

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626.882

**О коэффициенте шероховатости и параметре Шези
для гидравлического расчета рыбоходно-нерестовых каналов**

Виктор Николаевич Шкура¹, Алексей Викторович Шевченко²

^{1,2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

²rigge1111@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4839-6377>

Аннотация. Цель: установление зависимостей для определения коэффициента шероховатости и скоростного параметра Шези, рекомендуемых к использованию при гидравлическом расчете рыбоходно-нерестовых каналов. **Материалы и методы.** Эмпирическую основу работы составили материалы выполненного на физической (гидравлической) модели исследования гидрометрических характеристик потока, протекающего по руслам рыбоходно-нерестовых каналов. При проведении исследования применялись известные методики измерения гидрометрических параметров на моделях гидросооружений. **Результаты.** Исследования выполнены на гидравлической модели участка канала, представляющей собой прямолинейный лоток трапециевидного поперечного сечения рабочей длиной 6,0 м, шириной 1,2 м по дну и глубиной 0,3 м с заложением откосов 1:2,5. Масштабируемые параметры водного потока на модели соответствуют их значениям для рыбоходно-нерестовых каналов, устраиваемых в составе речных низконапорных гидроузлов. Русло модели канала предусматривало возможность изменения шероховатости его покрытия и установки элементов усиленной шероховатости кубовидной формы, размещаемых по дну канала в шахматном порядке. Соотношение геометрических параметров потока (ширины и глубины), размеров выступов шероховатости покрытия откосов и дна, элементов усиленной шероховатости, его гидрометрических характеристик соответствует диапазонам, рекомендуемым для рыбоходно-нерестовых каналов. Показано, что специфичность конструктивных решений трактов каналов и параметров протекающих по их руслам потоков не позволяет использовать известные рекомендации по определению коэффициентов шероховатости и параметров Шези, это предопределило необходимость установления новых, соответствующих условиям течения расчетных зависимостей. **Вывод.** Установлены расчетные зависимости для определения коэффициента шероховатости и параметра Шези, соответствующие условиям устройства и функционирования рыбоходно-нерестовых каналов, устраиваемых элементами усиленной шероховатости.

Ключевые слова: рыбоходно-нерестовые каналы, гидравлический расчет каналов, коэффициенты шероховатости русел, параметр Шези, гидрометрия каналов

Для цитирования: Шкура В. Н., Шевченко А. В. О коэффициенте шероховатости и параметре Шези для гидравлического расчета рыбоходно-нерестовых каналов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 92, № 1. С. 226–245.



HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**On roughness coefficient and Chezy parameter
for hydraulic calculation of fish passage and spawning channels**

Viktor N. Shkura¹, Alexey V. Shevchenko²

^{1,2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

²rigge1111@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4839-6377>

Abstract. Purpose: to determine dependencies for defining the roughness coefficient and the Chezy velocity parameter, recommended for using in the hydraulic calculation of fish passage and spawning channels. **Materials and methods.** The empirical basis of study was the materials of a study on the physical hydrometric model of flow characteristics flowing along the fish passage and spawning channels beds. When conducting the study, well-known methods for measuring hydrometric parameters on hydraulic structures models were used. **Results.** The studies were carried out on a hydraulic model of the canal section, which is a rectilinear tray of trapezoidal cross-section with a working length of 6.0 m, a width of 1.2 m along the bottom and a depth of 0.3 m with a slope ratio of 1:2.5. The scaled parameters of the water flow in the model correspond to their values for fish passage and spawning channels installed as a part of river low-pressure hydraulic structures. The bed of the channel model provided for the possibility of changing the roughness of its covering and installing cuboid-shaped elements of enhanced roughness, placed along the channel bottom in a checkerboard pattern. The ratio of the flow geometric parameters (width and depth), the size of the roughness protrusions of the covering of the slopes and the bottom, elements of enhanced roughness, and its hydrometric characteristics correspond to the ranges recommended for fish passage and spawning channels. It is shown that the specificity of the design solutions of channel tracts and the parameters of the flows flowing along their beds does not allow the use of the known recommendations for determining roughness coefficients and Chezy parameters; this predetermined the need to establish new design dependencies corresponding to the flow design dependences. **Conclusion.** Calculation dependencies for determining the roughness coefficient and the Chezy parameter, corresponding to the conditions of design and operation of fish passage and spawning channels equipped with elements of enhanced roughness have been established.

Keywords: fish passage and spawning channels, hydraulic calculation of channels, channel roughness coefficients, Chezy parameter, channel hydrometry

For citation: Shkura V. N., Shevchenko A. V. On roughness coefficient and Chezy parameter for hydraulic calculation of fish passage and spawning channels. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2024;92(1):226–245. (In Russ.).

Введение. Функциональное назначение пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов заключается в создании в их акваториальном пространстве необходимых условий для миграционных перемещений и нереста рыб [1–8]. Вышеуказанные условия обеспечиваются при соответ-

ствующих потребностям рыб их размерах и расходно-скоростных параметрах. Известными рекомендациями и рыбоводно-биологическими обоснованиями таких каналов, предназначенных для прохода и (или) нереста широкого спектра видов проходных, полупроходных и туводных рыб (осетра, севрюги, стерляди, рыбца, шемаи, леща, судака, тарани, сельди, сазана и др.), определены требования к конструктивным решениям и скоростному режиму протекания водного потока по их руслам [1, 3, 9–15]¹. Рекомендуемыми особенностями компоновочно-конструктивного устройства и требованиями к режимам течений в таких каналах определены нижеследующие.

1 Поперечное сечение русел каналов (живое сечение водного потока) по форме и размерам принимается по требованиям обеспечения условий для перемещения по их тракту и (или) нереста в их акваториальном пространстве расчетного количества определенных видов рыб. Рекомендуется устройство каналов трапецеидального поперечного сечения при среднем соотношении ширины b_k тракта (русла) и его глубины h_k , составляющем $b_k/h_k = 10,0$ и изменяющемся в пределах $4,0 \leq b_k/h_k \leq 18,0$ (при значениях гидравлического радиуса $R_k = 1,2 \dots 2,4$ м), с пологим заложением откосов $m_k = 2,5 \pm 0,5$, обеспечивающим их устойчивость. Поверхность русел каналов покрывается слоем разноразмерной гравийно-галечной смеси (со средним размером отдельных составляющих 40 мм), являющейся креплением ложа и нерестовым субстратом для литофилов. На дне каналов рекомендуется устройство элементов усиленной шероховатости кубовидной формы с размерами $\Delta_{y/m} = 0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м при среднем соотношении их высоты и глубины водного потока h_k , составляющем $0,10 \leq \Delta_{y/m}/h_k \leq 0,20$.

¹Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87: СП 101.13330.2012: утв. Минрегионразвития России 30.06.12: введ. в действие с 01.01.13. М., 2012. 69 с.

Кубы элементов усиленной шероховатости рекомендуется размещать в шахматном порядке по сетке с размерами сторон (по ширине b_i и длине l_i русла), равными $b_i = l_i = 5 \dots 10 \Delta_{y/ш}$.

2 Скоростной режим течений по тракту канала определяется ограничениями по скоростям водного потока, составляющими $0,8 \leq v_k \leq 1,0$ м/с (величины которых не превышают крейсерских скоростей плавания рыб), и влиянием на характер течений, оказываемым его формой, уклоном дна, видом и параметрами шероховатости покрытия русла. Указанные ограничения в гидрометрических параметрах и условиях конструктивных решений трактов каналов обеспечиваются при уклонах, равных $I_k = 0,0003 \dots 0,0005$.

