

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 626.885

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-244-263

Конструирование и расчет трактов пригидроузловых 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: разработка рекомендаций по конструированию и методик расчета расходно-скоростных и геометрических параметров рыбоходно-нерестовых каналов, устраиваемых при крупных речных гидроузлах. **Материалы и методы.** Фактологическую базу предложенных разработок составили материалы обследования действующих Николаевского и Константиновского рыбоходно-нерестовых каналов и проектные материалы по строящемуся Багаевскому рыбоходно-нерестовому каналу на р. Дон. Методологию разработок составили научные методы анализа и синтеза информационного материала и технологии поискового конструирования рыбоводных сооружений. **Результаты.** Данные обследования функционирующих пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов и анализ их проектных решений позволили установить подходы к определению и диапазоны расходно-скоростных и геометрических параметров, форм поперечных сечений их трактов и зон отдыха рыб, а также подходы к выбору их компоновочно-конструктивных решений. С учетом и на базе исходной информации предложена общая методология проектирования (обоснований, расчетов и конструирования) трактов рыбоходно-нерестовых каналов и методика их гидравлического расчета. При разработке общих и частных рекомендаций учитывались известные данные о биологических особенностях анадромно-миграционного поведения и плавательной способности рыб. Предложенные разработки адаптированы к условиям предложенного компоновочно-конструктивного решения Кочетовского рыбоходно-нерестового канала на р. Дон. **Выводы.** Приведены материалы обследования действующих рыбоходно-нерестовых каналов, устроенных при Николаевском и Константиновском гидроузлах, а также результаты анализа проектного решения канала в составе строящегося Багаевского гидроузла на р. Дон. Предложен методологический подход к разработке конструктивных решений и методики расчета геометрических параметров трактов рыбоходно-нерестовых каналов.

Ключевые слова: рыбоходно-нерестовые каналы, конструирование трактов каналов, расчет параметров каналов, трассы рыбоходно-нерестовых каналов, анадромно-мигрирующие рыбы, зоны отдыха и нереста рыб

Для цитирования: Шкура В. Н., Шевченко А. В. Конструирование и расчет трактов пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 3. С. 244–263. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-244-263>.

HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Design and calculation of fish pass and spawning channel tracts at waterworks

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: development of recommendations for design and calculation procedure of the flow rate and geometric parameters of fish pass and spawning channels arranged at large river waterwork facilities. **Materials and methods.** The factual base for the proposed developments were survey materials for the existing Nikolaevsky and Konstantinovsky fish pass and spawning channels and design materials for the Bagaevsky fish pass and spawning channel under construction on the river Don. The development methodology was based on scientific methods of analysis and synthesis of information and technologies for the search design of fish breeding facilities. **Results.** The survey data of the operating fish pass and spawning canals at waterworks and the analysis of their design solutions made it possible to establish approaches to determining and the ranges of flow rate and geometric parameters, cross-sectional shapes of their tracts and fish recreation areas, as well as approaches to the choice of their layout and design solutions. Taking into account on the basis of the initial information, a general methodology for designing (substantiations, calculations and construction) fish pass and spawning canals and a method for their hydraulic calculation are proposed. When developing general and particular recommendations, known data on the biological features of anadromous-migratory behavior and the fish swimming ability were taken into account. The proposed developments are adapted to the conditions of the proposed layout and design solution of the Kochetovsky fish pass and spawning canal on the river Don. **Conclusion.** The survey materials of the existing fish pass and spawning canals, arranged at the Nikolaevsky and Konstantinovsky waterworks, as well as the results of the analysis of the design solution of the canal as part of the Bagaevsky waterworks under construction on the river Don. A methodological approach to the development of constructive solutions and methods for calculating the geometric parameters of the fish pass and-spawning channels tracts is proposed.

Keywords: fish pass and spawning channels, canal tracks designing, canal parameters calculation, routes of fish pass and spawning channels, anadromous migratory fish, fish recreation and spawning areas

For citation: Shkura V. N., Shevchenko A. V. Design and calculation of fish pass and spawning channel tracts at waterworks. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(3):244–263. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-244-263>.

Введение. Обязательным требованием при создании речных гидрозлов является обеспечение пропуска через них рыб к местам их нереста. Указанная задача может решаться устройством рыбоходно-нерестовых каналов [1–5]. Примерами таких сооружений являются Николаевский и Константиновский, строящийся Багаевский и проектируемый Кочетовский ры-

рыбоходно-нерестовые каналы. Опыт эксплуатации таких каналов показал их эффективность по пропуску и нересту в их трактах мигрирующих рыб [6–8].

Рыбоходно-нерестовые каналы отличают их очевидные достоинства по сравнению с рыбопропускными шлюзами и рыбоподъемниками [9]. Достоинства таких каналов могут быть усилены, а недостатки [10–12] нейтрализованы при применении современных подходов к их созданию [13–16]. Поэтому за цель настоящей работы принято формирование научно обоснованной базы по расчету и конструированию трактов рыбоходно-нерестовых каналов.

Материалы и методы. Эмпирическую основу разработки составляют данные авторского обследования действующих рыбоходно-нерестовых каналов, результаты анализа проектных решений и конструктивных разработок и известные методики расчета и конструирования их трактов.

