

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-208-215>

УДК 626.3:627.86

Оптимизация параметров магистральных каналов в области гидравлически наивыгоднейших сечений

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Михневич¹⁾, асп. Ли Цзэмин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Магистральные каналы мелиоративных систем, наряду с наилучшими экономическими показателями, должны также соответствовать требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и технологии производства работ по сооружению русла. Каналы гидравлически наивыгоднейшего профиля, хотя и являются самыми экономичными по объему земляной выемки, часто получаются слишком глубокими и небольшой ширины по дну, что не удовлетворяет указанным требованиям. Учесть все эти факторы можно, незначительно снижая скорость течения воды v (по сравнению со скоростью в русле с гидравлически наивыгоднейшим сечением $v_{г.н.}$), что приводит к существенному уменьшению глубины русла и соответственно увеличению его ширины по дну. Такое снижение скорости экономически оправдано (без существенного увеличения площади сечения) в области гидравлически наивыгоднейших сечений, где кривая функции $h = f(v)$ резко возрастает и асимптотически приближается к ординате с максимально возможной скоростью $v_{г.н.}$. Эту область можно приближенно охарактеризовать значениями скорости $v = (0,95-1,0)v_{г.н.}$. Для удобства расчета полученная ранее автором формула для глубины канала гидравлически наивыгоднейшего профиля преобразована к более простому виду. Предложена аналитическая методика расчета оптимальных параметров сечения русла, находящихся в области гидравлически наивыгоднейших сечений, которая характеризуется коэффициентом оптимизации $K_{опт} = v/v_{г.н.}$, изменяющимся в пределах $K_{опт} = 0,95-1,0$. В этой области сечение русла незначительно отличается от гидравлически наивыгоднейшего профиля и при этом удовлетворяет требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и условиям производства работ. Предложенный метод расчета менее трудоемкий и применим в широком диапазоне изменения показателя степени γ в формуле Н. Н. Павловского для определения коэффициента Шези. Расчет по предлагаемой методике выполняют на основе использования зависимостей для определения характеристик гидравлически наивыгоднейшего сечения и формул русловой гидравлики (при незначительном поэтапном снижении скорости течения воды v). Получены формулы для определения глубины и ширины русла по дну при различных значениях скорости.

Ключевые слова: магистральные каналы, оптимальные параметры, гидравлически наивыгоднейшие сечения, методика расчета

Для цитирования: Михневич, Э. И. Оптимизация параметров магистральных каналов в области гидравлически наивыгоднейших сечений / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 208–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-208-215>

Optimization of Main Canal Parameters in the Area of Hydraulically Most Advantageous Sections

E. I. Mikhnevich¹⁾, Li Zeming¹⁾

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

Abstract. The main canals of reclamation systems, along with the best economic performance, must also meet the requirements for connecting the conductive network in the vertical plane and the technology for the construction of the channel.

Адрес для переписки

Михневич Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

Address for correspondence

Mikhnevich Eduard I.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

Although the channels of the hydraulically most advantageous profile are the most economical in terms of excavation volume, often turn out to be too deep and of small width along the bottom, which does not meet the specified requirements. All these factors can be taken into account by slightly reducing the water flow velocity v (compared to the velocity in the channel with the most hydraulically advantageous cross section $v_{h.a.}$), which leads to a significant decrease in the channel depth and, accordingly, an increase in the width of the channel along the bottom. Such a decrease in velocity is economically justified (without a significant increase in the cross-sectional area) in the region of the most hydraulically advantageous sections, where the curve of the function $h = f(v)$ sharply increases and asymptotically approaches the ordinate with the maximum possible velocity $v_{h.a.}$. This area can be approximately characterized by the values of the velocity $v = (0.95-1.0)v_{h.a.}$. For the convenience of calculation, the formula obtained earlier by the author for the channel depth of the hydraulically most advantageous profile has been converted to a simpler form. An analytical method is proposed for calculating the optimal parameters of the channel section, located in the area of the most hydraulically advantageous sections, which is characterized by the optimization coefficient $K_{opt} = v/v_{h.a.}$, varying within $K_{opt} = 0.95-1.0$. In this area, the cross section of the channel differs slightly from the most hydraulically advantageous profile, and, at the same time, satisfies the requirements for conjugation of the conductive network in the vertical plane and the conditions of work. The proposed calculation method is less laborious and is applicable in a wide range of changes pertaining to exponent γ in the formula of N. N. Pavlovsky to determine the Chezy's coefficient. The calculation according to the proposed method is performed based on the use of dependencies to determine the characteristics of the most hydraulically advantageous section and the formulas of channel hydraulics (with a slight gradual decrease in the water flow rate v). Formulas are obtained for determining the depth and width of the channel along the bottom at various values of velocity.