В соответствии с данными Ю. М. Косиченко и др. [16] тракты рыбоходно-нерестовых каналов предлагается рассчитывать по методикам и зависимостям, описывающим гидравлику течений, открытых безнапорных водопроводящих сооружений (русел) с равномерным установившимся (или плавно изменяющимся) режимом течений. При проведении расчетов гидрометрических параметров каналов необходимо учитывать отличия в размерах шероховатостей покрытия откосов и дна и наличие элементов усиленной шероховатости.

В соответствии с предложением А. Шези скорость водного потока для указанного вида течений описывается известным уравнением:

$$v_k = C_{ш} \sqrt{R_k I_k},$$

где v_k – средняя (по живому сечению) скорость водного потока, м/с;

$C_{ш}$ – параметр Шези, определяемый по функции $C_{ш} = f(n_{ш}; R_k)$, м^{0,5}/с;

$n_{ш}$ – коэффициент шероховатости русловой поверхности канала;

R_k – гидравлический радиус живого сечения потока в канале, м;

I_k – уклон дна и (или) водной поверхности в тракте (русле) канала.

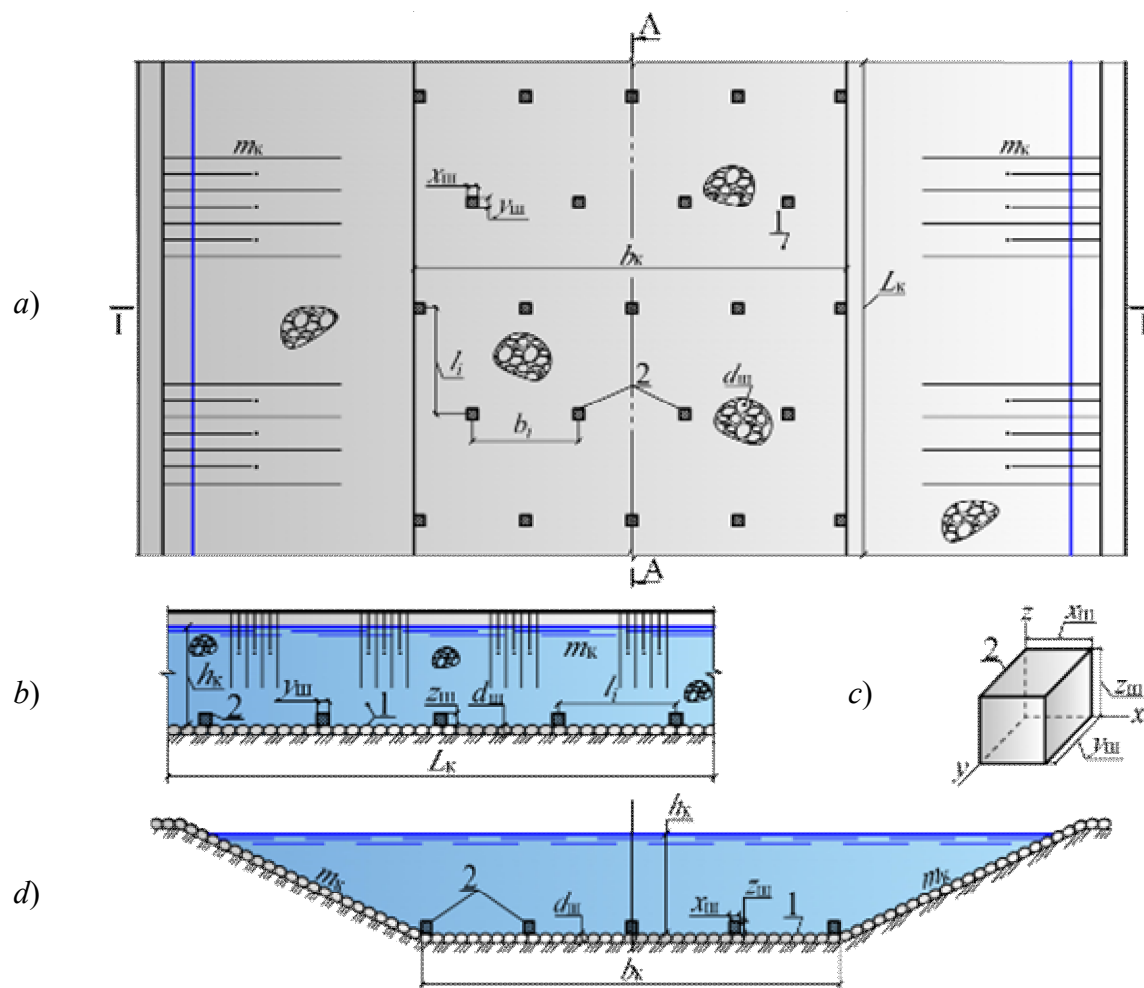
Для расчета значений скоростного параметра $C_{ш}$ разработано более 110 эмпирических зависимостей [17, 18], базирующихся на данных исследований речных русел и каналов как с моновидовой и моноразмерной шероховатостью, так и с поливидовой и полиразмерной шероховатостью их ложа (дна и откосов). Известны и широко используются в отечественной практике зависимости, предложенные Гангилье и Куттером, Р. Маннингом, Н. Н. Павловским, И. И. Агроскиным, Д. В. Штеренлихтом, А. Д. Альтшулем, Г. В. Железняковым, Ф. Форхгеймером, А. Ш. Мамедовым и др. Известны зависимости для определения параметра Шези для каналов, обустроенных элементами усиленной шероховатости, предложенные Райо и Гаруэ, А. Д. Альтшулем, А. К. Рябовым, П. И. Гордиенко, Г. А. Распопиным, А. Д. Санжиевым, Е. Е. Овчаровым, В. А. Соколовой и др. [19, 20]. Анализом предложенных зависимостей для расчета значений $C_{ш}$ и $n_{ш}$ установлены условия их получения и применения. По материалам информационного поиска и анализа сделан вывод об отсутствии зависимостей, позволяющих выполнить гидравлический расчет рыбоходно-нерестовых каналов с вышеуказанными условиями их устройства и составом рыбоводно-биологических требований к их функционированию. Указанное обстоятельство предопределило необходимость проведения соответствующего исследования, посвященного установлению зависимостей для определения значений коэффициента шероховатости $k_{ш}$ и скоростного параметра Шези $C_{ш}$.

Материалы и методы. При решении поставленной задачи принят экспериментальный метод, заключающийся в проведении исследования на гидравлической модели типичного фрагмента рыбоходно-нерестового канала с параметрами, соответствующими вышеприведенным диапазонам его размеров и расходно-скоростных характеристик. Модель выполнена

в виде прямолинейного лотка трапецеидального поперечного сечения с протяженностью рабочей зоны, составляющей 6,0 м, шириной по дну 1,2 м и глубиной 0,3 м при заложении откосов 1:2,5. Русло канала выполнено оштукатуренным с размером песчаного заполнителя цементного раствора $d_{ш} = 2,5$ мм, что соответствует среднему размеру гравийно-галечной смеси покрытия 40 мм. Уклон дна канала принят равным $I_{дна} = 0,0005$. В качестве элементов усиленной шероховатости использовались металлические кубики с размером стороны, равным $\Delta_{y/ш} = 15$ мм, с их шахматным размещением по дну канала по сетке от $b_i \times l_i = 5,0 \times 5,0$ см до $b_i \times l_i = 20,0 \times 20,0$ см. При принятых размерах элементов усиленной шероховатости и водного потока обеспечивалось соответствие диапазонов их лабораторных значений $\Delta_{y/ш}/h_k$, $\Delta_{y/ш}/b_i$ и $\Delta_{y/ш}/l_i$ натурным. Средняя скорость потока на модели в начальном створе составляла 0,20 м/с, что соответствует скорости потока в натуре, равной 0,90 м/с. Форма и параметры фрагмента русловой части модели приведены ниже на рисунке 1.

