

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626.88

doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-1-205-224

**Конструктивные решения и гидрометрические
параметры трактов рыбоходно-нерестовых каналов
с элементами усиленной шероховатости**

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: разработка предложений по конструированию и методике расчета гидрометрических параметров трактов пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов. **Материалы и методы.** Фактологическую основу работы составляют данные гидрометрических исследований Николаевского и Константиновского рыбоходно-нерестовых каналов и материалы технического обоснования проектов каналов при Багаевском и Кочетовском гидроузлах на р. Дон. Методическую основу исследований составили результаты авторских исследований и известные рекомендации по определению параметров трактов каналов с усиленной шероховатостью. **Результаты.** Гидрометрические параметры рыбоходно-нерестовых каналов принимаются и рассчитываются исходя из обеспечения необходимых условий для привлечения в каналы анадромных рыб, их прохода из нижних бьефов гидроузлов в верхние и нереста их части в трактах. В качестве таких параметров рассмотрены: расход, средняя скорость течения, глубина и ширина по дну, форма поперечного сечения и заложение откосов, уклон дна и длина канала, виды и размеры гравийно-галечного покрытия русла и элементов усиленной шероховатости. В результате исследования предложены рекомендации по назначению расходов, скоростей и глубин потока, выбору поперечного сечения канала, вида и размеров фракций гравийно-галечной смеси. Разработана методика гидравлического расчета тракта рыбоходно-нерестового канала для принятых условий его работы и с учетом обустройства русла элементами усиленной шероховатости. В порядке апробации методики проведен расчет гидрометрических параметров тракта условного рыбоходно-нерестового канала, обустроенного элементами усиленной шероховатости, со средней скоростью течения 0,9 м/с. **Вывод.** Предложены рекомендации по расчету гидрометрических параметров трактов рыбоходно-нерестовых каналов с элементами усиленной шероховатости и методика такого расчета, которые отвечают требованиям рыбохозяйственно-биологических обоснований по формированию в их трактах условий для миграций и нереста рыб.

Ключевые слова: речные гидроузлы, рыбопропускные сооружения, рыбоходные каналы, рыбоходно-нерестовые каналы, гидрометрия каналов, гидравлика каналов

Для цитирования: Шкура В. Н., Шевченко А. В. Конструктивные решения и гидрометрические параметры трактов рыбоходно-нерестовых каналов с элементами усиленной шероховатости // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 1. С. 205–224. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-205-224>.

HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Structural solutions and hydrometric parameters of fish passage and spawning channel tracts with elements of enhanced roughness

Viktor N. Shkura¹, Alexey V. Shevchenko²

^{1,2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novochoerkassk, 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 develop proposals for the design and methodology for calculating the hydrometric parameters of fish passage and spawning channel tracts at waterworks. **Materials and methods.** The factual basis of the work is data of hydrometric studies of the Nikolaevsky and Konstantinovsky fish passage and spawning channels and materials of technical justification of channel projects at the Bagaevsky and Kochetovsky waterworks on the river Don. The methodological basis of study was the results of the authors' research and well-known recommendations for determining the parameters of channel tracts with enhanced roughness. **Results.** The hydrometric parameters of fish passage and spawning channels are accepted and calculated assuming the provision of necessary conditions for attracting anadromous fish into the channels, their passage from the downstream of the waterworks to the upstreams and the spawning of some of them in the tracts. The following parameters were considered: flow rate, average flow velocity, bottom depth and width, cross-sectional shape and slope ratio, underwater gradient and channel length, types and sizes of gravel-pebble channel coating and elements of enhanced roughness. As a result of the study, the recommendations for flow rates, flow velocities and depths, the choice of the cross-section of the channel, the type and size of fractions of the gravel-pebble mixture were proposed. A methodology for hydraulic calculation of the fish passage and spawning channel tracts has been developed for the accepted conditions of its operation taking into account the arrangement of the channel with enhanced roughness elements. To test the methodology, the hydrometric parameters of the conditional fish passage and spawning channel tract, equipped with enhanced roughness elements, with an average flow velocity of 0.9 m/s was calculated. **Conclusion.** Recommendations for calculating the hydrometric parameters of fish passage and spawning channel tracts with enhanced roughness elements and a methodology for such calculations that meet the requirements of fish farming and biological justification on formation of conditions for fish migration and spawning in their tracts are proposed.

Keywords: river waterworks, fish passage structures, fish passage channels, fish passage and spawning channels, channel hydrometry, channel hydraulics

For citation: Shkura V. N., Shevchenko A. V. Structural solutions and hydrometric parameters of fish passage and spawning channel tracts with elements of enhanced roughness. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024;14(1):205–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-205-224>.

Введение. Проблема восстановления водно- и биоресурсного потенциала и оптимизации водопользования в бассейне Нижнего Дона в настоящее время приобрела особую актуальность, что отмечено в Распоря-

жении Правительства Российской Федерации от 21 июля 2021 г. № 2012-р «План мероприятий («дорожная карта») по оздоровлению и развитию водохозяйственного комплекса реки Дон»¹. Концепция реализации указанного федерального акта предусматривает проведение мероприятий по восстановлению популяций рыб в Азово-Донском рыбопромысловом бассейне и улучшению условий воспроизводства ценных проходных и полупроходных видов рыб. В сложившейся структуре водопользования (использования зарегулированного каскадом гидроузлов водного стока в бассейне) Нижнего Дона условия для естественного воспроизводства рыб могут быть улучшены за счет устройства и использования пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов. В связи с этим, ведется строительство такого рыбоводного объекта в составе Багаевского гидроузла, осуществляются мероприятия по проектированию Кочетовского рыбоходно-нерестового канала, разрабатываются обоснования по реконструкции действующих каналов при Николаевском и Константиновском гидроузлах на р. Дон и ряда других сооружений на ее притоках (р. Северский Донец, Западный Маныч и др.) [1–8]. Реализация указанных проектов сдерживается по причине отсутствия необходимых рекомендаций по рыбоводному и гидротехническому обоснованию и проектированию пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов в действующих нормативных актах².

Рыбоходно-нерестовые каналы предназначены для обеспечения условий для анадромных миграций преимущественно проходных и полупроходных видов рыб в обход водоподпорных сооружений речных низконапорных гидроузлов и их нереста в акваториальном пространстве трактов

¹Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по оздоровлению и развитию водохозяйственного комплекса реки Дон [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства РФ от 21 июля 2021 г. № 2012-р. Доступ из системы «Консультант Плюс».

²Подпорные 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.