Keywords: main channels, optimal parameters, hydraulically advantageous sections, calculation method

For citation: Mikhnevich E. I., Li Zeming (2023) Optimization of Main Canal Parameters in the Area of Hydraulically Most Advantageous Sections. *Science and Technique*. 22 (3), 208–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-208-215> (in Russian)

Введение

Магистральные каналы являются важнейшими элементами мелиоративных систем и предназначены обеспечивать гарантированную подачу воды на орошение и отведение воды с осушаемых земель в реку-водоприемник. На осушительных системах магистральные каналы, принимающие воду с открытых коллекторов, обычно имеют глубину: $h = 2-2,5$ м – на малых и средних системах и $h = 2,5-3,0$ м – на крупных с площадью мелиорированных земель 4–5 тыс. га и более. Более глубокие каналы могут привести к значительному понижению уровня грунтовых вод и ухудшить водный режим мелиорируемых земель. Кроме того, глубокие магистральные каналы не обеспечат в меженный период требуемое сопряжение «уровень в уровень» с впадающими каналами [1].

Глубина магистральных каналов, подающих воду на орошение, определяется в основном расчетным расходом воды и может достигать на крупных ирригационных системах Китая 4–5 м и более [2]. Однако слишком глубокие магистральные каналы не могут в полной мере обеспечить подачу воды в необходимом объеме в каналы второго порядка и оросители, так как уровень воды в глубоком магистральном кана-

ле в период межени может опускаться ниже дна менее глубоких водоотводящих каналов.

Наиболее экономичными по объемам земляной выемки и соответственно по строительным затратам являются каналы гидравлически наивыгоднейшего сечения. В то же время они часто слишком глубокие и узкие, что не всегда удобно при производстве работ и может не соответствовать требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости. Поэтому имеет большое практическое значение разработка методики расчета оптимальных параметров канала, близких к гидравлически наивыгоднейшему сечению, но менее глубоких и достаточно широких, чтобы быть вполне приемлемыми для производства работ по их сооружению и удовлетворять требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости.

Цель исследования – разработка удобной в практическом применении аналитической методики расчета оптимальных параметров канала, находящихся в области гидравлически наивыгоднейших сечений и удовлетворяющих требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и условиям производства работ, применимой в широком диапазоне изменения показателя степени γ в формуле

Н. Н. Павловского для определения коэффициента Шези и обеспечивающей пропуск заданного расчетного расхода.

Методика расчета оптимальных параметров магистральных каналов

Проектируемый канал имеет наилучшие экономические показатели с поперечным сечением русла гидравлически наивыгоднейшего профиля, который характеризуется максимально возможной средней скоростью v , а следовательно, минимальной площадью живого сечения ω [3–5]. Для трапецеидального сечения, наиболее распространенного в водохозяйственном строительстве, такой профиль характеризуется соотношением $\beta_{г.н}$ между шириной русла по дну b и глубиной h [4, 5]

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

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

На основе совместного решения уравнения неразрывности потока, выражения для определения площади трапецеидального сечения русла и соотношения (1) между его шириной по дну и глубиной автором [5, 6] получена формула для определения глубины канала гидравлически наивыгоднейшего профиля

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

где Q – максимальный расчетный расход воды, m^3/c ; n – коэффициент шероховатости русла; m – то же заложения откосов; i – уклон дна канала; y – показатель степени в формуле Н. Н. Павловского для определения скоростного коэффициента (коэффициента Шези) C , $m^{0,5}/c$:

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

R – гидравлический радиус, м, равный

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (4)$$

ω – площадь живого сечения потока, m^2 ; χ – смоченный периметр, м.

Значение показателя степени y с достаточной степенью точности может быть определено по упрощенным формулам Н. Н. Павловского [5, 7]:

$$\left. \begin{aligned} y &= 1,5\sqrt{n} \text{ при } R < 1 \text{ м;} \\ y &= 1,3\sqrt{n} \text{ при } R > 1 \text{ м.} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для земляных русел с гидравлическим радиусом $R = 0,5–3$ м значение показателя степени может быть принято приближенно $y = 0,2$ [3, 5].