Результаты и обсуждение. Обследование действующих рыбоходно-нерестовых каналов, устроенных в составе Николаевского и Константиновского гидроузлов на р. Дон, и анализ проектных решений Багаевского и Кочетовского каналов позволили установить параметры и условия их функционирования, за которые приняты: расход реки Q_p , м³/с; расчетный перепад уровней воды между верхним $Z_{в/б}$, м, и нижним $Z_{н/б}$, м, бьежами гидроузла ΔZ , м; расчетный расход канала Q_k , м³/с; соотношение расходов канала и реки $(Q_k/Q_p) \cdot 100$, %; протяженность тракта канала L_k , м; расчетный уклон дна канала I_k ; расчетная средняя скорость течения водного потока на входе и в тракте канала $\bar{v}_k$, м/с; форма типового поперечного сечения тракта канала; ширина тракта канала по дну b_k , м; заложение откосов рыбоходно-нерестового канала $k_{отк}$; средняя глубина водного потока в тракте канала $\bar{h}_k$, м. Значения указанных выше параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные об основных параметрах рыбоходно-нерестовых каналов Донского каскада речных гидроузлов

Table 1 – Data on the main parameters of the fish passage and spawning channels of the Don cascade of river waterworks

Наименование пригидроузлового рыбоходно-нерестового канала	Параметр рыбоходно-нерестового канала									
	Расход реки Q_p , м ³ /с	Расчетный перепад уровней воды ΔZ , м	Расчетный расход канала Q_k , м ³ /с	Соотношение расходов канала и реки $(Q_k/Q_p) \cdot 100$, %	Расчетный уклон дна канала I_k	Протяженность тракта канала L_k , м	Расчетная средняя скорость течения воды в тракте канала $\bar{v}_k$, м/с	Средняя глубина водного потока в тракте канала $\bar{h}_k$, м	Ширина тракта канала по дну b_k , м	Заложение откосов рыбоходно-нерестового канала $k_{отк}$
Николаевский	220 ⁺	4,0 [*]	70,0	31,8	0,000650	6140	1,200	2,50	25,0	1:3,0
Константиновский	230 ⁺	3,0 [*]	80,0	34,8	0,000430	6989	1,100	2,50	25,0	1:3,0
Багаевский	270 ⁺	2,0 [*]	100,0	37,0	0,000338	5520	0,895	2,50	36,0	1:3,5
Кочетовский	250 ⁺	3,1 [*]	90,0	36,0	0,000340	8630	0,950	2,60	30,0	1:2,5
Примечания: «+» – значения расходов воды в нижних бьефах гидроузлов в периоды весенне-летнего и осенне-зимнего нерестовых ходов анадромно-мигрирующих рыб 75% обеспеченности; «*» – перепады уровней воды между верхними и нижними бьефами гидроузлов, соответствующие величинам сбросных расходов, приведенных в графе 2 таблицы 1.										

Приведенные в таблице 1 данные, характеризующие условия функционирования действующих, строящегося и проектируемого нерестово-рыбоходных каналов, определяют сложившуюся практику их создания и использования и могут рассматриваться как ориентиры при их проектировании.

Методология проектирования (расчета и конструирования) трактов рыбоходно-нерестовых каналов предусматривает: установление расчетного периода их функционирования; определение расчетных расходов и уровней воды, соответствующих весенне-летнему и осенне-зимнему периодам нерестового хода анадромно-мигрирующих рыб; выбор диапазона и среднего (расчетного) значения скорости течения водного потока на входе в канал и в его тракте; выбор расчетного расхода канала; выбор формы и определение геометрических параметров поперечного сечения, уклона дна и протяженности тракта канала; установление (прогнозирование) показателей качества условий привлечения рыб из реки в канал; разработку компоновочно-конструктивного решения тракта канала; разработку конструктивных решений элементов тракта канала, обеспечивающих его функционирование.

Расчетные периоды функционирования канала определяются сроками нерестового хода анадромно-мигрирующих рыб. В зависимости от вида рыб могут рассматриваться весенне-летний и осенне-зимний нерестовые периоды (что, в частности, имеет место на Донском каскаде гидроузлов). При необходимости пропуска нескольких видов мигрирующих производителей рыб с различными сроками T и интенсивностями I_p нерестовых ходов строятся моновидовые или совмещенные графики вида $I_p = f(T)$ за многолетние периоды наблюдений. С использованием вышеуказанных графиков принимаются сроки начала и окончания расчетного периода работы канала. Принятие решения о сроках осуществляется по одному (особо приоритетному) виду рыб, или по нескольким приоритетным видам, или же по всей совокупности графиков нерестовых ходов. При этом граничные

временные сроки принимаются из условия охвата периода прохода через створ гидроузла не менее 75 % количества мигрирующих рыб (по видам или совокупности нерестовых стад). Например, для условий Кочетовского гидроузла на р. Дон расчетные сроки весенне-летнего нерестового периода составляют 75 сут, а осенне-зимнего нерестового хода – 70 сут.

