{m_0}{\beta + m} \right)^{0,26}. \quad (26)$$

Можно увидеть, что зависимости (25) и (26) можно легко получить непосредственно из (23) и (24):

$$\frac{h}{R_{г.н.}} = \frac{b/\beta}{R_{г.н.}}, \quad \text{откуда} \quad \frac{b}{R_{г.н.}} = \beta \frac{h}{R_{г.н.}}.$$

В приведенных выше зависимостях (23) и (25) гидравлический радиус наивыгоднейшего сечения $R_{г.н.}$ определяют по формуле:

$$R_{г.н.} = \left(\frac{K_0 n}{4m_0} \right)^{\frac{1}{2,5+y}}, \quad (27)$$

а в зависимостях (24) и (26) по формуле

$$R_{г.н.} = \left(\frac{K_0 n}{4m_0} \right)^{0,37}, \quad (28)$$

где m_0 – характеристика откоса, которая определяется по формуле (10);

K_0 – модуль расхода по формуле (7).

По зависимостям (24) и (26) построены графики $\beta = f(h/R_{г.н.})$ и $\beta = f(b/R_{г.н.})$ (рисунки 2 и 3). По этим графикам можно легко определить значение β при известном отношении $h/R_{г.н.}$ или $b/R_{г.н.}$, предварительно рассчитав гидравлический радиус наивыгоднейшего сечения по формуле (28).