каналов. Эффективность функционирования таких каналов определяется степенью соответствия их гидрометрических параметров и конструктивных решений (размеров и расходно-скоростных характеристик) потребностям (биологическим особенностям миграционно-нерестового поведения) рыб. Техничко-экономические и рыбоводческие показатели пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов определяются уровнем учета природно-климатических и хозяйственно-технологических условий создания и использования. Указанные обстоятельства и специфичность рыбоходно-нерестовых каналов (функциональные отличия каналов от иных водопроводящих (гидромелиоративных, коммунальных, судоходных, энергетических и др.) сооружений (каналов)) предопределяют особенности их проектирования, функционирования и эксплуатации. Определенные затруднения при техническом обосновании проектных решений рыбоходно-нерестовых каналов испытывают инженеры-гидротехники при назначении гидрометрических (расходно-скоростных и геометрических) параметров каналов и входящих в их состав конструктивных элементов. В связи с этим, целью и основными задачами исследования были определены нижеследующие.

Цель исследования – разработка предложений по конструированию и методике гидравлического расчета гидрометрических параметров трактов (русел) пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов.

Задачи исследования:

1) разработка предложений по выбору таких исходных гидрометрических параметров каналов, как расход (Q_k , м³/с), средняя скорость потока в тракте (\bar{v}_k , м/с), глубина (h_k , м); формы поперечного сечения тракта и заложения его откосов (m_k), размеров фракций каменно-гравийно-галечного крепления дна и откосов тракта канала ($d_{ш}$, мм); вида, размеров ($x_{ш}, y_{ш}, z_{ш}$, м) и установлению возможности использования элементов усиленной шероховатости (ЭУШ);

2) разработка методики гидравлического расчета трактов рыбоходно-нерестовых каналов, позволяющей определить уклон их дна, геометрические размеры (ширину и протяженность) и другие гидрометрические характеристики, обеспечивающие их эффективное функционирование;

3) апробация методики на примере рыбоходно-нерестового канала с условными, но близкими к реальным гидрометрическими параметрами;

4) разработка конструкций ЭУШ в виде бетонных кубов с элементами их закрепления по дну и откосам трактов рыбоходно-нерестовых каналов в слое гравийно-галечной смеси и грунте.

Материалы и методы. Эмпирическую основу разработок составили: данные обследований и гидрометрических исследований действующих рыбоходно-нерестовых каналов в составе Николаевского, Константиновского и Усть-Манычского гидроузлов; материалы проектных решений и авторские рекомендации по техническому обоснованию проектов Багаевского и Кочетовского рыбоходно-нерестовых каналов. Методическую основу для разработки методики гидравлического расчета составили материалы и результаты авторских исследований и известные рекомендации [9, 10] по определению гидрометрических параметров трактов водопроводящих каналов с усиленной сосредоточенной (сплошной) и рассредоточенной (в виде системно располагаемых по дну канала крупноразмерных (природных или искусственных) элементов) шероховатостью. При разработке конструкций индустриально изготавливаемых бетонных блоков, используемых в качестве ЭУШ, применялись методы поискового конструирования элементов гидросооружений.

Результаты и обсуждение. При решении первой задачи исследования рекомендуется использовать материалы рыбоводно-биологического обоснования проектов таких сооружений и руководствоваться сложившейся практикой проектирования и эксплуатации действующих рыбо-

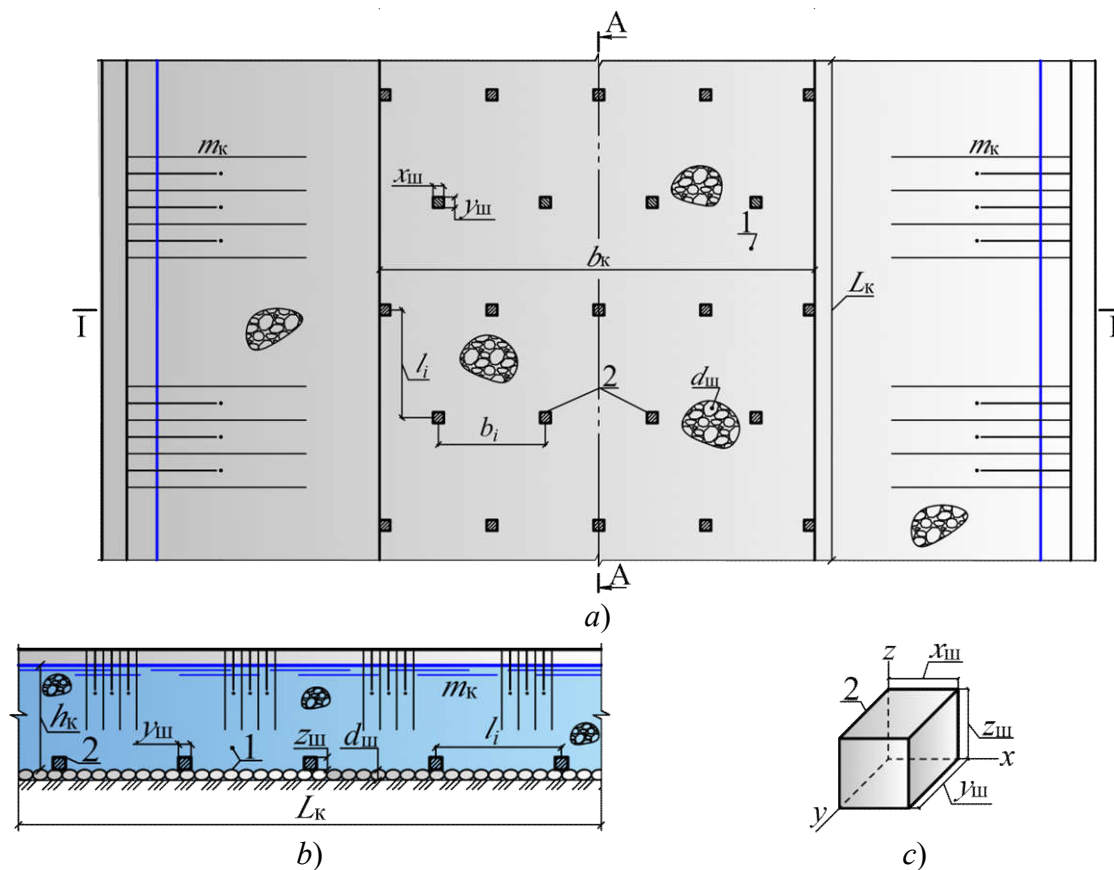
ходно-нерестовых каналов. Расход потока в канале принимается на уровне 20,0–30,0 % от расхода, сбрасываемого водопропускными сооружениями гидроузла в его нижний бьеф, что позволяет при соответствующем конструктивном исполнении канала обеспечить заход в него до 60 % мигрирующих по реке рыб. Средняя скорость течения потока в трактах таких каналов принимается на уровне крейсерских скоростей плавания рыб [11], а для обеспечения захода мигрантов из реки в канал должна соответствовать значениям привлекающих скоростей. Глубины потока, приемлемые для прохода проходных и полупроходных видов рыб по рыбоходным и рыбоходно-нерестовым каналам и их нереста, судя по данным Д. С. Павлова, М. А. Скоробогатова, В. Н. Мартыненко и собственным данным одного из авторов статьи В. Н. Шкуры [11–13]³, соответствуют $h_k = 2,0 \dots 3,0$ м. Крепление русел каналов, используемое в качестве нерестового субстрата для литофильных рыб, рекомендуется устраивать отсыпкой слоев гравийно-галечной смеси с размером гравия и гальки (отсыпаемых по дну и откосам) в пределах 30,0–80,0 мм и камней, укладываемых по дну канала. В соответствии со сложившейся практикой, форма поперечного сечения тракта канала в настоящем исследовании принимается трапецеидальной, а заложение его откосов от 1:2,5 до 1:3,5. Возможность использования ЭУШ, устанавливаемых по дну, в виде крупного камня размером 0,25–0,35 м или заменяющих его бетонных кубов (с размером стороны от 0,2 до 0,4 м) и схема их установки определяются рекомендациями рыбоводно-биологического обоснования проекта и результатами гидравлического расчета канала [11].