На последующем этапе проектирования для принятого(ых) периода(ов) работы сооружения устанавливаются гидрологические характеристики условий функционирования рыбоходно-нерестового канала. В качестве гидрологических параметров рассматриваются: расходы реки Q_p , м³/с, сбрасываемые водовыпускными сооружениями, и соответствующие периоду(ам) уровни воды в верхнем $Z_{в/б}$, м, и нижнем $Z_{н/б}$, м, бьефах гидроузла. При определении расчетных значений Q_p , $Z_{в/б}$ и $Z_{н/б}$ используются ряды многолетних наблюдений и измерений указанных параметров. Статистической обработкой данных, реализуемой по принятым расчетным методикам, устанавливаются значения указанных параметров для различных уровней их обеспеченности P , %. За расчетные значения Q_p , $Z_{в/б}$ и $Z_{н/б}$ принимаются их величины, соответствующие 75% обеспеченности. Как правило, при фиксированных уровнях водной поверхности в верхних бьефах гидроузлов (соответствующих нормальному подпорному уровню) учитываются (фиксируются) их возможные колебания при форсировке или воздействии стгонно-нагонных явлений. Для оценки гидрологии нижнего бьефа строится кривая функциональной связи $Q_p = f(Z_{н/б})$ и графики $Q_p = f(P)$ и $Z_{н/б} = f(P)$.

Используя графическую интерпретацию гидрологических данных по нижнему бьефу гидроузла, устанавливают расчетные значения расхода реки Q_p , отметки уровня воды нижнего бьефа $Z_{н/б}$ гидроузла, принимаемые на уровне 75% обеспеченности, и диапазоны изменения значений указанных

параметров, являющиеся гидрологической основой для проектирования канала. За среднерасчетные значения расхода реки для соответствующего входу в канал створа принимаются их величины, соответствующие 60–50% уровню обеспеченности.

По установленному расходу реки Q_p , м³/с, принимается расход рыбоходно-нерестового канала Q_k , м³/с, по соотношению:

$$Q_k = (0,35 \dots 0,37) \cdot Q_p,$$

где Q_k – расчетный расход рыбоходно-нерестового канала, м³/с;

Q_p – расход воды в реке, м³/с.

Одновременно с реализацией вышеуказанных расчетно-графических операций проводится анализ материалов рыбоводно-биологических обоснований и исследований особенностей анадромно-миграционного поведения рыб и данных об их плавательной способности [17–22]. По результатам анализа принимается решение о значениях: 1) средней скорости течения потока на входе в канал, в его тракте и зонах отдыха и (или) нереста рыб; 2) средних глубин воды в акваториальном пространстве тракта канала.

При принятых значениях Q_k , м/с, $\bar{v}_k$, м/с, и $\bar{h}_k$, м, производятся гидравлические расчеты геометрических параметров канала трапецидального поперечного сечения (с заложением откосов от 1:2,5 до 1:3,5) с покрытием его русла каменно-галечно-гравийной смесью с фракциями 20–60, 60–100 и 100–150 мм. Расчет ведется по методикам и зависимостям гидравлики с учетом разного по фракциям крепления дна и откосов канала [23]. Последовательность вышеуказанного расчета предусматривает определение:

1) площади поперечного сечения канала $\omega_k = Q_k / \bar{v}_k$, м² (за делитель $\bar{v}_k$, м/с, принята расчетная средняя скорость течения водного потока в тракте канала);

2) ширины тракта канала по дну $b_k = \omega_k / \bar{h}_k - k_{отк} \cdot \bar{h}_k$, м, где $k_{отк}$ – коэффициент заложения откосов тракта канала;

3) смоченного периметра русла канала $\chi_k = \bar{h}_k + 2\bar{h}_k \sqrt{1 + k_{отк}^2}$, м;

4) гидравлического радиуса $R_k = \omega_k / \chi_k$, м;

5) эффективной высоты выступов шероховатостей на дне и откосах канала по соответствующим расчетным зависимостям:

$$\Delta_{дна} = 0,785 \cdot \bar{d}_{дна},$$

где $\Delta_{дна}$ – эффективная высота выступов на дне тракта канала, м;

$\bar{d}_{дна}$ – среднее значение высоты выступов на дне канала, м;

$$\Delta_{отк} = 0,785 \cdot \bar{d}_{отк},$$

где $\Delta_{отк}$ – эффективная высота выступов на откосах тракта канала, м;

$\bar{d}_{отк}$ – среднее значение высоты выступов на откосах канала, м;

6) значений коэффициентов шероховатости по зависимостям: для откосов $n_{отк} = 0,0198 \cdot \Delta_{отк}^{0,108}$, для дна $n_{дна} = 0,0198 \cdot \Delta_{дна}^{0,108}$;

7) параметров Шези для условий каменного покрытия различной шероховатости откосов $\bar{C}_{отк}$ и дна канала $\bar{C}_{дна}$ по авторской (1) и известным обобщенным (2)–(4) зависимостям Р. Манинга, И. И. Агроскина, Н. Н. Павловского [24]:

$$C = 22 \lg \left[R_k / (5,05n)^{\frac{1}{0,108}} \right] + 9,5 \cdot (5,05n)^{\frac{1}{0,108}} / R_k + 1,5, \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot R_k^{1/6}, \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R_k, \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{n} R_k^{2,5\sqrt{n}-0,13-0,75\sqrt{R_k}(\sqrt{n}-0,1)}. \quad (4)$$

Отметим, что в зависимостях (1)–(4) обобщенный параметр А. Шези обозначается как C , а коэффициент шероховатости n .