Планом эксперимента предусматривались серии опытов с определением параметров потока при одинаковой шероховатости русла и при установке по дну элементов усиленной шероховатости по различным схемам.

Методикой гидравлических исследований предусматривалось следующее: при принятой скорости течения и заданной в опыте глубине водного потока (по начальному створу) определялся его расход; устанавливались условия опыта, связанные с расположением элементов усиленной шероховатости; осуществлялась подача расчетного расхода воды и устанавливалась глубина в начальном створе рабочей части лотка; в промежуточных и конечном створах осуществлялись измерения глубин водного потока и скоростей течений; фиксировался уклон поверхности водного потока.



a – план; *b* – продольный разрез А–А; *c* – вид на элемент усиленной шероховатости; *d* – поперечный разрез I–I; d_{sh} – средний размер включений крепления дна и откосов, мм; l_i , b_i – продольные и поперечные размеры сетки установки элементов усиленной шероховатости, м; x_{sh} , y_{sh} , z_{sh} – размеры сторон элементов усиленной шероховатости, м; h_k , b_k , L_k – глубина, ширина по дну и длина участка тракта канала, м; m_k – заложение откосов; *l* – фрагмент русла (тракта) канала; *2* – элементы усиленной шероховатости

a – plan; *b* – longitudinal section A–A; *c* – view of the element of enhanced roughness; *d* – cross section I–I; d_{sh} – average size of inclusions for bed and slope revetment, mm; l_i , b_i – longitudinal and cross-sectional dimensions of grid for installing reinforced roughness elements, m; x_{sh} , y_{sh} , z_{sh} – dimensions of the sides of reinforced roughness elements, m; h_k , b_k , L_k – depth, bed width and length of the channel section, m; m_k – slope ratio; *l* – fragment of the channel bed (tract); *2* – elements of enhanced roughness

Рисунок 1 – Схема рабочего участка рыбоходно-нерестового канала
Figure 1 – Scheme of the working area of the fish passage and spawning channel

Обработка опытных данных проводилась в нижеследующем порядке.

1 Зафиксированные на модели параметры водного потока (глубины,

скорости и уклоны) приводились к натурным значениям условно принятого фрагмента типичного тракта (русла) рыбоходно-нерестового канала.

2 По установленным величинам средней скорости водного потока \bar{v}_k , гидравлического радиуса R_k и уклона канала I_k определялось опытное значение скоростного параметра Шези $C_{оп}$ в соответствии с соотношением:

$$C_{оп} = \bar{v}_k / \sqrt{R_k I_k},$$

где $C_{оп}$ – опытное значение скоростного параметра Шези, м^{0,5}/с.

3 Используя известные расчетные зависимости для определения значений параметра Шези (Н. Н. Павловского, И. И. Агроскина, Д. В. Штернлихта, Н. Маннинга, Гангилье – Куттера, Ф. Форхгеймера), для опытных величин R_k устанавливали соответствующие опытным значениям $C_{оп}$ величины коэффициента шероховатости. Полученные расчетом шесть значений указанного коэффициента приводились к средней величине – приведенному к моношероховатости расчетному параметру $(k_{ш})_{пр}$.

4 Используя опытные данные эксперимента, проведенного в условиях моноразмерного и моновидового покрытия русла (дна и откосов), сформированного гравийно-галечной смесью со средним выступом отдельностей $d_{ш} = 40,0$ мм, по нижеприведенному соотношению определяли расчетное значение коэффициента основной шероховатости $(k_{ш})_{осн}$:

$$(k_{ш})_{осн} = 0,0198 \cdot d_{ш}^{0,108}.$$

5 Используя известную зависимость Н. Н. Павловского для определения приведенного коэффициента шероховатости для каналов с разной шероховатостью откосов и дна и установленные по позициям 3 и 4 значения приведенного коэффициента шероховатости $(k_{ш})_{пр}$ и коэффициента шероховатости откосов $(k_{ш})_{отк} = (k_{ш})_{осн}$, методом подбора определяли соответствующие значения коэффициента шероховатости дна канала $(k_{ш})_{дна}$.

Проведенные и соответствующие вышеприведенной последовательности расчеты позволили получить совокупность искомых значений $C_{ш}$, $(k_{ш})_{пр}$, $(k_{ш})_{отк}$, $(k_{ш})_{дна}$ для соответствующих условий и параметров эксперимента при принятых соотношениях: $\Delta_{y/ш}/h_k$; h_k/b_k ; R_k ; $\Delta_{y/ш}/b_i$; $\Delta_{y/ш}/l_i$.

Результаты и обсуждение. Аналитическая (камеральная) обработка опытного(ых) материала (данных) и применение технологий дисперсионно-регрессионного анализа позволили установить эмпирические зависимости для прогнозирования (расчета) значений скоростного параметра Шези ($C_{ш}$) и коэффициента шероховатости ($k_{ш}$) для определенного спектра условий протекания водного потока по тракту рыбоходно-нерестового канала.

В качестве исходных данных для ведения расчетов рассматривались:

- геометрические размеры тракта канала (ширина по дну b_k , глубина потока h_k , заложение откосов m_k , площадь живого сечения потока ω_k , смоченный периметр χ_k , гидравлический радиус R_k , уклон дна русла канала I_k);

- вид и параметры гравийно-галечного покрытия русла (диаметр отдельных гравийно-галечной смеси $(d_{ш})_{осн}$ и эффективная высота выступов шероховатости $(\Delta_{ш})_{осн}$);

- характеристика элементов усиленной шероховатости (вид элемента шероховатости и его размеры $d_{y/ш}$ или $\Delta_{y/ш}$ и относительные показатели $d_{y/ш}/h_k$ или $\Delta_{y/ш}/h_k$; при шахматной схеме расстановки элементов усиленной шероховатости соблюдались определенные значения соотношений $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i$, где $b_i = l_i$ – размеры сторон шахматной сетки, по которой расставлялись элементы шероховатости по дну канала).

При определении (прогнозировании) значений коэффициента шероховатости $k_{ш}$ и скоростного параметра Шези $C_{ш}$, используемых при гид-

равлическом расчете рыбоходно-нерестовых каналов, рекомендуется применять нижеприведенные расчетные (эмпирические) зависимости.

1 Зависимость для определения значений коэффициентов шероховатости основного покрытия русла (дна и откосов) разноразмерной гравийно-галечной смесью со средним размером отдельностей $(d_{ш})_{осн}$ имеет вид:

$$(k_{ш})_{осн} = 0,0198\varepsilon(d_{ш})_{осн}^{0,108} = 0,0198(\Delta_{ш})_{осн}^{0,108},$$

где $(k_{ш})_{осн}$ – коэффициент шероховатости основного покрытия русла;

ε – экспериментально устанавливаемый коэффициент, определяющий высоту выступов покрытия русла (эффективный размер шероховатости) и изменяющийся от 0,2 до 0,8 в зависимости от фракционного состава гравийно-галечной смеси и степени ее заиленности.