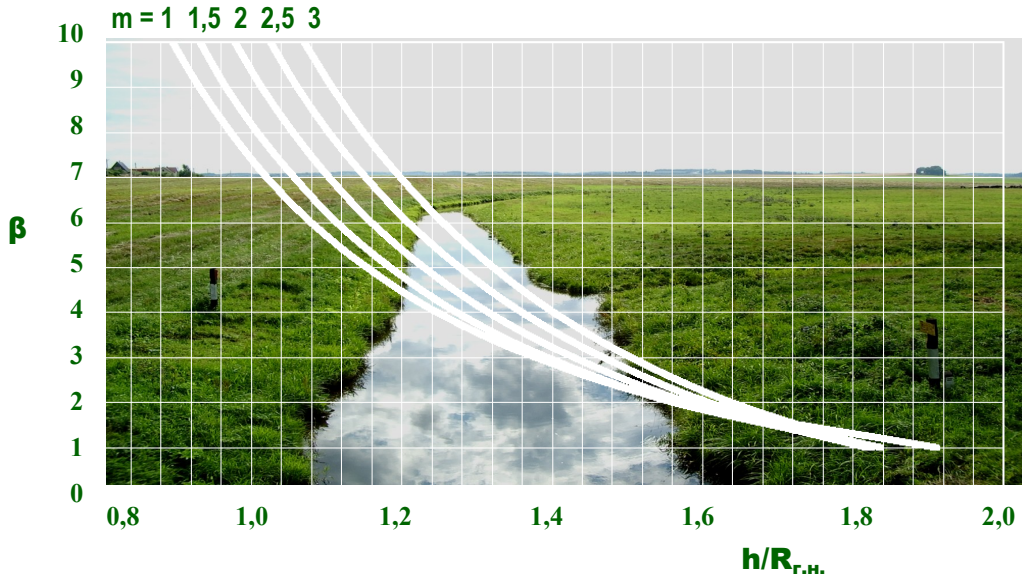


Рисунок 2 – График $\beta=f(h/R_{г.н.})$

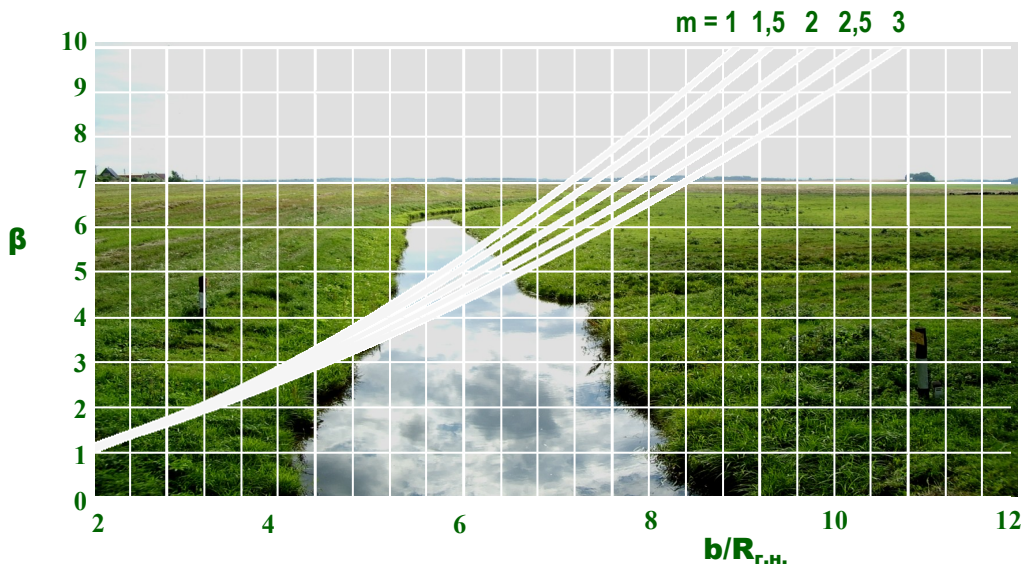


Рисунок 3 – График $\beta=f(b/R_{г.н.})$

Зная значение β ,

$$\left. \begin{array}{l} \text{при известной глубине } h \text{ ширина по дну } b = \beta h, \\ \text{при известной ширине } b \text{ глубина русла } h = b/\beta. \end{array} \right\} \quad (29)$$

В тех случаях, когда значение степени y в формуле Павловского (4) отличается от $y = 0,2$, например, для крупных каналов ($R > 3$ м), а также для межженных потоков в мелиоративных каналах, у которых коэффициент шероховатости на 5-10 % больше, чем для паводкового периода, приведенные графики могут дать некоторую погрешность. Поэтому нами разработан также аналитический способ гидравлического расчета каналов, при использовании которого параметры канала можно определять непосредственно по формулам (32) и (33) при любом значении степени y .

Для вывода расчетных формул (32) и (33) в качестве эталона принимается живое сечение с заданным параметром, но с наибольшей пропускной способностью в данных условиях (гидравлически наивыгоднейшее сечение). Для такого сечения гидравлический радиус $R_{г.н.}$ определяется по формуле (27). Заменим в этой формуле значение $4m_0$ безразмерным соотношением $\omega_{г.н.} / R_{г.н.}^{2,5+y}$ [1,2]. Тогда, после преобразований, получим уравнение

$$R_{г.н.} (b_{г.н.} \cdot h)^{\frac{1}{2,5+y}} = (K_0 n)^{\frac{1}{2,5+y}} \cdot R_{г.н.}^{\frac{2}{2,5+y}}, \quad (30)$$

$$\text{откуда } (b_{г.н.} + mh) = K_0 n / (h R_{г.н.}^{0,5+y}). \quad (31)$$

При назначенной глубине русла h из уравнения (31) получим ширину русла по дну $b_{г.н.}$:

$$b_{г.н.} = \frac{K_0 n}{h \cdot R_{г.н.}^{0,5+y}} - mh, \quad (32)$$

а при известной ширине русла по дну b – глубину $h_{г.н.}$:

$$h_{г.н.} = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4m_0 k_0 n / R_{г.н.}^{0,5+y}}}{2m}. \quad (33)$$

Поскольку в приведенных формулах принят в расчет гидравлический радиус наивыгоднейшего сечения, то производят корректировку значений гидравлического радиуса R по формуле (13), а ширины русла по дну b или глубины h путем умножения полученного по формулам (32) или (33) значения размера сечения на отношение $R_{г.н.}/R$, т.е

$$\left. \begin{aligned} b &= b_{г.н.} \cdot R_{г.н.} / R \\ h &= h_{г.н.} \cdot R_{г.н.} / R \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Определение допустимых скоростей течения воды в каналах

Для обеспечения устойчивости и надежной работы каналов необходимо принимать такое рас-

четное значение средней скорости потока v , при котором в канале не будет происходить ни размыва, ни заиления, т.е.

$$v_{нез} \leq v \leq v_{доп}, \quad (35)$$

где $v_{нез}$ – незаиляющая скорость;

$v_{доп}$ – допускаемая неразмывающая скорость.

За незаиляющую скорость принимается наименьшее значение средней скорости движения воды, при которой поток способен транспортировать без осаждения находящиеся в нем наносы.

Под допускаемой неразмывающей средней скоростью понимается наибольшее значение средней скорости движения воды, при которой поток не может вызвать недопустимого для нормальной эксплуатации размыва русла.

Для определения допускаемых на размыв скоростей рекомендуется использовать разработанные ранее автором [5, 6] формулы, которые учитывают все основные физические и физико-механические свойства грунта и позволяют отдельно оценивать устойчивость к размыву дна и откосов русла в различных характерных стадиях движения наносов.

Проверка незаиляемости канала осуществляется по транспортирующей способности потока или по незаиляющей средней скорости воды в русле. Незаиляющая скорость $v_{нез}$ соответствует состоянию, когда мутность потока S равна его транспортирующей способности, т.е. тому количеству взвешенных наносов, содержащихся в единице объема воды, которое поток способен транспортировать без их осаждения.