Площадь живого сечения ω и смоченный периметр χ определяют соответственно по формулам:

$$\omega = (b + mh) h; \quad (6)$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2}. \quad (7)$$

Для удобства расчетов приведем формулу (2) к более простому виду. Выражение $(\beta_{г.н} + m)$ в (2) численно равно характеристике откоса m_0 , которая определяется по выражению

$$m_0 = 2\sqrt{1+m^2} - m. \quad (8)$$

Заменяя в формуле (2) выражение $(\beta_{г.н} + m)$ на m_0 по (8) и учитывая, что $2 \cdot (0,5)^{\frac{0,5+y}{2,5+y}} = (4)^{\frac{1}{2,5+y}}$, эту формулу можно представить в более простом виде

$$h = 2 \left(\frac{Qn}{4m_0 \sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2,5+y}}. \quad (9)$$

Запроектировать параметры сечения канала, которые незначительно отличались бы от гидравлически наивыгоднейшего профиля и при этом соответствовали требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и технологии производства работ по сооружению русла, можно, незначительно снижая скорость течения воды v (по сравнению со скоростью в русле с гидравлически наивыгоднейшим сечением $v_{г.н}$). Это приводит к существенному уменьшению глубины русла и соответственно увеличению его ширины по дну. Такое сниже-

ние скорости экономически оправдано (без существенного увеличения площади сечения) в области гидравлически наивыгоднейших сечений, где кривая функции $h = f(v)$ резко возрастает и асимптотически приближается к ординате с максимально возможной скоростью $v_{г.н}$ (рис. 1). Эту область можно приближенно охарактеризовать значениями скорости $v = (0,95-1,0)v_{г.н}$.

О значительном уменьшении глубины русла при небольшом снижении скорости v по отношению к $v_{г.н}$ писали А. А. Угинчус [8], Д. В. Штеренлихт [4], которые считали возможным уменьшать отношение $v/v_{г.н}$ и соответственно увеличивать $\omega/\omega_{г.н}$ на 1–5 %. При таких малых отклонениях ω от $\omega_{г.н}$ отношения b/h при удалении от гидравлически наивыгоднейшего профиля резко возрастают, ширина канала увеличивается, что создает благоприятные условия для производства работ.

Вопросу оптимизации магистральных каналов уделил внимание М. А. Михалев [9], который в качестве параметра оптимизации принял уклон дна русла и рассмотрел различное соотношение выемки канала и объема воды в нем. Такая постановка задачи имеет научный интерес, но не сможет найти практическое применение. Уклон, как правило, определяется топографической характеристикой местности, длиной канала в общей схеме проводящей сети и условиями ее сопряжения. Объем выемки канала практически равен объему воды в период пропуска максимального расчетного расхода и лишь незначительно (на величину строительного запаса) отличается от объема воды в русле.

Н. Ф. Гульков [10] предложил графоаналитический метод расчета экономически наивыгоднейшего живого сечения трапецидального канала путем построения графиков функциональных зависимостей $v = f_1(h)$ и $b = f_2(h)$ для профиля канала в диапазоне скоростей от незаияющей до скорости в русле гидравлически наивыгоднейшего сечения и затем выбора приемлемой скорости и соответствующих ей параметров канала с учетом технических и производственных требований. Недостатком этого метода является большая трудоемкость: необходимость предварительного выполнения

большого объема гидравлических расчетов и составления таблиц для построения графиков указанных функций. Следует также иметь в виду, что этот метод предложен только для одного значения показателя степени $y = 0,2$ в формуле (3) Н. Н. Павловского.

Нами предложена более удобная и применимая в широком диапазоне изменения показателя степени y аналитическая методика расчета оптимальных параметров канала, находящихся в области гидравлически наивыгоднейших сечений и удовлетворяющих требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости и условиям производства работ. Расчет выполняют по предлагаемой методике в следующем порядке:

1. Рассчитывают гидравлически наивыгоднейший радиус $R_{г.н}$ по формуле (вытекает из (9)), так как $R_{г.н} = 0,5h_{г.н}$:

$$R_{г.н} = \left(\frac{Qn}{4m_0\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{2,5+y}}. \quad (10)$$