2 При использовании размещаемых в шахматном порядке по дну элементов усиленной шероховатости в форме кубов с размерами $\Delta_{y/ш} \times b_{y/ш} \times l_{y/ш} = 0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м величина дополнительной шероховатости $(k_{ш})_{доп}$ определяется в соответствии с экспериментальной зависимостью вида:

$$(k_{ш})_{доп} = \left(\frac{\Delta_{y/ш}}{h_k} \right)^{2,75} \times \left[1,0 + \left(\frac{b_{y/ш}}{b_i} \right)^{0,25} \right]^{10,0 l_{y/ш} / l_i}.$$

Экспериментальные $[(k_{ш})_{доп}]_{оп}$ и расчетные значения $[(k_{ш})_{доп}]_{расч}$ коэффициента дополнительной шероховатости приведены ниже в таблице 1, а графики функциональной связи вида $(k_{ш})_{доп} = f\left(\frac{\Delta_{y/ш}}{h_k}; \frac{b_{y/ш}}{h_k}; \frac{l_{y/ш}}{h_k}\right)$ для различных условий опыта и расчета проиллюстрированы рисунком 2.

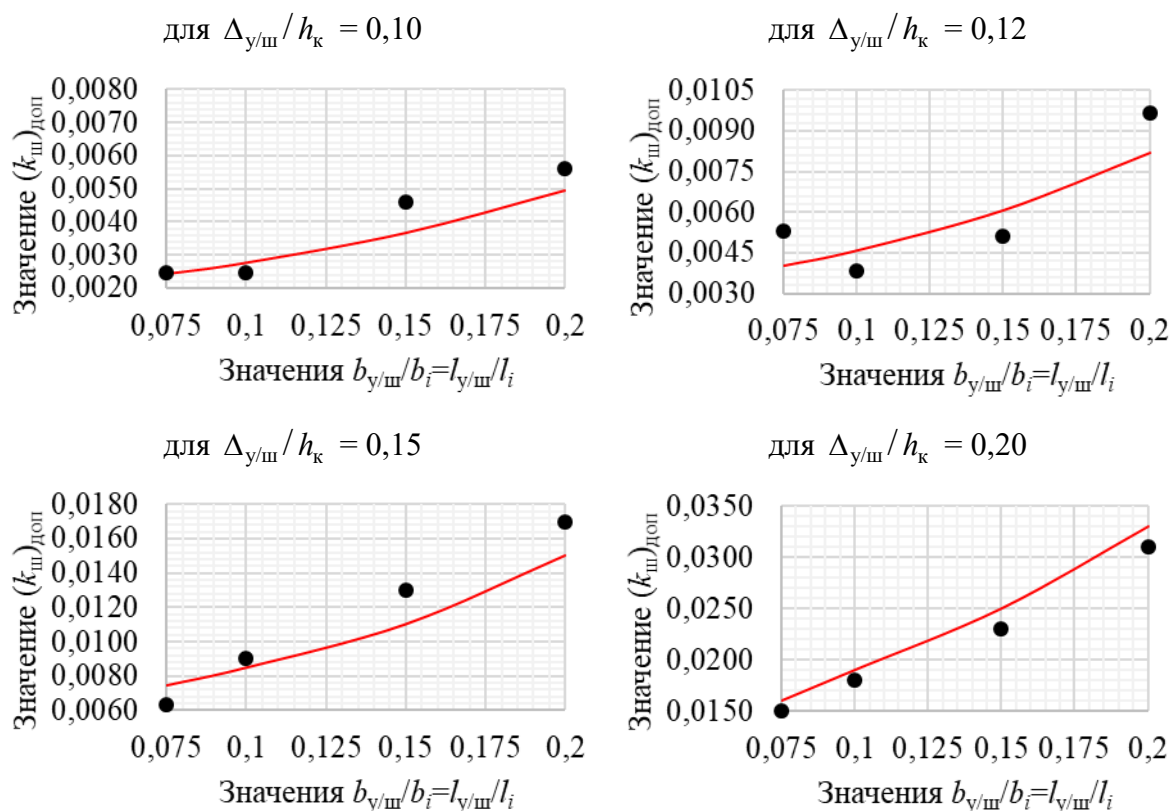
3 Коэффициент шероховатости дна канала $(k_{ш})_{дна}$, обустроенного элементами усиленной шероховатости, размещаемыми в шахматном порядке по слою гравийно-галечной смеси, определяется по соотношению:

$$(k_{ш})_{дна} = (k_{ш})_{осн} + (k_{ш})_{доп}.$$

Таблица 1 – Опытные и расчетные значения коэффициента дополнительной шероховатости $(k_{ш})_{доп}$

Table 1 – Experimental and calculated values of additional roughness coefficient $(k_{sh})_{add}$

$\Delta_{y/ш}/h_k$	Значение $(k_{ш})_{доп}$ для значения $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i$			
	0,075	0,100	0,150	0,200
Опытные значения				
0,10	0,00247	0,00247	0,0046	0,0056
0,12	0,00531	0,00382	0,0051	0,0097
0,15	0,00634	0,00906	0,0130	0,0170
0,20	0,0150	0,0180	0,0230	0,0310
Расчетные значения				
0,10	0,0024	0,0028	0,0037	0,0050
0,12	0,0040	0,0046	0,0061	0,0082
0,15	0,0074	0,0085	0,0110	0,0150
0,20	0,0160	0,0190	0,0250	0,0330



● – опытные значения / experimental values; — — расчетные значения / calculated values

Рисунок 2 – График функции $(k_{ш})_{доп} = f(\Delta_{y/ш} / h_k; b_{y/ш} / b_i = l_{y/ш} / l_i)$

Figure 2 – Graph of the function $(k_{sh})_{add} = f(\Delta_{u/sh} / h_k; b_{u/sh} / b_i = l_{u/sh} / l_i)$

4 Учитывая качественные и количественные отличия в виде и размерах элементов усиленной шероховатости и различия в значениях коэффициентов шероховатости по откосам и на дне канала (неоднородность покрытия русловой поверхности и разновеликость значений $(k_{ш})_{\text{дна}}$ и $(k_{ш})_{\text{отк}} = (k_{ш})_{\text{осн}}$), рекомендуем определять приведенное (осредненное) по смоченному периметру водного потока значение $(k_{ш})_{\text{пр}}$ с использованием зависимости:

$$(k_{ш})_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{b_{\text{к}} \cdot (k_{ш})_{\text{дна}}^2 + 2l_{\text{отк}} (k_{ш})_{\text{отк}}^2}{b_{\text{к}} + 2l_{\text{отк}}}},$$

где $l_{\text{отк}} = \sqrt{h_{\text{к}}^2 + (m_{\text{к}} h_{\text{к}})^2}$ – длина смачиваемой потоком линии откоса, м.

Опытные значения коэффициента приведенной шероховатости $(k_{ш})_{\text{пр}}$ при исследованных условиях расстановки элементов усиленной шероховатости по дну рыбоходно-нерестового канала приведены ниже в таблице 2.