При решении второй задачи (в качестве базовых) используются известные подходы и методики гидравлического расчета каналов, функционирующих в условиях равномерного установившегося движения потока в

³Павлов Д. С. Биологические основы управления поведением рыб в потоке воды. М.: Наука, 1979. 320 с.

открытом русле, и рекомендации по учету влияния ЭУШ на гидрометрические параметры их трактов [14–18]^{4, 5, 6}.

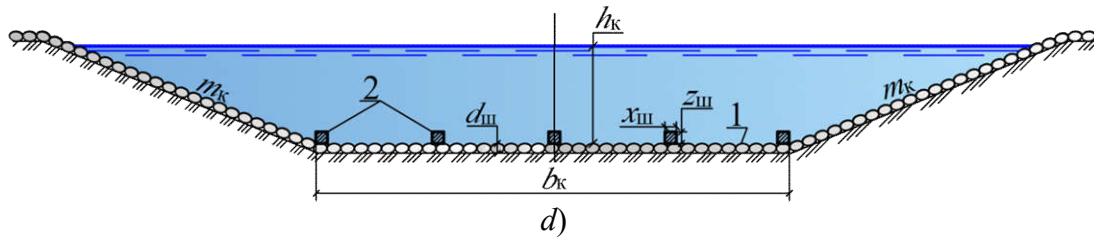
Отметим, что известные рекомендации по расчету каналов с ЭУШ разработаны для скоростных и геометрических параметров, не в полной мере соответствующих условиям функционирования рыбоходно-нерестовых каналов (по скоростным и глубинным параметрам, уклонам дна и виду покрытия их русел). Указанное выше обстоятельство потребовало разработки соответствующей методики гидравлического расчета, предусматривающей выполнение ряда расчетных операций с использованием схемы, проиллюстрированной рисунком 1.



⁴Гордиенко П. И. Гидравлические сопротивления при бурных потоках в шероховатых руслах // Труды координационных совещаний по гидротехнике. М.: Энергия, 1969. Вып. 52. С. 3–50.

⁵Рябов А. К. Гидравлический расчет русел с искусственной шероховатостью // Гидротехническое строительство. 1967. № 9. С. 42–45.

⁶Альтшуль А. Д., Санжиев А. Д. О влиянии относительной шероховатости на гидравлическое сопротивление русел с усиленной шероховатостью // Сборник трудов № 189 / МИСИ. 1983. С. 25–31.



a – план; *b* – продольный разрез А–А; *c* – пространственный вид на ЭУШ; *d* – сечение I–I; 1 – тракт канала; 2 – ЭУШ; $d_{ш}$ – средний диаметр фракций крепления дна и откосов канала, мм; l_i, b_i – размеры сетки размещения ЭУШ, м; $x_{ш}, y_{ш}, z_{ш}$ – размеры ЭУШ, м; h_k, b_k – глубина и ширина канала; L_k – протяженность тракта, м; m_k – заложение откосов

a – plan; *b* – longitudinal section A–A; *c* – spatial view of enhanced roughness elements; *d* – section I–I; 1 – channel track; 2 – elements of enhanced roughness; d_{sh} – average diameter of the fractions of fastening the bottom and slope ratio, mm; l_i, b_i – dimensions of the placement grid of enhanced roughness elements, m; x_{sh}, y_{sh}, z_{sh} – dimensions of enhanced roughness elements, m; h_k, b_k – channel depth and width; L_k – tract length, m; m_k – slope ratio

Рисунок 1 – Схема к расчету тракта рыбоходно-нерестового канала с гравийно-галечным покрытием его русла, обустроенного элементами усиленной шероховатости по дну

Figure 1 – Scheme for calculating the fish passage and spawning channel tract with gravel and pebble coating of its bed, equipped with elements of enhanced roughness

1 В соответствии с исходными гидрологическими, геологическими, топографическими, ихтиологическими данными, условиями компоновки и параметрами гидроузла и режимом его функционирования принимаются: расход канала ($Q_k, \text{м}^3/\text{с}$); расчетный перепад уровней воды на гидроузле в период функционирования канала ($\Delta Z_k, \text{м}$); средняя скорость течения в канале ($\bar{v}_k, \text{м}/\text{с}$); глубина водного потока в тракте ($h_k, \text{м}$); трапецидальная форма поперечного сечения русла и заложение откосов тракта канала m_k .