2. Определяют площадь гидравлически наивыгоднейшего сечения $\omega_{г.н}$ по формуле [3, 4]

$$\omega_{г.н} = 4m_0R_{г.н}^2. \quad (11)$$

3. Находят среднюю скорость потока $v_{г.н}$, которая является максимально возможной при заданных уклоне i и коэффициенте шероховатости n :

$$v_{г.н} = \frac{Q}{\omega_{г.н}}. \quad (12)$$

4. Задаются скоростью v , меньшей максимально возможной $v_{г.н}$:

$$v = K_{опт}v_{г.н}, \quad (13)$$

где $K_{опт}$ – коэффициент оптимизации параметров поперечного сечения канала, который рекомендуется назначать в пределах $K_{опт} = 0,95-1,0$.

5. Принимают на первом этапе расчета скорость в русле v на 1 % меньше $v_{г.н}$, т. е. $v = 0,99v_{г.н}$, определяют гидравлический радиус поперечного сечения канала при этой скорости по формуле

$$R = \left(\frac{\omega n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{0,5+y}}. \quad (14)$$

6. Вычисляют площадь живого сечения ω и смоченный периметр χ соответственно по формулам:

$$\omega = \frac{Q}{v}; \quad (15)$$

$$\chi = \frac{\omega}{R}. \quad (16)$$

7. Определяют глубину русла, для этого решают систему уравнений (6) и (7), откуда получают квадратное уравнение относительно неизвестного h :

$$\left(2\sqrt{1+m^2} - m \right) h^2 - \chi h + \omega = 0, \quad (17)$$

из которого находят значение глубины русла

$$h = \frac{\chi - \sqrt{\chi^2 - 4m_0\omega}}{2m_0}, \quad (18)$$

где m_0 – характеристика откоса, определяемая по формуле (8).

8. Находят ширину русла по дну b из уравнения (6) по выражению

$$b = \frac{\omega}{h} - mh. \quad (19)$$

Если найденные на первом этапе расчета значения глубины h и ширины русла по дну b не полностью соответствуют требованиям сопряжения проводящей сети и условиям производства работ, то расчет повторяют, уменьшая коэффициент оптимизации $K_{\text{опт}}$ и соответственно скорость v до тех значений, при которых получают приемлемые величины глубины h и ширины b .

Принимать коэффициент $K_{\text{опт}} < 0,95$ не рекомендуется, так как в этом случае параметры канала не будут находиться в области гидравлически наивыгоднейших сечений и экономические затраты на строительство канала значительно возрастут.

По предлагаемой методике в качестве примера рассчитан канал при исходных данных,

приведенных в табл. 1. По результатам расчета (табл. 2) построен график $h = f(v)$ (рис. 1), из которого видно, что незначительное снижение скорости v по сравнению с $v_{\text{г.н}}$ позволяет существенно уменьшить глубину канала h . Из графика прослеживается область гидравлически наивыгоднейших сечений примерно в диапазоне $v = (0,95 - 1,0)v_{\text{г.н}}$ (на рис. 1 эта область выделена штриховыми линиями).

Таблица 1

Исходные данные для расчета параметров канала
Initial data for calculating channel parameters

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	n	y	m	m_0	i
20	0,024	0,2014	2	2,472	0,0002

Таблица 2

Результаты расчета параметров канала при различных скоростях течения воды
Channel parameter calculation results at different water flow rates

$K_{\text{опт}}$	$v, \text{ м/с}$	$R, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$b, \text{ м}$
1,00	0,812	1,579	24,641	15,609	3,157	1,490
0,99	0,804	1,556	24,890	15,994	2,605	4,344
0,98	0,795	1,534	25,144	16,393	2,409	5,621
0,97	0,787	1,512	25,403	16,806	2,268	6,661
0,96	0,779	1,489	25,668	17,234	2,156	7,591
0,95	0,771	1,467	25,938	17,677	2,062	8,457
0,92	0,747	1,402	26,784	19,108	1,839	10,882
0,90	0,730	1,358	27,379	20,155	1,722	12,453
0,85	0,690	1,252	28,989	23,152	1,489	16,494
0,80	0,649	1,148	30,801	26,820	1,306	20,981
0,70	0,568	0,949	35,201	37,079	1,019	32,524
0,60	0,487	0,762	41,068	53,892	0,791	50,356

Из табл. 2 видно, что снижение скорости потока только на 1 % ($K_{\text{опт}} = 0,99$) до значения $v = 0,804$ м/с позволило уменьшить глубину русла на 17,5 % до величины $h = 2,6$ м, что при заданном расходе $Q = 20$ м³/с может быть приемлемым для сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости. При этом ширина русла по дну $b = 4,34$ м вполне удобна при производстве работ по сооружению канала.