Таблица 2 – Опытные $[(k_{ш})_{\text{пр}}]_{\text{оп}}$ и расчетные $[(k_{ш})_{\text{пр}}]_{\text{расч}}$ значения коэффициента приведенной шероховатости
Table 2 – Experimental $[(k_{sh})_{pr}]_{op}$ and calculated $[(k_{sh})_{pr}]_{calc}$ values of the reduced roughness coefficient

Соотношение $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i$	Величина приведенного коэффициента шероховатости для $\Delta_{y/ш}/h_{\text{к}}$			
	0,20	0,15	0,12	0,10
Опытные значения $[(k_{ш})_{\text{пр}}]_{\text{оп}}$				
0,20	0,054	0,042	0,036	0,034
0,15	0,048	0,039	0,032	0,033
0,10	0,044	0,036	0,032	0,031
0,075	0,041	0,034	0,033	0,031
Расчетные значения $[(k_{ш})_{\text{пр}}]_{\text{расч}}$				
0,20	0,056	0,040	0,035	0,033
0,15	0,049	0,038	0,034	0,032
0,10	0,0444	0,0357	0,0326	0,0312
0,075	0,042	0,035	0,032	0,031

По опытным и расчетным значениям коэффициента приведенной шероховатости $[(k_{ш})_{\text{пр}}]_{\text{оп}}$ и $[(k_{ш})_{\text{пр}}]_{\text{расч}}$ построены графики функций вида

$[(k_{ш})_{пр}]_{оп} = f(\Delta_{у/ш} / h_k; b_{у/ш} / b_i = l_{у/ш} / l_i)$ и $[(k_{ш})_{пр}]_{расч} = f(\Delta_{у/ш} / h_k; b_{у/ш} / b_i = l_{у/ш} / l_i)$, нанесенные на одну координатную сетку для четырех различных случаев выбора схем расстановки элементов усиленной шероховатости по дну канала и глубин потока. Указанные графики функций представлены на рисунке 3.

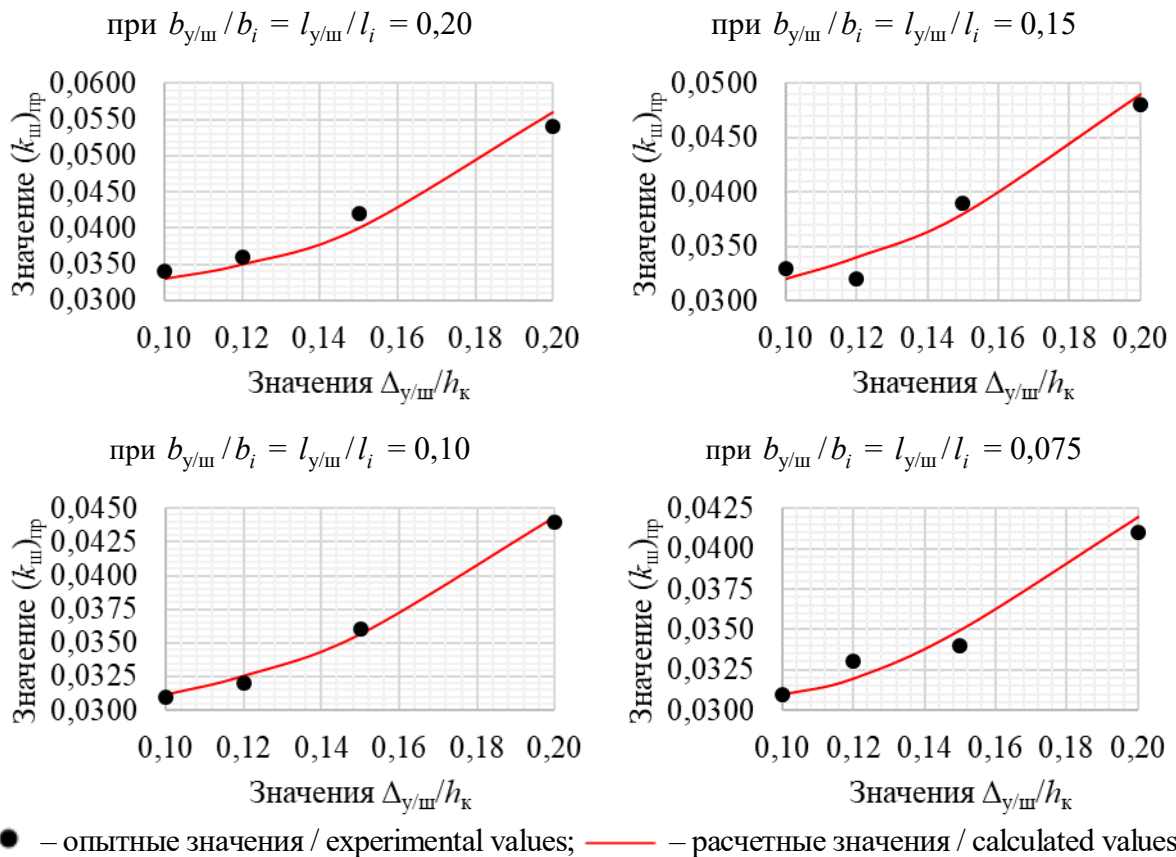


Рисунок 3 – График функции $(k_{ш})_{пр} = f(\Delta_{у/ш} / h_k; b_{у/ш} / b_i = l_{у/ш} / l_i)$

Figure 3 – Graph of the function $(k_{sh})_{pr} = f(\Delta_{u/sh} / h_k; b_{u/sh} / b_i = l_{u/sh} / l_i)$

5 Значения параметра Шези предлагается определять по формуле:

$$C_{ш} = \frac{1}{(k_{ш})_{пр}} + \frac{0,689}{(k_{ш})_{пр}^{0,56}} \cdot (R_k - 1,0)^{5\sqrt{(k_{ш})_{пр}}}. \quad (1)$$

Опытные $(C_{ш})_{оп}$ и расчетные $(C_{ш})_{расч}$ значения (установленные по зависимости (1)) скоростного параметра Шези приведены ниже в таблице 3.

Таблица 3 – Опытные и расчетные значения параметра Шези
Table 3 – Experimental and calculated values of the Chezy parameter

Параметр	Значение параметра при значениях $\Delta_{y/ш}/h_k$ и R_k			
	$\Delta_{y/ш}/h_k = 0,20$ $R_k = 1,22$ м	$\Delta_{y/ш}/h_k = 0,15$ $R_k = 1,69$ м	$\Delta_{y/ш}/h_k = 0,12$ $R_k = 2,05$ м	$\Delta_{y/ш}/h_k = 0,10$ $R_k = 2,40$ м
При соотношении $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i = 0,075$				
$[(k_{ш})_{пр}]_{оп}$	0,041	0,034	0,033	0,031
$[(k_{ш})_{пр}]_{расч}$	0,042	0,035	0,032	0,031
$(C_{ш})_{оп}, M^{0,5}/c$	25,3	32,7	35,2	37,3
$(C_{ш})_{расч}, M^{0,5}/c$	24,7	31,8	36,2	37,3
Отклонения $\Delta_{C_{ш}}, \%$	+2,4	+2,8	-2,8	$\pm 0,0$
При соотношении $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i = 0,10$				
$[(k_{ш})_{пр}]_{оп}$	0,044	0,036	0,032	0,031
$[(k_{ш})_{пр}]_{расч}$	0,0444	0,0357	0,0326	0,0312
$(C_{ш})_{оп}, M^{0,5}/c$	23,5	30,5	37,0	39,5
$(C_{ш})_{расч}, M^{0,5}/c$	23,3	31,2	35,6	38,8
Отклонения $\Delta_{C_{ш}}, \%$	+0,8	-2,3	+3,8	+1,8
При соотношении $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i = 0,15$				
$[(k_{ш})_{пр}]_{оп}$	0,048	0,039	0,032	0,033
$[(k_{ш})_{пр}]_{расч}$	0,049	0,038	0,034	0,032
$(C_{ш})_{оп}, M^{0,5}/c$	21,6	28,6	36,2	36,6
$(C_{ш})_{расч}, M^{0,5}/c$	20,9	29,5	34,6	37,9
Отклонения $\Delta_{C_{ш}}, \%$	+3,2	-3,1	+4,4	-3,6
При соотношении $b_{y/ш}/b_i = l_{y/ш}/l_i = 0,20$				
$[(k_{ш})_{пр}]_{оп}$	0,054	0,042	0,036	0,034
$[(k_{ш})_{пр}]_{расч}$	0,056	0,040	0,035	0,033
$(C_{ш})_{оп}, M^{0,5}/c$	19,1	26,6	32,4	35,8
$(C_{ш})_{расч}, M^{0,5}/c$	18,4	27,6	33,3	36,9
Отклонения $\Delta_{C_{ш}}, \%$	+3,7	-3,8	-2,8	-3,1