2 Для принятых по п. 1 исходных параметров рыбоходно-нерестового канала и с использованием общепринятой методики гидравлического расчета трактов водотransпортирующих каналов определяется следующее:

- площадь поперечного сечения русла канала – $\omega_k, \text{м}^2$:

$$\omega_k = Q_k / \bar{v}_k ;$$

- ширина тракта канала трапецидального сечения по дну – $b_k, \text{м}$:

$$b_k = \frac{\omega_k}{h_k} - m_k \cdot h_k;$$

- смачиваемый водой периметр канального русла – χ_k , м:

$$\chi_k = b_k + 2\sqrt{(m_k \cdot h_k)^2 + h_k^2};$$

- гидравлический радиус живого сечения водного потока – R_k , м:

$$R_k = \omega_k / \chi_k. \quad (1)$$

3 Принимая покрытие русла (дна и откосов) канала слоем гравийно-галечной смеси с размером отдельностей $d_{ш}$, мм, определяют:

- эффективную высоту выступов шероховатости смеси крепления дна и откосов тракта рыбоходно-нерестового канала – $\Delta_{осн}$, мм:

$$\Delta_{осн} = 0,785 \cdot d_{ш};$$

- расчетное значение коэффициента шероховатости русла, формируемого основным гравийно-галечным покрытием дна и откосов канала:

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

4 С учетом данных биологического обоснования и предварительно рассчитанных в п. 2 гидрометрических параметров русла (тракта) канала принимаются параметры ЭУШ (бетонные блоки (кубы) размером $x_{ш} \times y_{ш} \times z_{ш} = 0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м) со схемой их установки по дну канала (располагаются в шахматном порядке по углам сетки с размерами от $l_i \times b_i = 1,0 \times 1,0$ до $l_i \times b_i = 4,0 \times 4,0$) и определяются:

- эффективная высота выступов усиленной (дополнительной) шероховатости размером $z_{ш}$ в соответствии с формулой:

$$\Delta_{доп} = 0,785 \cdot z_{ш};$$

- значение формируемого блоками коэффициента дополнительной шероховатости по приведенному ниже соотношению:

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

где $x_{ш}$, $y_{ш}$ и $z_{ш}$ – размеры бетонных блоков по направлению течения, перпендикулярно вектору скорости и по высоте потока (по рисунку 1), м;

l_i и b_i – размеры шахматной сетки вдоль и поперек водного потока, м;

- расчетное значение коэффициента шероховатости дна канала $(k_{ш})_{дна}$:

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

5 При известных значениях коэффициентов шероховатости откосов $(k_{ш})_{отк} = (k_{ш})_{осн}$ и дна $\sum(k_{ш})_{дна}$ канала определяется средневзвешенное значение коэффициента шероховатости канального русла \bar{k}_k :

$$\bar{k}_k = \frac{(k_{ш})_{дна} \cdot b_k + 2(k_{ш})_{отк} \cdot l_{отк}}{b_k + 2l_{отк}}, \quad (2)$$

где $l_{отк} = \sqrt{h_k^2 + (m_k \cdot h_k)^2}$ – протяженность откоса тракта канала, м.

6 Используя установленные ранее значения R_k (по зависимости (1)) и \bar{k}_k (по формуле (2)), определяют значения скоростного параметра или коэффициента скорости (известного как параметр А. Шези – C_k , м^{0,5}/с).

Значение скоростного параметра C_k , м^{0,5}/с, рекомендуется определять по известным зависимостям И. И. Агроскина, Н. Н. Павловского, Д. В. Штеренлихта и др., соответствующим условиям устройства и функционирования рыбоходно-нерестовых каналов, или по авторской зависимости, полученной по материалам гидрометрических исследований Николаевского и Константиновского рыбоходно-нерестовых каналов, приемлемой для диапазонов $0,025 \leq \bar{k}_k \leq 0,035$ и $1,35 \leq R_k \leq 2,40$ м и имеющей вид:

$$C_k = \frac{1}{\bar{k}_k} + \frac{0,11}{\bar{k}_k} R_k^{\bar{k}_k}.$$

7 Устанавливается расчетное значение уклона дна канала $(I_k)_{\text{дна}}$:

$$(I_k)_{\text{дна}} = \bar{v}_k / (C_k^2 R_k).$$

Полученное расчетом значение уклона дна сопоставляется со значением уклона свободной поверхности воды $(I_k)_{\text{в/п}}$, определенного по формуле:

$$(I_k)_{\text{в/п}} = \Delta Z_k / L_k,$$

где L_k – протяженность тракта канала от входного (для рыб) до выходного створа, определяемая по топографическому плану (карте) по предварительно намеченной трассе его расположения на выбранном участке местности, м.

При соответствии значений уклона дна канала значению уклона свободной поверхности воды $(I_k)_{\text{дна}} = (I_k)_{\text{в/п}}$ расчетные значения параметров рыбоходно-нерестового канала принимаются за проектные для последующего проектирования составляющих его конструктивных элементов.

При несоответствии значений $(I_k)_{\text{дна}}$ и $(I_k)_{\text{в/п}}$ изменяют (методом последовательных итераций) протяженность тракта рыбоходно-нерестового канала L_k или параметры шероховатости его русла (тракта), добиваясь необходимого равенства значений уклонов дна и водной поверхности.

Алгоритм расчетных операций, выполняемых в соответствии с разработанной методикой, приведен на рисунке 2 в виде блок-схемы.

Апробация предложенной методики осуществлена на примере гидравлического расчета условного тракта канала с креплением трапецидального русла слоем разноразмерной гравийно-галечниковой смеси и устройством по его дну ЭУШ в виде кубов.

Исходными данными к гидравлическому расчету гидрометрических параметров канала являются: $Q_k = 100 \text{ м}^3/\text{с}$; $h_k = 2,5 \text{ м}$; $\bar{v}_k = 0,90 \text{ м/с}$; $m_k = 3,5$; $\Delta Z_k = 2,80 \text{ м}$; $d_{\text{ш}} = 55 \text{ мм}$; $x_{\text{ш}} = y_{\text{ш}} = z_{\text{ш}} = 0,3 \text{ м}$; $l_i = b_i = 3,0 \text{ м}$.