Если глубина реки h не ограничивается какими-либо условиями, а ширину русла по дну b необходимо увеличить (по сравнению с $b_{г.н}$) для удобства производства работ по сооружению канала, то, уменьшая скорость до значения $v \leq 0,98v_{г.н}$, можно получить формулу для определения ширины по дну b . Для этого выражение (6) для определения площади живого сечения представим в виде квадратного уравнения относительно неизвестного h

$$mh^2 + bh - \omega = 0, \quad (20)$$

откуда

$$h = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4m\omega}}{2m}. \quad (21)$$

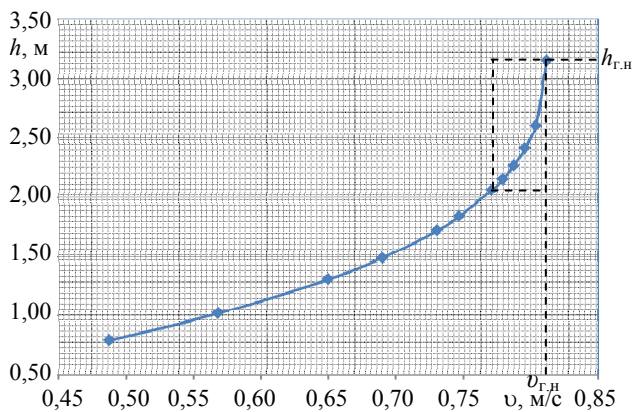


Рис. 1. График зависимости $h = f(v)$

Fig. 1. Dependency graph $h = f(v)$

Из формулы (7) для определения смоченного периметра выразим значение h

$$h = \frac{\chi - b}{2\sqrt{1 + m^2}}. \quad (22)$$

Приравняем уравнения (21) и (22)

$$\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4m\omega}}{2m} = \frac{\chi - b}{2\sqrt{1 + m^2}}. \quad (23)$$

Из равенства (23) получим квадратное уравнение относительно неизвестного b

$$4(m_1^2 - m_2^2)b^2 - 8mm_2\chi b + 4m(4m_1^2\omega - m\chi) = 0, \quad (24)$$

где $m_1 = \sqrt{1 + m^2}$; $m_2 = m_1 - m$.

Решая уравнение (24) относительно b , получим формулу для определения значения ширины русла по дну

$$b = \frac{8mm_2\chi + \sqrt{(8mm_2\chi)^2 - 64m(m_1^2 - m_2^2) \times (4m_1^2\omega - m\chi)}}{8(m_1^2 - m_2^2)} \rightarrow \frac{(4m_1^2\omega - m\chi)}{8(m_1^2 - m_2^2)}. \quad (25)$$

В отличие от характера функции $h = f(v)$, где глубина канала h существенно уменьшается при снижении скорости v , ширина русла по дну b значительно возрастает с уменьшением скорости, что видно из графика функции $b = f(v)$ (рис. 2) (область гидравлически наивыгоднейших сечений выделена штриховыми линиями).

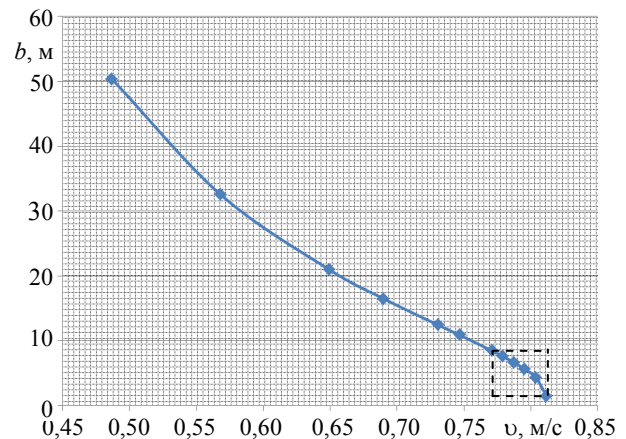


Рис. 2. График зависимости $b = f(v)$

Fig. 2. Dependency graph $b = f(v)$

Для обеспечения устойчивости русла канала окончательно принятое значение скорости v в области гидравлически наивыгоднейших сечений необходимо сравнить с допускаемой неразрывающей скоростью $v_{доп}$, которую рекомендуется определять по разработанным ранее формулам автора [5, 6]. В приведенном выше примере при $Q = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 1) назначают допускаемую скорость, соответствующую стадии начала грядобразования [5, 6]. Если окажется, что $v > v_{доп}$, то потребуется крепление русла от размыва. При соответствующем технико-экономическом обосновании принимают

значение $v = v_{\text{доп}}$, и в этом случае крепление не требуется.