Графическое представление зависимости (1) по расчетным значениям $(C_{ш})_{расч}$ и их опытными величинам $(C_{ш})_{оп}$ приведено ниже на рисунке 4.

Приемлемость формулы (1) установлена по результатам сопоставления расчетных значений $C_{расч}$ со средними значениями параметра Шези, определенными по известным формулам для соответствующих опытам зна-

чений гидравлического радиуса R_k и приведенного коэффициента шероховатости $(k_{ш})_{пр}$. Виды известных зависимостей, принятых для сопоставления с рекомендуемой в авторских обозначениях, приведены в таблице 4.

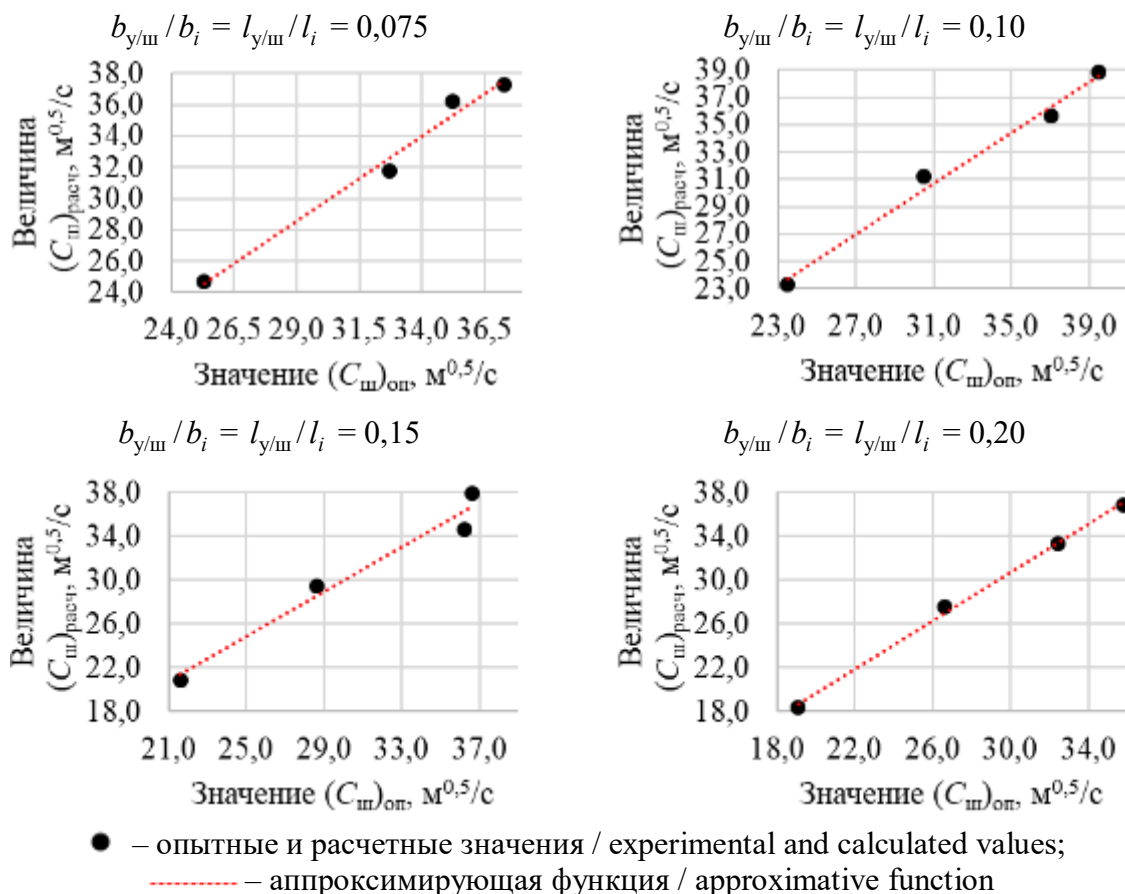


Рисунок 4 – Графики функциональной связи $(C_{ш})_{расч} = f((C_{ш})_{оп})$

Figure 4 – Functional relationship graphs $(C_{sh})_{calc} = f((C_{sh})_{op})$

Таблица 4 – Расчетные зависимости для определения значения скоростного параметра Шези $C_{ш}$, $m^{0,5}/s$, с указанием их авторов

Table 4 – Calculated dependencies for determining the Chezy velocity parameter value C_{sh} , $m^{0,5}/s$, indicating their authors

Автор	Зависимость	Автор	Зависимость
Н. Н. Павловский	$C_{П} = \frac{1}{(k_{ш})_{пр}} \cdot R_k^{1,3\sqrt{(k_{ш})_{пр}}}$	Д. В. Штетенлихт	$C_{Штр} = \frac{1}{(k_{ш})_{пр}} + \frac{0,45}{(k_{ш})_{пр}} \lg R_k$
И. И. Агроскин	$C_{Аг} = \frac{1}{(k_{ш})_{пр}} + 17,72 \lg R_k$	Н. Маннинг	$C_{Ман} = \frac{1}{(k_{ш})_{пр}} \cdot R_k^{1/6}$
Гангилье – Куттер	$C_{Г/К} = \frac{23 + 1/(k_{ш})_{пр}}{1 + 23(k_{ш})_{пр}/\sqrt{R_k}}$	Ф. Форхгеймер	$C_{Ф} = \frac{1}{(k_{ш})_{пр}} \cdot R_k^{1/5}$

Пример результатов расчета значений $C_{ш}$ по вышеприведенным зависимостям для варианта русла с элементами усиленной шероховатости со схемой их шахматной установки, характеризуемой соотношениями $b_{yш}/b_i = l_{yш}/l_i = 0,15$; $\Delta_{yш}/h_k = 0,10; 0,12; 0,15$ и $0,20$; гидравлическим радиусом, равным $R_k = 1,22; 1,69; 2,05$ и $2,40$ м, и соответствующими им значениями приведенного коэффициента шероховатости $(k_{пр})_{рас}$ приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Значения скоростного параметра Шези, полученные по известным и авторской зависимостям

В м^{0,5/с}

Table 5 – Chezy velocity parameter values obtained according to known and author's dependencies