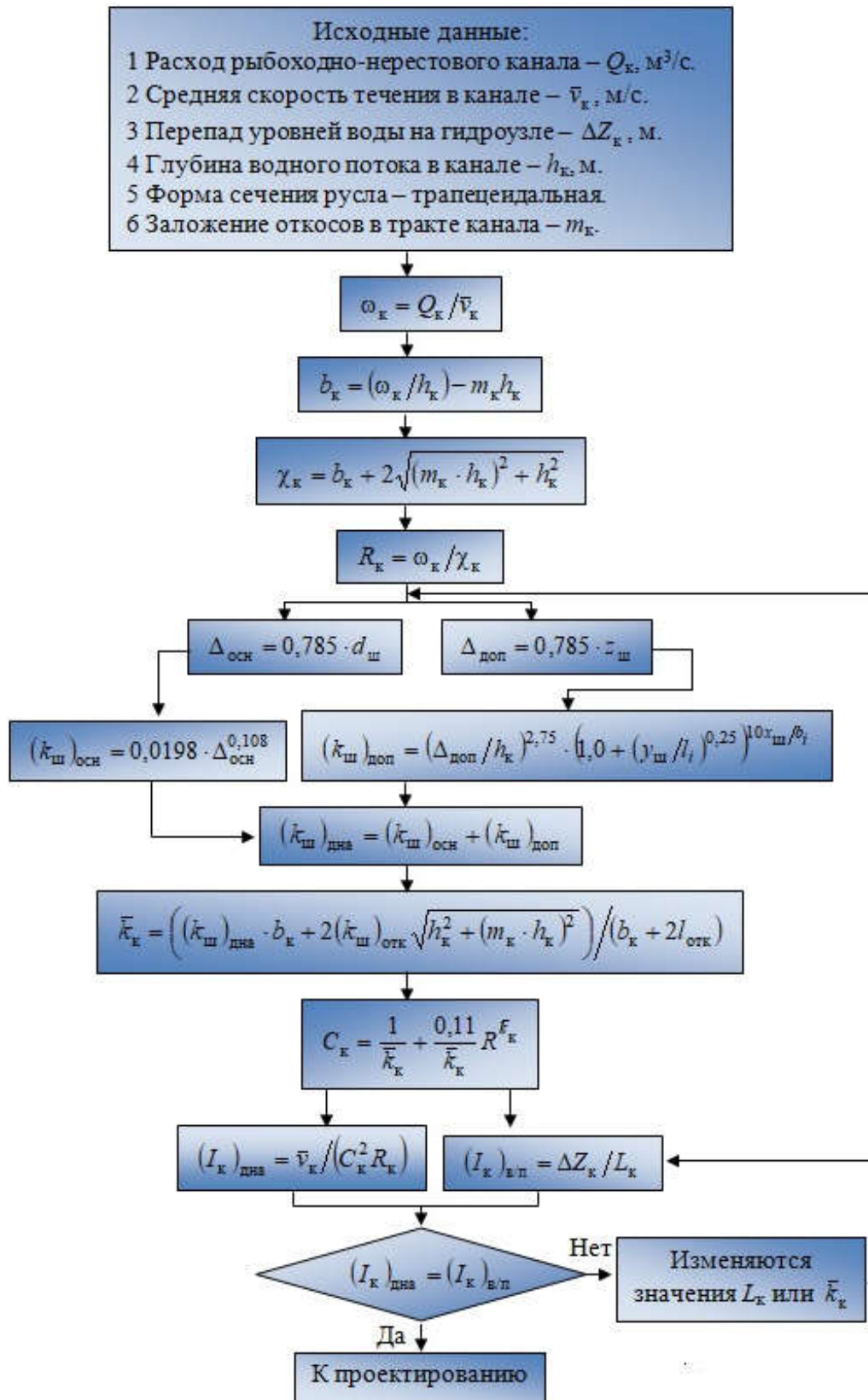


Рисунок 2 – Блок-схема расчета рыбоходно-нерестового канала, обустроенного элементами усиленной шероховатости по дну

Figure 2 – Flow chart for calculating the fish passage and spawning channel, equipped with enhanced roughness elements along the bottom

1 Величина необходимой площади живого сечения потока, при которой обеспечивается пропуск по рыбоходно-нерестовому каналу расхода $Q_k = 100 \text{ м}^3/\text{с}$ со средней скоростью его течения $\bar{v}_k = 0,90 \text{ м/с}$, составит:

$$\omega_k = 100/0,90 = 111,1 \text{ м}^2.$$

2 При заданных значениях глубины потока в канале $h_k = 2,5 \text{ м}$ и коэффициенте заложения откосов $m_k = 3,5$ ширина канала по дну будет равна:

$$b_k = \frac{111,1}{2,5} - 3,5 \cdot 2,5 = 35,7 \text{ м}.$$

3 Смоченный периметр тракта рыбоходно-нерестового канала χ_k , м, при соответствующих значениях b_k , h_k и m_k соответственно составит:

$$\chi_k = 35,7 + 2 \cdot 2,5 \sqrt{1,0 + 3,2^2} = 53,90 \text{ м}.$$

4 Гидравлический радиус R_k тракта канала при установленных в ходе ранее проведенных расчетов значениях параметров ω_k и χ_k будет равен:

$$R_k = 111,1/53,90 = 2,06 \text{ м}.$$

5 Для принятого среднего размера отдельностей гравийно-галечного (основного) покрытия дна и откосов (русла) канала $d_{\text{ш}} = 55 \text{ мм}$ эффективная высота выступов шероховатости $\Delta_{\text{осн}}$, мм, соответственно составит:

$$\Delta_{\text{осн}} = 0,785 \cdot 55 = 43,18 \text{ мм}.$$

6 Коэффициент шероховатости $(k_{\text{ш}})_{\text{осн}}$ основного покрытия русла:

$$(k_{\text{ш}})_{\text{осн}} = 0,0198 \cdot 43,18^{0,108} = 0,0297.$$

7 Величина эффективной (оказывающей влияние на скоростной режим водного потока, движущегося по тракту рыбоходно-нерестового канала) высоты выступов ЭУШ в виде установленных по его дну кубов высотой $z_{\text{ш}} = 0,3 \text{ м}$ составит:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,785 \cdot 0,3 = 0,236 \text{ м}.$$

8 Элементы усиленной шероховатости с эффективной высотой выступов $\Delta_{\text{доп}} = 0,236 \text{ м}$ и размерами $y_{\text{ш}} = x_{\text{ш}} = 0,3 \text{ м}$, установленные по дну

канала в шахматном порядке по сетке с размерами $l_i = b_i = 3,0$ м, обеспечивают величину дополнительного коэффициента шероховатости $(k_{ш})_{доп}$:

$$(k_{ш})_{доп} = \left(\frac{0,236}{2,5}\right)^{2,75} \times \left[1,0 + \left(\frac{0,3}{3,0}\right)^{0,25}\right]^{10 \cdot 0,3/3,0} = 0,00371.$$

9 Коэффициент шероховатости дна канала $(k_{ш})_{дна}$ составит:

$$(k_{ш})_{дна} = 0,0297 + 0,00371 = 0,0334.$$

10 Среднее значение коэффициента шероховатости $\bar{k}_к$ равняется:

$$\bar{k}_к = \frac{0,0334 \cdot 35,70 + 2 \cdot 0,0297 \cdot \sqrt{2,5^2 + (3,5 \cdot 2,5)^2}}{35,70 + 2 \cdot \sqrt{2,5^2 + (3,5 \cdot 2,5)^2}} = 0,0321.$$