Расчет параметров русла при назначенной скорости $v = v_{\text{доп}}$ производят при заданной (соответствующей требованиям сопряжения проводящей сети в вертикальной плоскости) глубине h в следующем порядке. Вначале определяют площадь живого сечения $\omega = Q/v_{\text{доп}}$. Затем рассчитывают ширину русла по дну b по формуле (19), смоченный периметр – по (7) и гидравлический радиус – по (4). В качестве проверки определяют скорость v по формуле Шези

$$v = C\sqrt{Ri}, \quad (26)$$

где коэффициент Шези C определяют по формуле (3).

Если скорость по (26) $v = v_{\text{доп}}$, то расчет выполнен правильно.

Необходимо также, чтобы скорость в русле была не менее допускаемой по условию заиления $v_{\text{нез}}$, т.е. $v > v_{\text{нез}}$. Величину незаиляющей скорости $v_{\text{нез}}$, м/с, при которой не будет происходить осаждение взвешенных наносов, рекомендуется определять по формуле автора [5, 6]

$$v_{\text{нез}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha\eta SRgu}{(\rho_s - \rho_v) \cdot 10^{-3}}}, \quad (27)$$

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_v – плотность соответственно частиц наносов и воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – коэффициент, зависящий от характера осаждения наносов, принимается:

$$\alpha = 4,0 \text{ при } d = 0,1-2,5 \text{ мм; } \alpha = 4,5 \text{ при } d > 2,5 \text{ мм}$$

$$\text{и } \alpha = 3,5 \text{ при } d < 0,1 \text{ мм.}$$

Если окажется, что скорость потока $v > v_{\text{нез}}$, то будет происходить осаждение наносов и заиление русла. Практически можно допустить

превышение на 10 % незаиляющей скорости над средней скоростью потока и незначительное осаждение крупной фракции ($>d_{90}$). Если $v < 1,1v_{\text{нез}}$, то предусматривают увеличение уклона дна и соответственно средней скорости.

Принципиально иной подход к назначению параметров судоходных каналов, для которых определяющими и по глубине, и по ширине русла являются габариты судов, курсирующих по таким водотокам [11, 12].

По приведенной выше методике может быть дана оценка оптимальности параметров эксплуатируемых каналов. Для этого по формулам (10)–(12) рассчитывают значения $R_{г.н.}$, $\omega_{г.н.}$, $v_{г.н.}$. Затем определяют коэффициент оптимизации $K_{\text{опт}} = v/v_{г.н.}$. Если значение коэффициента $K_{\text{опт}}$ находится в пределах 0,95–1,0, то можно полагать, что параметры канала находятся в области гидравлически наиболее выгодных сечений. Соответственно, чем меньше значения коэффициента $K_{\text{опт}}$, тем больше отклоняются параметры канала от гидравлически наиболее выгодного профиля.

ВЫВОДЫ

1. На основе совместного решения уравнений русловой гидравлики и формул для расчета характеристик трапецеидального сечения русла получена простая формула (9) для определения глубины канала гидравлически наиболее выгодного профиля.

2. Построен график функции $h = f(v)$ и выделена область гидравлически наиболее выгодных сечений, которая характеризуется коэффициентом оптимизации $K_{\text{опт}} = v/v_{г.н.}$, изменяющимся в пределах $K_{\text{опт}} = 0,95-1,0$.