In m^{0,5/s}

Значение $(k_{ш})_{пр}$	Значение скоростного параметра Шези								
	$C_{П}$	$C_{Ар}$	$C_{Г/К}$	$C_{ШГ}$	$C_{Ман}$	$C_{Ф}$	$C_{сред}$	$C_{автор}$	$\Delta C, \%$
Для $R_k = 1,22$ м									
0,042	25,10	25,34	24,97	24,73	24,61	24,78	24,92	24,67	+1,01
0,044	23,99	24,26	23,86	23,61	23,49	23,65	23,81	23,54	+1,13
0,048	22,05	22,36	21,92	21,64	21,54	21,68	21,87	21,55	+1,44
0,054	19,67	20,05	19,54	19,24	19,14	19,27	19,49	19,13	+1,82
Для $R_k = 1,69$ м									
0,035	32,46	32,61	31,85	31,50	31,18	31,73	31,89	31,75	+0,43
0,0357	31,86	32,05	31,26	30,88	30,57	31,11	31,29	31,15	+0,44
0,038	30,06	30,35	29,49	29,01	28,72	29,23	29,48	29,31	+0,57
0,040	28,65	29,04	28,11	27,56	27,28	27,77	28,07	27,88	+0,67
Для $R_k = 2,05$ м									
0,032	36,93	36,77	35,83	35,63	35,22	36,07	36,08	36,20	-0,35
0,0326	36,30	36,20	35,23	34,98	34,57	35,41	35,45	35,57	-0,34
0,034	34,93	34,94	33,90	33,54	33,15	33,95	34,07	34,20	-0,39
0,035	34,02	34,10	33,01	32,58	32,20	32,98	33,15	33,29	-0,43
Для $R_k = 2,40$ м									
0,030	40,60	40,07	38,97	39,04	38,57	39,71	39,49	39,90	-1,03
0,031	39,42	39,00	37,84	37,78	37,33	38,43	38,30	38,74	-1,15
0,032	38,31	37,99	36,78	36,60	36,16	37,23	37,18	37,65	-1,27
0,033	37,26	37,04	35,78	35,49	35,06	36,10	36,12	36,62	-1,38

Судя по данным таблицы 5, значения параметра Шези $C_{ш}$, определенные по авторской зависимости (1), соответствуют его средним значениям, установленным расчетом по известным формулам (см. таблицу 4).

Вывод. Получены эмпирические зависимости для прогнозирования значений коэффициентов шероховатости и параметров Шези для русел рыбоходно-нерестовых каналов, характеризующихся гравийно-галечным покрытием их дна и откосов и наличием элементов усиленной шероховатости, устанавливаемых по дну каналов в шахматном порядке.

Список источников

1. Шкура Вл. Н., Дроботов А. Н. Рыбоходные и рыбоходно-нерестовые каналы / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. Новочеркасск: НГМА, 2012. 203 с.
2. Шкура Вл. Н., Михальчук А. В. Рыбоходно-нерестовый канал для низконапорных гидроузлов на малых реках // Интеграция науки и образования – стратегия устойчивого развития водно-мелиоративного комплекса страны: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию вып. первого мелиоратора России / М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО «НГМА», ФГБНУ «РосНИИПМ». 2013. С. 180–185. EDN: SIEXBZ.
3. Чистяков А. А. Конструкции рыбоходов: монография / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. Новочеркасск: Темп, 2006. 532 с. EDN: OTQUYB.
4. Введенский О. Г. Повышение эффективности работы рыбоходно-нерестовых каналов // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Ин-та стр-ва и архитектуры ПГТУ. Йошкар-Ола, 2019. С. 266–273. EDN: ZMBVCSJ.
5. Мартыненко В. Н. Рыбоходный канал в составе гидроузла // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2020. № 5. С. 150–152. EDN: XEFPTI.
6. Введенская С. Ю. Рыбоходный канал для плотины гидроузла // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2022. № 1. С. 628–631. EDN: BYDWLO.
7. Мурзаева М. В. Регулирование скоростей потока в рыбоходно-нерестовом канале низконапорного гидроузла // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2020. № 5. С. 153–155. EDN: SDNNXD.
8. Шкура В. Н., Шевченко А. В. Рыбоходно-нерестовые каналы, как средство улучшения условий воспроизводства рыб на Нижнем Дону // Рыбное хозяйство. 2022. № 5. С. 82–87. DOI: 10.37663/0131-6184-2022-5-82-87. EDN: AIWWAW.
9. Шкура В. Н., Шевченко А. В. Рыбоходно-нерестовые каналы – средство улучшения условий естественного воспроизводства популяций анадромных рыб на зарегулированных реках // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2022. Т. 16, № 3(194). С. 212–225. DOI: 10.33920/sel-09-2203-05. EDN: FFUKPI.
10. Шкура В. Н., Шевченко А. В. Научно-техническое обоснование создания пригидроузловых рыбоходных, рыбоходно-нерестовых и нерестовых каналов на р. Дон // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5, № 1. С. 60–80. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-60-80>. EDN: QNFKUI.
11. Павлов Д. С., Скоробогатов М. А. Миграции рыб в зарегулированных реках. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2014. 413 с. EDN: TZCLYD.
12. Малеванчик Б. С., Никоноров И. В. Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. М.: Лег. и пищевая пром-сть, 1984. 256 с.
13. Вохминцева Е. В. Математическая модель работы рыбоходно-нерестового канала // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2019. № 5. С. 151–153. EDN: GBGNHP.

14. Baki A. B. M., Azimi A. H. Hydraulics and design of fishways II: vertical-slot and rock-weir fishways // *Journal of Ecohydraulics*. 2021. DOI: 10.1080/24705357.2021.1981780.

15. Fishway in hydropower dams: a scientometric analysis / J. L. Brito-Santos, K. Dias-Silva, L. S. Brasil, J. B. da Silva, A. M. Santos, L. M. de Sousa, T. B. Vieira // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021, 28 Oct. Vol. 193. 752. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09360-z>.

16. Гидравлический расчет рыбоходно-нерестового канала с элементами искусственной шероховатости / Ю. М. Косиченко, В. Н. Шкура, О. А. Баев, М. Ю. Косиченко // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. 2017. № 4(28). С. 223–241. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=342> (дата обращения: 20.12.2023). EDN: ZRWIVL.

17. Мамедов А. Ш. О расчете коэффициента Шези речного потока // *Природообустройство*. 2011. № 3. С. 62–67. EDN: OFXGXD.

18. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Расчет коэффициентов шероховатости русел каналов с неоднородными участками // *Природообустройство*. 2020. № 3. С. 6–14. DOI: 10.26897/1997-6011-2020-3-6-14. EDN: UGUURG.

19. Гордиенко П. И. Гидравлические сопротивления при бурных потоках в шероховатых руслах // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. М.: Энергия, 1969. Вып. 52. С. 3–50.

20. Рябов А. К. Гидравлический расчет русел с искусственной шероховатостью // *Гидротехническое строительство*. 1967. № 9. С. 42–45.

References

1. Shkura V.I.N., Drobotov A.N., 2012. *Rybokhodnye i rybokhodno-nerestovyye kanaly* [Fish Pass and Fish Passage-Spawning Channels]. Novochoerkassk State Land Reclamation Academy, Novochoerkassk, NGMA, 203 p. (In Russian).

2. Shkura V.I.N., Mikhailchuk A.V., 2013. *Rybokhodno-nerestovyy kanal dlya nizkonapornykh gidrouzlov na malykh rekakh* [Fish passage and spawning channel for low-pressure waterworks on small rivers]. *Integratsiya nauki i obrazovaniya – strategiya ustoychivogo razvitiya vodno-meliorativnogo kompleksa strany: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu vypuska pervogo melioratora Rossii* [Integration of Science and Education – Strategy for Sustainable Development of the Country's Water Reclamation Complex: Proc. of the International Scientific-Practical Conference, Dedicated to the 100th Anniversary of the Graduation of the First Land Reclamation Worker in Russia]. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Novochoerkassk State Land Reclamation Academy, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, pp. 180-185, EDN: SIEXBZ. (In Russian).