Средние значения коэффициентов А. Шези для откосов $\bar{C}_{отк}$ и дна $\bar{C}_{дна}$ тракта канала по каждой из приведенных зависимостей (1)–(4) определяются при подстановке в них соответствующих значений коэффициентов шероховатости откосов $n_{отк}$ и $n_{дна}$ канала;

8) осредненных значений коэффициентов Шези $\bar{C}_{отк}$ и $\bar{C}_{дна}$, определенных по зависимостям (1)–(4) разных разработчиков (см. п. 7);

9) осредненного значения коэффициента Шези по расчетному соотношению:

$$\bar{C}_к = [2\bar{C}_{отк} \cdot (k_{отк} \cdot \bar{h}_к) + \bar{C}_{дна} \cdot b_к] / (b_к + 2k_{отк} \cdot \bar{h}_к),$$

где $\bar{C}_к$ – осредненный коэффициент А. Шези;

$b_к$ – ширина тракта канала по дну, м;

10) уклона дна по уравнению $I_к = \bar{v}_к^2 / (\bar{C}_к^2 \cdot R_к)$, где $\bar{v}_к$ – среднее значение скорости течения воды в тракте канала, м/с;

11) протяженности (длины) тракта канала по соотношению:

$$L_к = (Z_{в/б} - Z_{н/б}) / I_к,$$

где $Z_{в/б}, Z_{н/б}$ – отметки уровня воды в верхнем и нижнем бьефах речного гидроузла соответственно, м.

При известных значениях $Q_к$, $\bar{v}_к$, $\bar{b}_к$ и параметрах речного русла в створе входа рыб в тракт канала Q_p , $\bar{v}_p$, $\bar{b}_p$ определяется показатель качества условий для привлечения рыб в тракт канала по зависимости:

$$П_{к/у} = 100 \frac{Q_к}{Q_p} \cdot \left(\frac{\bar{v}_к}{\bar{v}_p} \right)^{0,5} \cdot \left(1 + 7 \frac{\bar{b}_к}{\bar{b}_p} \right), \quad (5)$$

где $П_{к/у}$ – показатель качества привлечения рыб в тракт канала, %;

$Q_к$ – расход воды в тракте рыбоходно-нерестового канала, м³/с;

Q_p – расходы реки при 75% и 50% обеспеченности, м³/с;

$\bar{v}_k$ – средняя скорость течения воды в тракте канала, м/с;

$\bar{v}_p$ – средняя скорость течения в реке в створе входа рыб в канал, м/с;

$\bar{b}_k$ – средняя по глубине водного потока ширина входа в канал, м;

$\bar{b}_p$ – средняя ширина русла реки в створе входного оголовка канала, м.

Расчетные операции по зависимости (5) производятся для наиболее вероятных расходов реки и соответствующих им значений соотношений $\bar{v}_k / \bar{v}_p$ и $\bar{b}_k / \bar{b}_p$. Параметр $\Pi_{k/y}$ определяет прогнозируемые значения захода мигрирующих по реке производителей рыб в тракт канала. Ориентировочно значения $\Pi_{k/y}$ должны превышать 50–60 %, а при несоблюдении указанного условия рассматривается возможность увеличения расхода канала Q_k с последующим установлением соответствующей ему средней по глубине воды ширины канала $\bar{b}_k$.

Приведенные методологические положения по расчету параметров рыбоходно-нерестовых каналов апробированы на одном из проектных решений Кочетовского канала. Данные о расчетных условиях функционирования и расчетных параметрах его приведены в таблицах 2 и 3.

Приведенные в таблице 3 расчетные значения геометрических параметров рыбоходно-нерестового канала использованы и учтены при разработке компоновочно-конструктивного решения его тракта.

Разработка компоновочно-конструктивных решений рыбоходно-нерестовых каналов предусматривает: 1) выбор территории его расположения относительно реки и сооружений гидроузла; 2) определение участков расположения входного и выходного (для рыб) оголовков; 3) установление трассы канала и его конструктивного решения на различных участках; 4) определение расположения и конструктивного исполнения зон отдыха и нереста фитофильных видов рыб, входного и выходного оголовков.

Таблица 2 – Данные об условиях проектирования Кочетовского рыбоходно-нерестового канала

Table 2 – Data on the design criteria of the Kochetovsky fish passage and spawning channel

Расход реки Q_p , м ³ /с	Расчетный перепад уровней воды ΔZ , м	Расчетная средняя скорость течения воды в тракте канала $\bar{v}_k$, м/с	Средняя глубина водного потока в тракте канала $\bar{h}_k$, м	Расчетный расход канала Q_k , м ³ /с	Форма поперечного сечения канала	Заложение откосов рыбоходно-нерестового канала $k_{отк}$
250	3,1	0,950	2,60	90,0	трапецеидальная	2,5

Таблица 3 – Расчетные параметры и характеристики Кочетовского рыбоходно-нерестового канала

Table 3 – Design data and parameters of the Kochetovsky fish passage and spawning channel

Площадь поперечного сечения ω_k , м ²	Ширина тракта канала по дну b_k , м	Смоченный периметр χ_k , м	Гидравлический радиус R_k , м	Коэффициент шероховатости откосов и дна тракта канала $n_{отк} / n_{дна}$	Осредненный коэффициент Шези $\bar{C}_k$	Расчетный уклон дна канала I_k	Протяженность тракта канала L_k , м	Показатель качества привлечения рыб $\Pi_{к/у}$, %
94,74	30,0	44,0	2,15	0,031 / 0,0327	35,40	0,00034	8630	84,0

При выборе размещения трассы канала учитываются: топографические условия пойменных участков реки, данные исследований анадромного перемещения рыб по речному руслу, расположение водосбросных и водоподпорных плотин и других сооружений гидроузла. При этом могут рассматриваться право- и левобережные (относительно русла реки) варианты трассирования канала при обязательном учете расположения трасс перемещения рыб в нижних бьефах гидроузлов. При решении задачи по выбору расположения тракта канала, его входного и выходного створов руководствуются методическими рекомендациями, приведенными в работах В. Н. Шкуры, Вл. Н. Шкуры, Б. С. Малеванчика, И. В. Никонорова, А. А. Чистякова [1, 2, 9, 13].