3. Получены формулы для определения глубины и ширины русла по дну в области гидравлически наиболее выгодных сечений. Предложенная аналитическая методика расчета параметров каналов в этой области позволяет непосредственно по формулам определять размеры поперечного сечения русла и тем самым избежать трудоемкого процесса расчета каналов путем подбора. Эта методика может быть также использована для оценки степени оптимальности параметров эксплуатируемых магистральных каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования: ТКП 45-3.04-8–2005 (02250) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2006. 106 с.
2. Михневич, Э. И. Пропускная способность главного магистрального канала, подающего воду из р. Хуанхэ на ирригационную систему Хэтао / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // Тридцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Рязань, 3–7 октября 2022 г.): докл. и сообщения. М.: МГУ, 2022. С. 128–130.
3. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, И. И. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. 4-е изд. М.–Л.: Энергия, 1964. 352 с.
4. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт; ред. Н. М. Щербакова. М.: Колос С, 2007. 655 с.
5. Михневич, Э. И. Открытые водотоки: пропускная способность и устойчивость / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 311 с.
6. Михневич, Э. И. Расчет пропускной способности и устойчивости каналов / Э. И. Михневич // Экология и строительство. 2020. № 1. С. 23–31.
7. Спицин, И. П. Общая и речная гидравлика / И. П. Спицин, В. А. Соколова. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 360 с.
8. Угинчус, А. А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов. / А. А. Угинчус. М.: Изд-во лит. по строительству, 1965. 274 с.
9. Михалев, М. А. Расчет магистральных каналов / М. А. Михалев // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 4. С. 83–93.
10. Гульков, Н. Ф. Расчет экономически наивыгоднейшего живого сечения трапециoidalного канала / Н. Ф. Гульков // НТИ по мелиорации и водному хозяйству / Минводхоз БССР. Минск, 1991. Вып. 5. С. 21–27.
11. Михневич, Э. И. Устойчивость русел и регулирование стока судоходных рек и каналов / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич. Минск: Право и экономика, 2022. 188 с.
12. Гладков, Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 432 с.

Поступила 11.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. ТКП [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-8–2005 (02250) *Ameliorative Systems and Structures. Design Standards*. Minsk, 2006, 106 (in Russian).
2. Mikhnevich E. I., Li Zé Ming (2022) Capacity of the Main Canal That Supplies Water from Huág hé River to Hetao Irrigation Systemo. *Tridsat' Sed'moe Plenarnoe Mezhu-zovskoe Koordina-Tsionnoe Soveshchanie po Probleme Eroziionnykh, Ruslovykh i Ust'evykh Protsessov (g. Ryzan', 3–7 Oktyabrya 2022 g.): Doklady i Soobshcheniya* [37th Plenary Interuniversity Coordination Meeting on the Problem of Erosion, Channel and Estuary Processes (Ryazan, October 3 – 7, 2022): Reports and Messages]. Moscow, Moscow State University, 128–130 (in Russian).
3. Agroskin I. I., Dmitriev I. I., Pikalov F. I. (1964) *Hydraulics*. 4th ed. Moscow – Leningrad, Energiya Publ, 352 (in Russian).
4. Shterenlikht D. V. (2007) *Hydraulics*. Moscow, Kolos S Publ, 655 (in Russian).
5. Mikhnevich E. I. (2021) *Open Watercourses: Carrying Capacity and Sustainability*. Minsk, Belarusian National Technical University, 311 (in Russian).
6. Mikhnevich E. I. (2020) Calculation of Throughput and Stability of Channels. *Ekologiya i Stroitelstvo*, (1), 23–31 (in Russian).
7. Spitsin I. P., Sokolova V. A. (1990) *General and River Hydraulics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ, 360 (in Russian).
8. Uginchus A. A. (1965) *Hydraulic and Technical and Economic Calculations of Channels*. Moscow, Publishing House of Literature on Construction, 274 (in Russian).
9. Mikhalyov M. A. (2013) Calculation of Main Channels. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, (4), 83–93 (in Russian).
10. Gulkov N. F. (1991) Calculation of the Most Economically Advantageous Living Section of a Trapezoidal Channel. *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya po Melioratsii i Vodnomu Khozyaistvu* [Scientific and Technical Institute of Land Reclamation and Water Management]. Minsk, Ministry of Water Resources of Belarussian Soviet Socialist Republic, (5), 21–27 (in Russian).
11. Mikhnevich E. I., Levkevich V. E. (2022) *Stability of Channels and Regulation of the Flow of Navigable Rivers and Canals*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ, 188 (in Russian).
12. Gladkov G. L., Chalov R. S., Berkovich K. M. (2019) *Hydromorphology of the Chan of Navigable Rivers*. 2nd ed. Saint-Peterburg, Lan Publ, 432 (in Russian).

Received: 11.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.05.2023