3. Chistyakov A.A., 2006. *Konstruksii rybokhodov: monografiya* [Design of Fish Passages: monograph]. Novochoerkassk State Land Reclamation Academy, Novochoerkassk, Temp Publ., 532 p., EDN: OTQUYB. (In Russian).

4. Vvedensky O.G., 2019. *Povyshenie effektivnosti raboty rybokhodno-nerestovykh kanalov* [Increasing the efficiency of fish passages and spawning channels]. *Aktual'nye problemy stroitel'nogo i dorozhnogo kompleksov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta stroitel'stva i arkhitektury PGTU* [Current Issues of Construction and Road Complexes: Proc. of the International Scientific-Technical Conference, Dedicated to the 50th Anniversary of the Institute of Construction and Architecture of Perm State Technical University]. Yoshkar-Ola, pp. 266-273, EDN: ZMBBCJ. (In Russian).

5. Martynenko V.N., 2020. *Rybokhodnyy kanal v sostave gidrouzla* [Fish passage channel as part of a waterworks]. *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoy ekonomiki*

Rossii [Engineering Personnel – the Future of the Innovative Economy of Russia], no. 5, pp. 150-152, EDN: XEFPTI. (In Russian).

6. Vvedenskaya S.Yu., 2022. *Rybokhodnyy kanal dlya plotiny gidrouzla* [Fish passage channel for a waterworks dam]. *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoy ekonomiki Rossii* [Engineering Personnel – the Future of the Innovative Economy of Russia], no. 1, pp. 628-631, EDN: BYDWLO. (In Russian).

7. Murzaeva M.V., 2020. *Regulirovanie skorostey potoka v rybokhodno-nerestovom kanale nizkonapornogo gidrouzla* [Regulation of flow rates in the fish passage and spawning channel of a low-pressure waterworks]. *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoy ekonomiki Rossii* [Engineering Personnel – the Future of the Innovative Economy of Russia], no. 5, pp. 153-155, EDN: SDNNXD. (In Russian).

8. Shkura V.N., Shevchenko A.V., 2022. *Rybokhodno-nerestovye kanaly, kak sredstvo uluchsheniya usloviy vosпроизводства ryb na Nizhnem Donu* [Fish passage and spawning channels as a means of improving the conditions of fish reproduction on the Lower Don]. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], no. 5, pp. 82-87, DOI: 10.37663/0131-6184-2022-5-82-87, EDN: AIWWAW. (In Russian).

9. Shkura V.N., Shevchenko A.V., 2022. *Rybokhodno-nerestovye kanaly – sredstvo uluchsheniya usloviy yestestvennogo vosпроизводства populyatsiy anadromnykh ryb na zaregulirovannykh rekakh* [Fish passage and spawning channels as a means of improving the conditions for natural reproduction of anadromous fish population on regulated rivers]. *Rybovodstvo* [Fish Breeding and Fisheries], vol. 16, no. 3(194), pp. 212-225, DOI: 10.33920/sel-09-2203-05, EDN: FFUKPI. (In Russian).

10. Shkura V.N., Shevchenko A.V., 2023. *Nauchno-tehnicheskoe obosnovanie sozdaniya prigidrouzlovykh rybokhodnykh, rybokhodno-nerestovykh i nerestovykh kanalov na r. Don* [Scientific and technical substantiation for arranging fish pass, fish passage and spawning and spawning channels at the waterworks on the river Don]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo* [Ecology and Water Management], vol. 5, no. 1, pp. 60-80, <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-60-80>, EDN: QNFKUI. (In Russian).

11. Pavlov D.S., Skorobogatov M.A., 2014. *Migratsii ryb v zaregulirovannykh rekakh* [Fish Migrations in Regulated Rivers]. Moscow, Partner. Scient. Ed. KMK Publ., 413 p., EDN: TZCLYD. (In Russian).

12. Malevanchik B.S., Nikonorov I.V., 1984. *Rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya* [Fishways and Fish Protection Structures]. Moscow, Light and Food Industry Publ., 256 p. (In Russian).

13. Vokhmintseva E.V., 2019. *Matematicheskaya model' raboty rybokhodno-nerestovogo kanala* [Mathematical model of the operation of a fish passage and spawning channel]. *Inzhenernye kadry – budushchee innovatsionnoy ekonomiki Rossii* [Engineering Personnel – the Future of the Innovative Economy of Russia], no. 5, pp. 151-153, EDN: GBGNHP. (In Russian).

14. Baki A.B.M., Azimi A.H., 2021. Hydraulics and design of fishways II: vertical-slot and rock-weir fishways. *Journal of Ecohydraulics*, DOI: 10.1080/24705357.2021.1981780.

15. Brito-Santos J.L., Dias-Silva K., Brasil L.S., Silva J.B., Santos A.M., Sousa L.M., Vieira T.B., 2021. Fishway in hydropower dams: a scientometric analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 28 Oct., vol. 193, 752, <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09360-z>.

16. Kosichenko Yu.M., Shkura V.N., Baev O.A., Kosichenko M.Yu., 2017. [Hydraulic calculation of the fish passage and spawning channel with elements of artificial roughness]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 4(28), pp. 223-241, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=342> [accessed 20.12.2023], EDN: ZRWIVL. (In Russian).

17. Mamedov A.Sh., 2011. *O raschete koeffitsienta Shezi rechnogo potoka* [On calculation of the Chezy coefficient of river flow]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 62-67, EDN: OFXGXD. (In Russian).

18. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2020. *Raschet koeffitsiyentov sherokhovatosti rusel kanalov s neodnorodnymi uchastkami* [Calculation of roughness coefficients for channels with heterogeneous sections]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 6-14, DOI: 10.26897/1997-6011-2020-3-6-14, EDN: UGUURG. (In Russian).

19. Gordienko P.I., 1969. *Gidravlicheskie soprotivleniya pri burnykh potokakh v sherokhovatykh ruslakh* [Hydraulic resistance during rapid flows in rough channels]. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike* [Transactions of Joint Conferences on Hydraulic Engineering]. Moscow, Energy Publ., iss. 52, pp. 3-50. (In Russian).

20. Ryabov A.K., 1967. *Gidravlicheskiy raschet rusel s iskusstvennoy sherokhovatost'yu* [Hydraulic calculation of channels with artificial roughness]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 9, pp. 42-45. (In Russian).

Информация об авторах

В. Н. Шкура – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, VNShkura@yandex.ru, AuthorID: 734199, ORCID ID: 0000-0002-4639-6448;

А. В. Шевченко – младший научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, rigge1111@mail.ru, AuthorID: 1027431, ORCID ID: 0000-0003-4839-6377.

Information about the authors

V. N. Shkura – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novochoerkassk, Russian Federation, VNShkura@yandex.ru, AuthorID: 734199, ORCID ID: 0000-0002-4639-6448;

A. V. Shevchenko – Junior Researcher, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novochoerkassk, Russian Federation, rigge1111@mail.ru, AuthorID: 1027431, ORCID ID: 0000-0003-4839-6377.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 06.03.2024.

The article was submitted 23.01.2024; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 06.03.2024.