В соответствии с современными представлениями в области рыбохозяйственной гидротехники тракт канала рекомендуется устраивать меандрическим – в виде системы меандров (взаимно сопрягающихся излучин) различных размеров и очертаний. В трактах меандрической формы формируются разноскоростные зоны течений (у выпуклых и вогнутых берегов) при сохранении среднего значения скорости течения по живому сечению водного потока, что позволяет рыбам с разной плавательной способностью и различными биологическими особенностями миграционного поведения выбирать наиболее приемлемые для них трассы перемещения (по глубине и в плане). При этом обеспечивается компактность расположения тракта канала на местности. При конструировании поперечного сечения каналов наряду с типовой трапецеидальной формой в зависимости от топографических и рыбоводно-биологических условий могут рассматриваться сложные по форме очертания русла – с разноглубинным дном и разным заложением откосов по высоте на разных участках тракта канала. При этом обязательными условиями остаются: обеспечение принятой водопропускной способности; выдерживание скоростного режима протекания воды и определенного диапазона скоростей течения, наиболее приемлемых для прохода и нер-

ста рыб; обеспечение соответствующих биологическим особенностям рыб глубин водного потока на разноглубинных участках тракта канала.

При выборе очертаний микро- и макроизлучин канала учитываются особенности гидравлики течений у выпуклых и вогнутых откосов [23].

В пределах трактов каналов (по их протяженности) предусматривается устройство зон отдыха для рыб. Расстояния между зонами отдыха и скорости течения в их акваториальном пространстве определяются с учетом показателей плавательной способности рыб [1, 2, 15]. При определении количества зон отдыха и их расположения учитываются данные о протяженности транзитного безостановочного перемещения анадромно-мигрирующих производителей рыб в речных руслах при различных скоростях встречного потока [17–20], биогенных и абиогенных факторах влияния (водно-средовых и навигационных условиях). В соответствии с предназначением зон отдыха при их конструировании предусматривается уменьшение скоростей течения до минимальных их значений в диапазоне крейсерских (оптимальных) скоростей. Указанное условие обеспечивается за счет увеличения площади живого сечения водного потока (увеличения глубины и (или) ширины русла). При определении размеров и конструировании зон отдыха предусматривается создание условий для нереста в их акваториальном пространстве определенных видов рыб (преимущественно лито- и фитофилов) устройством соответствующих глубинно-скоростных параметров в русле.

Методологические положения по компоновочно-конструктивному решению трактов рыбоходно-нерестовых каналов апробированы применительно к условиям Кочетовского гидроузла на р. Дон. Один из разработанных конкурирующих вариантов этого канала проиллюстрирован на рисунках 1 и 2.