Существующие формулы для определения транспортирующей способности потока и, соответственно, незаиляющей скорости, дают результаты, резко различающиеся между собой, иногда в несколько раз [7,8]. Некоторые из них, в том числе приведенные в ТКП [9], не имеют физического смысла, т.к. являются функцией только гидравлического радиуса или расхода воды и не учитывают скорость течения воды в русле и концентрацию взвешенных наносов в потоке (мутность воды). Даже для абсолютно чистой воды такие формулы дают те же результаты, что и при большой мутности потока. Бессмысленной является формула (К.3) в ТКП [9] для определения гидравлической крупности наносов, где единственным параметром, якобы влияющим на скорость падения частицы, является гидравлический

радиус. В действительности основной характеристикой, определяющей эту скорость, является ее диаметр и, соответственно, масса.[7].

Ранее в работе [8] нами был дан анализ транспортирующей способности потока на основе большого экспериментального материала собственных исследований и данных, полученных другими авторами. Показана связь между критерием насыщения потока наносами v^3/gRu , предложенным М.А. Великановым, и транспортирующей способностью потока. Однако приведенная в этой работе методика расчета наносов не получила практического применения из-за ее трудоемкости и необходимости определения ряда параметров по графикам. Принимая за основу установленную взаимосвязь между критерием М.А. Великанова и транспортирующей способностью потока и аппроксимируя графики осредненными значениями параметров, автором получена удобная для практического применения формула для определения транспортирующей способности потока S , кг/м³.

$$S = \frac{v^3 (\rho_s - \rho_w) \cdot 10^{-3}}{\alpha \eta R g u} \quad (36)$$

Соответственно, величину незаиляющей скорости $v_{нез.}$, м/с, при которой не будет происходить осаждение взвешенных наносов, рекомендуется определять по формуле

$$v_{нез.} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \eta S R g u}{(\rho_s - \rho_w) \cdot 10^{-3}}}, \quad (37)$$

где S – средневзвешенная мутность потока, кг/м³;
 η – коэффициент неоднородности взвешенных наносов $\eta = d_{90}/d_{50}$ (d_{90} – диаметр частиц крупной

фракции, которых содержится в составе наносов менее 90 % по массе, м: d_{50} – средний диаметр частиц наносов, м);

R – гидравлический радиус живого сечения, м;

u – гидравлическая крупность частиц средневзвешенного диаметра, м/с;

ρ_s, ρ_w – плотность соответственно частиц наносов и воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

α – коэффициент, зависящий от характера осаждения наносов, принимается $\alpha=4,0$ при $d=0,1-2,5$ мм; $\alpha=4,5$ при $d>2,5$ мм и $\alpha=3,5$ при $d<0,1$ мм.

Если окажется, что $v < v_{нез.}$, то будет происходить осаждение наносов и заиливание русла. Практически можно допустить превышение на 10 % незаиляющей скорости над средней скоростью потока, и, незначительное осаждение крупной фракции ($>d_{90}$). Если $v < 1,1 v_{нез.}$, то предусматривают увеличение уклона дна и соответственно средней скорости.

Выводы

Разработанные аналитический и графоаналитический способы гидравлического расчета каналов позволяют непосредственно по формулам или графикам определять размеры поперечного сечения русла и, тем самым, избежать трудоемкого процесса расчета каналов путем подбора.

Предложенные формулы для определения транспортирующей способности потока и незаиляющей скорости учитывают необходимые гидравлические параметры и основные характеристики наносов. Формулы проверены на большом экспериментальном материале и могут быть рекомендованы к практическому применению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агроскин, А.А. Гидравлика / А.А. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М.: Госэнергоиздат, 1954. – 484 с.
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник / Д.В. Штеренлихт; ред. Н.М.Щербакова. – М.: Колос С, 2007. – 655 с.
3. Нестеров, М.В. Гидротехнические сооружения / М.В.Нестеров. – Минск, М.: Новое знание, Инфа-М. – 2015. – 608 с.
4. Гульков, Н.Ф. Расчет экономически наивыгоднейшего живого сечения трапецеидального канала / Н.Ф. Гульков // НТИ по мелиорации и водному хозяйству. Минводхоз БССР. – 1991. – №5. – С.21-27.
5. Михневич, Э.И. Устойчивость русел открытых водотоков / Э.И.Михневич. – Мн.: Урожай, 1988. – 240 с.
6. Михневич, Э.И. Определение допускаемых скоростей течения воды в каналах / Э.И.Михневич // Гидротехническое строительство. – 1989. – №1. – С.14-18.
7. Караушев, А.В. Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 288 с.
8. Михневич, Э.И. Расчет взвешенных наносов в реках и каналах / Э.И.Михневич, Ф.В. Саплюков // Гидротехническое строительство. – 1987. – №1. – С.30-34.
9. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-8-2005 (02250). Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования. – Минск, 2006. – 106 с.

Поступила 1.08.2016 г.