11 Определяется значение скоростного параметра Шези – $C_к$:

$$C_к = \frac{1}{0,0321} + \frac{0,11}{0,0321} 2,06^{0,0321} = 34,66 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

12 Продольный уклон дна $I_к$ рыбоходно-нерестового канала при принятых значениях средней по живому сечению скорости $\bar{v}_к$, скоростном параметре $C_к$ и гидравлическом радиусе $R_к$ будет равен:

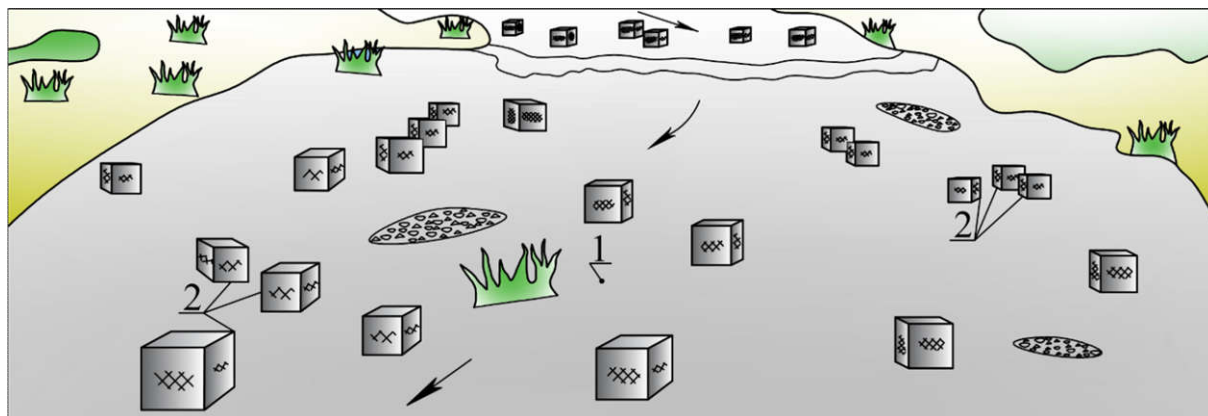
$$I_к = 0,90^2 / 34,66^2 \cdot 2,06 = 0,000327.$$

13 Необходимая для эффективного гашения кинетической энергии (скорости) водного потока протяженность тракта канала $L_к$ составит:

$$L_к = 2,8 / 0,000327 = 8555,0 \text{ м}.$$

При необходимости (по топографическим и экономическим соображениям) уменьшить протяженность канала рассматривается вариант размещения ЭУШ по сетке менее $3,0 \times 3,0$ м.

Одной из проблем, имеющих место при эксплуатации рыбоходно-нерестовых каналов, является смещение водным потоком ЭУШ (в виде бетонных кубов), размещенных по площади (дну и откосам) их трактов, что проиллюстрировано на рисунках 3, 4.



1 – тракт канала; 2 – ЭУШ размером $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м

1 – channel tract; 2 – elements of enhanced roughness with dimensions of $0.3 \times 0.3 \times 0.3$ m

Рисунок 3 – Вид расположения элементов усиленной шероховатости в тракте рыбоходно-нерестового канала

Figure 3 – View of the arrangement of elements of enhanced roughness in the fish passage and spawning channel tract



a – после строительства; *b* – после ввода в эксплуатацию

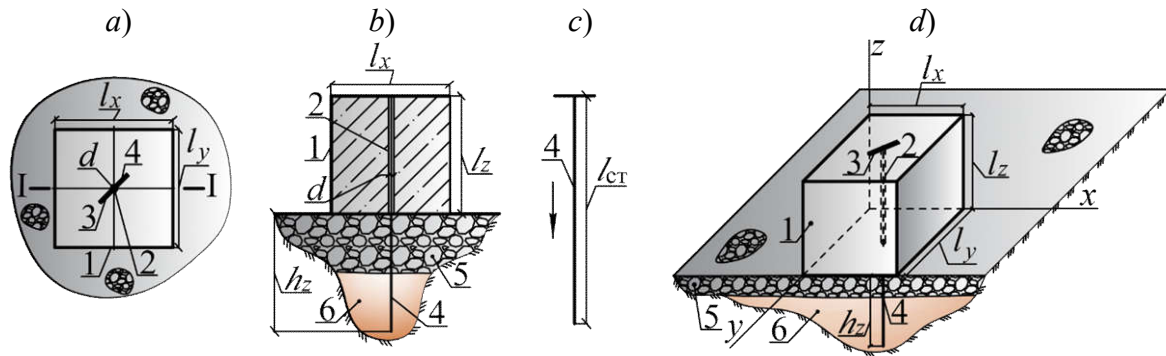
a – after construction; *b* – after putting into operation

Рисунок 4 – Состояние элементов усиленной шероховатости в тракте рыбоходного канала (автор фото В. Н. Шкура)

Figure 4 – State of elements of enhanced roughness in the fish passage channel tract (photo by V. N. Shkura)

Для нейтрализации имеющего место недостатка в части смещения ЭУШ по руслу канала предлагается использование их конструкций, проиллюстрированных рисунками 5, 6.

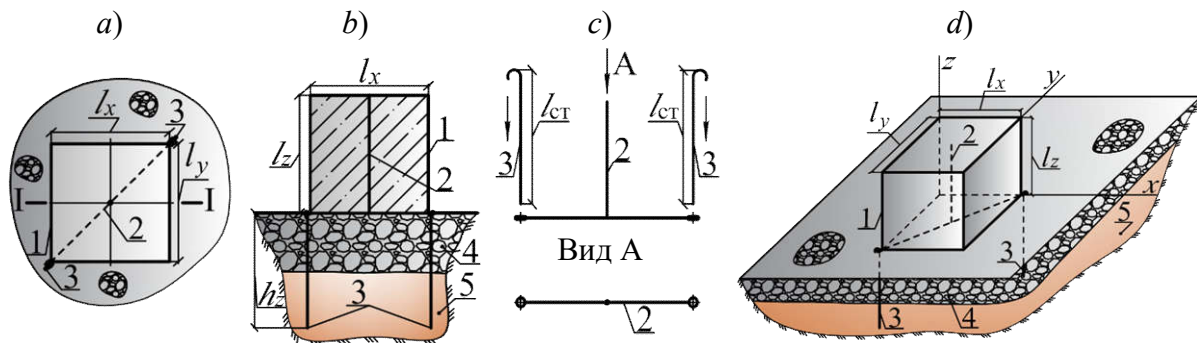
Конструктивное решение по рисунку 5 основано на рекомендациях, представленных в работе Ю. М. Косиченко и др. [15], и предусматривает крепление ЭУШ ко дну и откосам тракта канала посредством металлического стержня Т-образного исполнения, пропускаемого сквозь тело элемента в центральной его части и загоняемого в крепление канала и грунт под ним.