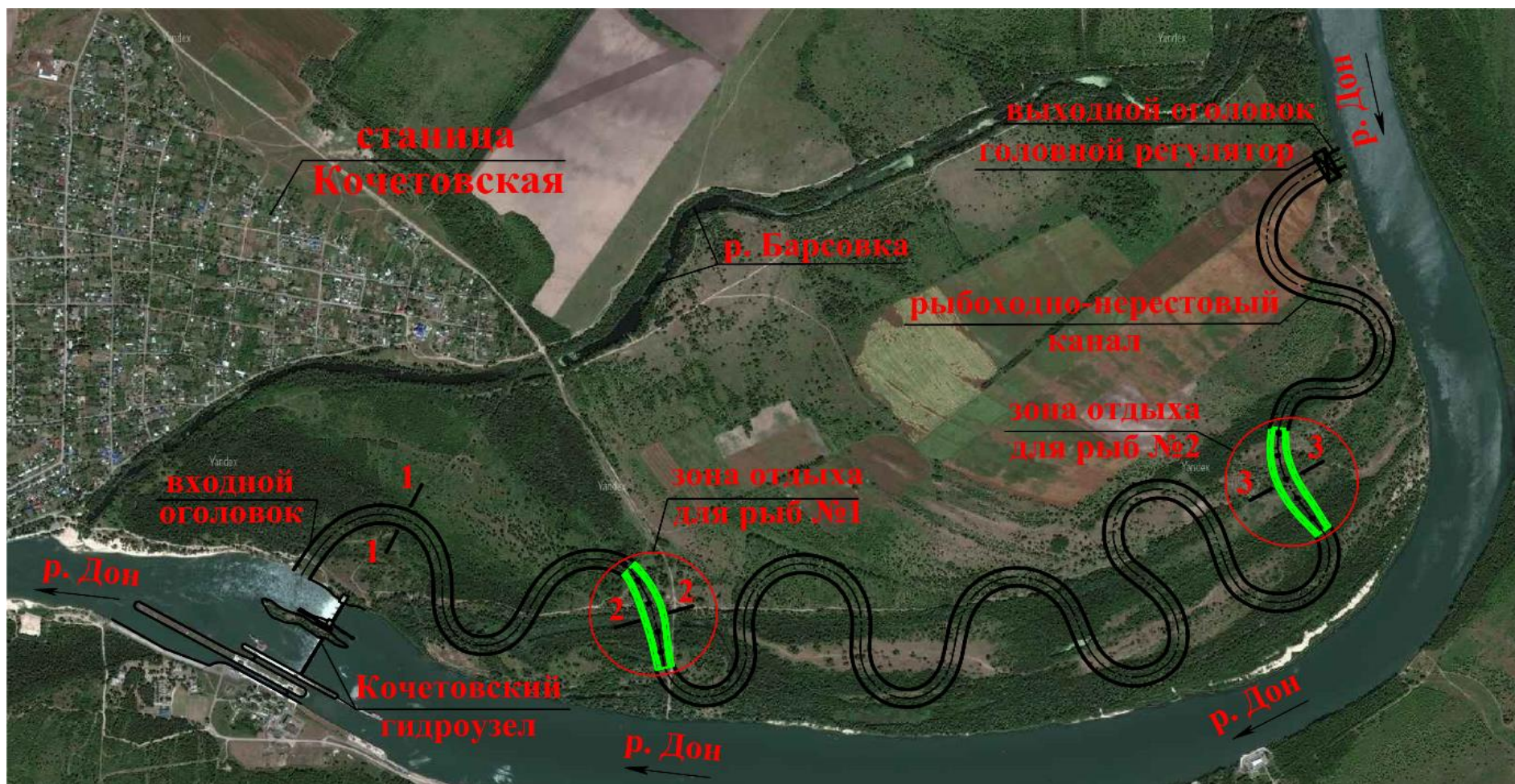
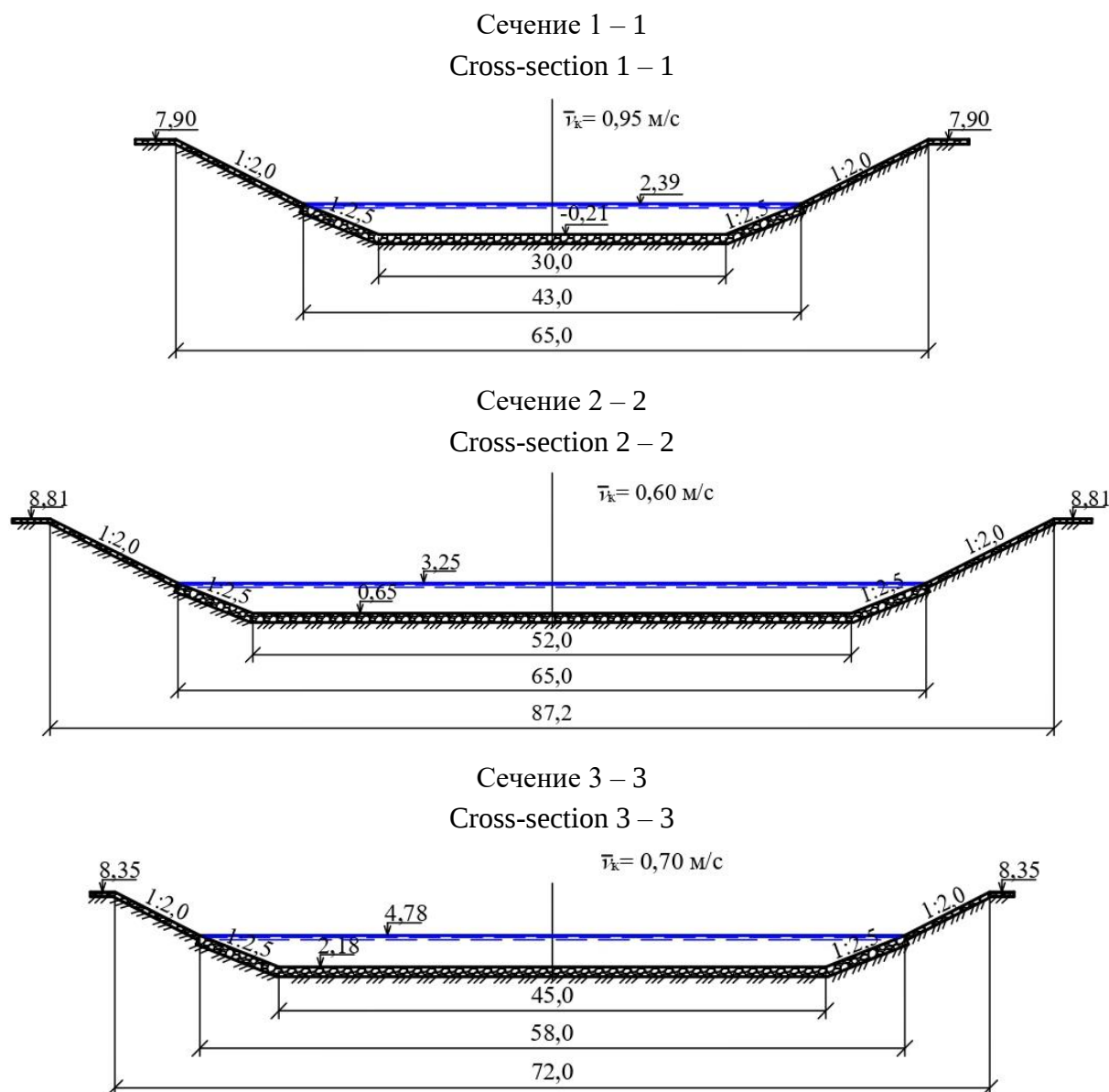