a – план; *b* – поперечное сечение I–I; *c* – вид на фиксатор; *d* – пространственный вид; *x*, *y*, *z* – направление осей системы координат; l_x , l_y , l_z – линейные размеры ЭУШ по осям, м; d – диаметр полый трубки в теле куба, м; $l_{ст}$ – длина металлического стержня, м; h_z – глубина погружения стержня в каменно-грунтовую толщу дна канала, м; 1 – ЭУШ (бетонный куб); 2 – полая трубка; 3 – желоб-фиксатор; 4 – металлический стержень; 5 – крепление дна канала; 6 – грунт

a – plan; *b* – cross section I–I; *c* – view of the lock; *d* – spatial view; *x*, *y*, *z* – direction of the coordinate system axes; l_x , l_y , l_z – linear dimensions of the enhanced roughness element along the axes, m; d – diameter of the hollow tube in the cube body, m; l_{st} – length of the metal rod, m; h_z – depth of immersion of the rod into the rock-soil layer of the channel bottom, m; 1 – enhanced roughness element (concrete cube); 2 – hollow tube; 3 – lock groove; 4 – metal rod; 5 – channel bottom fastening; 6 – soil

Рисунок 5 – Конструкция элемента усиленной шероховатости с креплением центральной части посредством металлического стержня
Figure 5 – Design of an enhanced roughness element with fastening of the central part using a metal rod



a – план; *b* – поперечное сечение I–I; *c* – вид на фиксаторы и кольцевой стержень; *d* – пространственный вид; *x*, *y*, *z* – направление координатных осей; 1 – ЭУШ (железобетонный куб); 2 – центральный стержень; 3 – стержни-фиксаторы; 4 – крепление дна канала; 5 – грунт

a – plan; *b* – cross section I–I; *c* – view of the locks and the ring rod; *d* – spatial view; *x*, *y*, *z* – direction of coordinate axes; 1 – enhanced roughness element (reinforced concrete cube); 2 – central rod; 3 – fixing rods; 4 – channel bottom fastening; 5 – soil

Рисунок 6 – Крепление элемента усиленной шероховатости с использованием кольцевого стержня
Figure 6 – Fastening the enhanced roughness element using a ring rod

Более надежный вариант крепления, предупреждающий проворачивание ЭУШ вокруг оси (под воздействием потока), предусматривает их крепление ко дну и откосам канала посредством двух стержней с дугообразными верхними частями, прижимающих кольца центрального стержня к каменно-гравийному креплению русла.

Представленные конструктивные решения ЭУШ выбираются в зависимости от расходно-скоростных параметров канала, вида используемого крепления русла и характеристик грунта.

Выводы

1 Установлена потребность в разработке обобщенной методики гидравлического расчета трактов рыбоходно-нерестовых каналов, обустроенных элементами усиленной шероховатости, и их конструктивных решений.

2 Разработана методика гидравлического расчета трактов рыбоходно-нерестовых каналов, обустроенных элементами усиленной шероховатости, располагаемыми по дну русла в шахматном порядке.

3 Предложены конструктивные решения элементов усиленной шероховатости, размещаемых по дну и откосам трактов рыбоходно-нерестовых каналов, нейтрализующие их перемещение водным потоком.

Список источников

1. Гайдаев С. К. Рыбоводные сооружения низконапорного Багаевского гидроузла на реке Дон // Гидротехника. 2019. № 2(55). С. 22–25. EDN: BWIVWO.

2. Шурухин Л. А. Багаевский гидроузел: инженерные решения и итоги проектирования // Гидротехника. 2018. № 3. С. 41–46.

3. Масленников Л. Е. О состоянии строительства Багаевского гидроузла на реке Дон // Гидротехника. 2021. № 3(64). С. 5–7. EDN: QLSDGT.

4. Анохин А. М., Копадзе И. З., Донцов А. А. Обеспечение безопасности прохода рыб на нерест на примере Кочетовского гидроузла на реке Дон // Безопасность техногенных и природных систем. 2018. № 3–4. С. 79–86. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2018-3-4-79-86>. EDN: YSOBJB.

5. Анохин А. М., Щепкина В. А. Программа возрождения рыбных запасов юга России «Серебряный поток Дона» // Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем: материалы Международ. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Аз. науч.-исслед. ин-та рыб. хоз-ва. 2018. С. 102–105. EDN: VXXZAC.

6. Шкура В. Н., Шевченко А. В. Рыбоходно-нерестовый канал в составе Кочетовского гидроузла на реке Дон (варианты компоновочно-конструктивных решений) //

Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2023. Т. 17, № 2(205). С. 129–142. DOI: 10.33920/sel-09-2302-06.

7. 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.

8. Баев О. А., Шевченко А. В. О реконструкции Усть-Маньчских рыбоходных каналов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023. № 1(89). С. 80–90. EDN: JNCGAS.

9. Чистяков А. А. Конструкции рыбоходов / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. Новочеркасск: Темп, 2006. 532 с.

10. Шкура Вл. Н. Рыбоводные мелиорации малых и средних степных рек (обоснование путей и средств их реализации): монография / Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т ДГАУ. Новочеркасск, 2015. 197 с.

11. Шкура В. Н. Рыбопропускные сооружения. В 2 ч. М.: Рома, 1999. 729 с.

12. Павлов Д. С., Скоробогатов М. А. Миграции рыб в зарегулированных реках. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2014. 413 с.

13. Мартыненко В. Н. Рыбоходный канал в составе гидроузла // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2020. № 5. С. 150–152.

14. Барышников Н. Б., Дрегваль М. С. Гидравлические сопротивления речных русел // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии: сб. докл. Междунар. науч. конф. памяти выдающегося рус. гидролога Юрия Борисовича Виноградова, г. Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г. / под ред. О. М. Макарьевой. СПб.: Научном. технологии, 2018. С. 695–697. EDN: XUSTRZ.

15. 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: 10.10.2023). EDN: ZRWIVL.

16. Боровской В. П., Гарбуз А. Ю., Баев О. А. Методика гидравлического расчета нерестового канала с разнофракционным гравийно-галечниковым покрытием русла // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2018. № 1(29). С. 233–248. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=923> (дата обращения: 10.10.2022). EDN: YOTSNF.

17. Baki A. V. M., Azimi A. N. Hydraulics and design of fishways II: vertical-slot and rock-weir fishways // Journal of Ecohydraulics. 2021, Sept. <https://doi.org/10.1080/24705357.2021.1981780>.

18. Анохин А. М. Выбор оптимальной высоты элементов искусственной шероховатости в рыбоходных каналах // Рыбозащитные сооружения и устройства: сб. науч. тр. / Гос. комис. Совета Министров СССР по продовольствиям и закупкам; Новочеркас. ордена «Знак Почета» инж.-мелиоратив. ин-т им. А. К. Картунова. Новочеркасск, 1989. С. 34–40.

References

1. Gaidaev S.K., 2019. *Rybovodnye sooruzheniya nizkonapornogo Bagaevskogo gidrouzla na reke Don* [Fishways of the Bagaevsky low-head waterworks on the Don River]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 2(55), pp. 22-25, EDN: BWIVWO. (In Russian).

2. Shurukhin L.A., 2018. *Bagaevskiy gidrouzel: inzhenernye resheniya i itogi proektirovaniya* [Bagaevsky waterworks: engineering solutions and design results]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 3, pp. 41-46. (In Russian).

3. Maslennikov L.E., 2021. *O sostoyanii stroitel'stva Bagaevskogo gidrouzla na reke Don* [On the construction progress of the Bagaevsky waterworks on the Don River]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 3(64), pp. 5-7, EDN: QLSDGT. (In Russian).

4. Anokhin A.M., Kopadze I.Z., Dontsov A.A., 2018. *Obespechenie bezopasnosti prokhoda ryb na nerest na primere Kochetovskogo gidrouzla na reke Don* [Providing safety of fish passage to spawning ground on the example of the Kochetovsky waterworks facility on the river Don]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem* [Safety of Technogenic and Natural Systems], no. 3-4, pp. 79-86, <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2018-3-4-79-86>, EDN: YSOBJB. (In Russian).

5. Anokhin A.M., Shchepkina V.A., 2018. *Programma vozrozhdeniya rybnyykh zapasov yuga Rossii "Serebryanyy potok Dona"* [Program of revival of fish stocks in the south of Russia "The Silver Stream of the Don"]. *Aktual'nye voprosy rybolovstva, rybovodstva (akvakul'tury) i ekologicheskogo monitoringa vodnykh ekosistem: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu Azovskogo nauchno-issled. instituta rybnogo khozyaystava* [Current Issues of Fisheries, Fish Breeding (Aquaculture), and Ecological Monitoring of Aquatic Ecosystems: Proc. of the International Scientific-Practical Conference, Dedicated to the 90th Anniversary of Azov Sea Research Fisheries Institute], pp. 102-105, EDN: VXXZAC. (In Russian).

6. Shkura V.N., Shevchenko A.V., 2023. *Rybokhodno-nerestovyy kanal v sostave Kochetovskogo gidrouzla na reke Don (varianty komponovochno-konstruktivnykh resheniy)* [Fish passage and spawning channel as a part of the Kochetovsky waterworks on the Don River (options for layout and design solutions)]. *Rybovodstvo i rybnoe khozyaystvo* [Fish Breeding and Fisheries], vol. 17, no. 2(205), pp. 129-142, DOI: 10.33920/sel-09-2302-06. (In Russian).

7. Shkura V.N., Shevchenko A.V., 2022. *Rybokhodno-nerestovyye kanaly kak sredstvo uluchsheniya usloviy vosproizvodstva ryb na Nizhnem Donu* [Fish spawning channels as a means of improving fish reproduction conditions 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).

8. Baev O.A., Shevchenko A.V., 2023. *O rekonstruktsii Ust'-Manychskikh rybokhodnykh kanalov* [On the reconstruction of the Ust'-Manych fish passage]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 1(89), pp. 80-90, EDN: JNCGAS. (In Russian).

9. Chistyakov A.A., 2006. *Konstruktсии rybokhodov* [Designs of Fish Passages]. Novocherkassk State Land Reclamation Academy, Novocherkassk, Temp Publ., 532 p. (In Russian).

10. Shkura V.N., 2015. *Rybovodnye melioratsii malyykh i srednikh stepnykh rek (obosnovanie putey i sredstv ikh realizatsii): monografiya* [Fish-Breeding Reclamation of Minor and Medium-Sized Steppe Rivers (Substantiation of Ways and Means of Their Implementation): monograph]. Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute of DSAU, Novocherkassk, 197 p. (In Russian).

11. Shkura V.N., 1999. *Rybopropusknyye sooruzheniya* [Fish Passage Structures]. In 2 parts, Moscow, Roma Publ., 729 p. (In Russian).

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

13. Martynenko V.N., 2020. *Rybokhodnyy kanal v sostave gidrouzla* [Fishing passage 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. (In Russian).

14. Baryshnikov N.B., Dregval M.S., 2018. *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel* [Hydraulic resistance of fluvial channels]. *Tret'i vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa Yu. B. Vinogradova* [Third Vinogradov Readings.

Facets of Hydrology: Collection of Reports of International Scientific Conference in Memory of the Outstanding Russian Hydrologist Y. B. Vinogradov]. St. Petersburg, Science Technology Publ., pp. 695-697, EDN: XUSTRZ. (In Russian).

15. Kosichenko Yu.M., Shkura V.N., Baev O.A., Kosichenko M.Yu., 2017. [Hydraulic calculation of the fish 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 10.10.2023], EDN: ZRWIVL. (In Russian).

16. Borovskoy V.P., Garbuz A.Yu., Baev O.A., 2018. [Methodology of hydraulic calculation of a spawning channel with multifractional gravel-pebble channel coating]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(29), pp. 233-248, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=923> [accessed: 10.10.2022], EDN: YOTSNF. (In Russian).

17. Baki A.B.M., Azimi A.H., 2021. Hydraulics and design of fishways II: vertical-slot and rock-weir fishways. *Journal of Ecohydraulics*, Sept., <https://doi.org/10.1080/24705357.2021.1981780>.

18. Anokhin A.M., 1989. *Vybor optimalnoy vysoty elementov iskusstvennoy sherohovatosti v rybokhodnykh kanalakh* [The choice of the optimum height of artificial roughness elements in fish channels]. *Rybozashhitnye sooruzheniya i ustroystva: sb. nauch. tr.* [Fish Protection Structures and Facilities: collection of scientific papers]. State Commission of the Council of Ministers of the USSR on Food and Procurement, Novochoerkassk Order of “Badge of Honor” Engineering and Land Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Novochoerkassk, pp. 34-40. (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 04.12.2023; одобрена после рецензирования 22.12.2023; принята к публикации 30.01.2024.

The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 22.12.2023; accepted for publication 30.01.2024.