Рисунок 1 – Компоновочно-конструктивное решение Кочетовского рыбоходно-нерестового канала
 Figure 1 – Layout and design solution of Kochetovsky fish passage and spawning channel



$\bar{v}_k$ – расчетная средняя скорость течения воды в тракте канала, м/с

$\bar{v}_k$ – estimated average water flow velocity in the canal passage, m/s

**Рисунок 2 – Поперечные сечения по Кочетовскому
рыбоходно-нерестовому каналу (по рисунку 1)**

**Figure 2 – Cross sections in the Kochetovsky fish
passage and spawning channel (according to Figure 1)**

Выводы

1 Приведенные данные о расходных и геометрических параметрах действующих Николаевского и Константиновского рыбоходно-нерестовых каналов, строящегося Багаевского и проектируемого Кочетовского каналов

являются ориентирами для разработки проектных решений на других низконапорных речных гидроузлах.

2 Приведены методологические положения по проектированию (расчету и конструированию) трактов пригидроузловых рыбоходно-нерестовых каналов, устраиваемых в целях обеспечения пропуска рыб через водоподпорный фронт низконапорных гидроузлов, с созданием условий для нереста рыб в акваториальном пространстве их трактов.

Список источников

1. Шкура В. Н. Рыбопропускные сооружения: в 2 ч. Ч. 1. М.: Рома, 1999. 380 с.
2. Шкура Вл. Н. Рыбоходные и рыбоходно-нерестовые каналы: монография / Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т ДГАУ. Новочеркасск: Лик, 2012. 204 с.
3. Мартыненко В. Н. Рыбоходный канал в составе гидроузла // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2020. № 5. С. 150–152.
4. Введенский О. Г. Рыбоохранный комплекс гидроузла // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 4. С. 67–81.
5. Об 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 справ. правовой системы «Консультант Плюс».
6. Опыт эксплуатации обводных нерестово-рыбоходных каналов при низконапорных гидроузлах на Нижнем Дону / С. П. Воловик, И. Ф. Ковтун, А. А. Корнеев, В. Н. Шкура, В. П. Боровской // Гидротехнические рыбохозяйственные сооружения и русловая гидротехника: сборник / Гос. агропром. ком. СССР, Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т им. А. К. Картунова. Новочеркасск, 1986. С. 10–20.
7. 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 Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Аз. науч.-исслед. ин-та рыб. хоз-ва. 2018. С. 102–105.
8. How effective are spawning-habitat creation or enhancement measures for substrate-spawning fish? A synthesis. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences / T. Rytwinski, L. K. Elmer, J. J. Taylor, L. A. Donaldson, J. R. Bennett, K. E. Smokorowski, A. K. Winegardner, S. J. Cooke. 2019. 183 p.
9. Малеванчик Б. С., Никоноров И. В. Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1984. 256 с.
10. Оценка экологического состояния донных отложений рыбоходных каналов дельты Волги / А. П. Сорокин, Л. В. Яковлева, А. В. Федотова, А. А. Абишева // Социально-экономические и экологические аспекты развития Прикаспийского региона: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Элиста, 2019. С. 527–531.
11. Усынина А. Э., Святский А. С., Боярко С. Г. Рекомендации по восстановлению водности рыбоходных каналов дельты Волги // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 2(32). С. 78–82.
12. Создание системы воспроизводства биоресурсов и контроля дноуглубительных работ в рыбоходных каналах дельты Волги в условиях понижения уровня Каспий-

ского моря и маловодности реки Волги / А. Э. Усынина, Н. С. Шуваев, А. С. Святский, С. Г. Боярко // Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань, 2021. С. 158–161.

13. Чистяков А. А. Конструкции рыбоходных и рыбоходно-нерестовых каналов: учеб. пособие / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. Новочеркасск, 2004. 150 с.

14. Введенский О. Г., Вохминцева Е. В. Использование переливных плотин для регулирования транзитного течения в рыбоходно-нерестовых каналах // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2019. № 7. С. 150–155.

15. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87: СП 101.1330.2012: утв. Минрегионразвития России 30.06.12: введ. в действие с 01.01.13. М., 2012. 69 с.

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

17. Павлов Д. С., Скоробогатов М. А. Миграции рыб в зарегулированных реках. М.: КМК, 2014. 413 с.

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

19. Поддубный А. Г., Малинин Л. К. Миграции рыб во внутренних водоемах: монография. М.: Агропромиздат, 1988. 224 с.

20. Голованов В. К., Поддубный А. Г. Поведение осетровых в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла // Биология внутренних вод: информ. бюл. Л., 1976. № 29. С. 54–56.

21. Research on dams and fishes: determinants, directions, and gaps in the world scientific production / H. R. Pereira, L. F. Gomes, H. O. Barbosa, F. M. Pelicice, J. C. Nabout, F. B. Teresa, L. C. G. Vieira // Hydrobiologia. 2020. Vol. 847. P. 579–592. <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04122-y>.

22. 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. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09360-z>.

23. 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: 30.01.2022).

24. Киселев П. Г., Краев А. Д., Данильченко Н. В. Справочник по гидравлическим расчетам / под общ. ред. П. Г. Киселева. 4-е изд., перераб., испр. и доп. М.: Эколит, 2011. 312 с.

References

1. Shkura V.N., 1999. *Rybopropusknye sooruzheniya* [Fish-pass Structures]. In 2 parts, pt. 1, Moscow, Roma Publ., 380 p. (In Russian).

2. Shkura V.N., 2012. *Rybokhodnye i rybokhodno-nerestovye kanaly: monografiya* [Fish Pass and Fish Pass and Spawning Channels: monograph]. Novocherkassk Reclamation Engineering Institute DGAU, Novocherkassk, Lik Publ., 204 p. (In Russian).

3. Martynenko V.N., 2020. *Rybokhodnyy kanal v sostave gidrouzla* [Fish pass as a 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).

4. Vvedensky O.G., 2013. *Rybookhrannyy kompleks gidrouzla* [Fish protection complex of a waterworks]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 4, pp. 67-81. (In Russian).

5. *Ob utverzhdenii plana meropriyatiy ("dorozhnoy karty") po ozdorovleniyu i razvitiyu vodokhozyaystvennogo kompleksa reki Don* [On the approval of the action plan ("road map") on improvement and development of the water management complex of the Don River]. Order of the Government of the Russian Federation of 21 July, 2021, no. 2012-r. (In Russian).

6. Volovik S.P., Kovtun I.F., Korneev A.A., Shkura V.N., Borovskoy V.P., 1986. *Opyt ekspluatatsii obvodnykh nerestovo-rybokhodnykh kanalov pri nizkonapornykh gidrouzlakh na Nizhnem Donu* [Experience in operation of bypass spawning and fish pass channels at low-head waterwork facilities on the Lower Don]. *Gidrotekhnicheskie rybokhozyaystvennye sooruzheniya i ruslovaya gidrotekhnika: sbornik* [Hydrotechnical Fishery Facilities and Channel Hydraulic Engineering: collection]. State agro-industrial complex of the USSR, Novocherkassk Reclamation Engineering Institute named after A.K. Kortunov, Novocherkassk, pp. 10-20. (In Russian).

7. Anokhin A.M., Shchepkina V.A., 2018. *Programma vozrozhdeniya rybnyykh zapasov yuga Rossii "Serebryanyy potok Dona"* [Program for the 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-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaystva* [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. (In Russian).

8. Rytwinski T., Elmer L.K., Taylor J.J., Donaldson L.A., Bennett J.R., Smokowski K.E., Winegardner A.K., Cooke S.J., 2019. How effective are spawning-habitat creation or enhancement measures for substrate-spawning fish? A synthesis. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 183 p.

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

10. Sorokin A.P., Yakovleva L.V., Fedotova A.V., Abisheva A.A., 2019. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya donnykh otlozheniy rybokhodnykh kanalov del'ty Volgi* [Assessment of the ecological state of bottom sediments of the fish passage channels of the Volga delta]. *Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty razvitiya Prikaspiyskogo regiona: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Socio-economic and Environmental Aspects of the Development of the Caspian Region: Proc. of the International Scientific-Practical Conference]. Elista, pp. 527-531. (In Russian).

11. Usynina A.E., Svyatsky A.S., Boyarko S.G., 2020. *Rekomendatsii po vosstanovleniyu vodnosti rybokhodnykh kanalov del'ty Volgi* [Recommendations for restoring the water content of the fish pass channels of the Volga delta]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region], no. 2(32), pp. 78-82. (In Russian).

12. Usynina A.E., Shuvaev N.S., Svyatsky A.S., Boyarko S.G., 2021. *Sozdanie sistemy vosproizvodstva bioresursov i kontrolya dnouglubitel'nykh rabot v rybokhodnykh kanalakh del'ty Volgi v usloviyakh ponizheniya urovnya Kaspiyskogo morya i malovodnosti reki Volgi* [Creation of a system for the reproduction of bioresources and control of dredging in the fish passage channels of the Volga delta under the conditions of lowering the level of the Caspian Sea and low water content of the Volga River]. *Sovremennye issledovaniya v nauках o Zemle: retrospektiva, aktual'nye trendy i perspektivy vnedreniya: materialy III Mezhdunarodnoy*

nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current Research in the Earth Sciences: a Retrospective and Current Trends and Prospects for Implementation: Proc. of the III International Scientific-Practical Conference]. Astrakhan, pp. 158-161. (In Russian).

13. Chistyakov A.A., 2004. *Konstruktsii rybokhodnykh i rybokhodno-nerestovykh kanalov: uchebnoe posobie* [Design of Fish Passage and Fish Pass and Spawning Channels: textbook]. Novocherkassk State Reclamation Academy, Novocherkassk, 150 p. (In Russian).

14. Vvedensky O.G., Vokhmintseva E.V., 2019. *Ispol'zovanie perelivnykh plotin dlya regulirovaniya tranzitnogo techeniya v rybokhodno-nerestovykh kanalakh* [The use of over-flow dams for regulation of a transit flow in fish pass and spawning canals]. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya* [Proc. of Volga State Technological University. Series: Technological], no. 7, pp. 150-155. (In Russian).

15. SP 101.1330.2012. *Podpornye steny, sudokhodnye shlyuzy, rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.07-87* [Retaining walls, navigation locks, fish passage and fish protection structures. Updated version of SNiP 2.06.07-87], approved by Ministry of Regional Development of Russia of June 30, 2012, put into effect from 01.01.13. Moscow, 2012, 69 p. (In Russian).

16. Gaidaev S.K., 2019. *Rybovodnye sooruzheniya nizkonapornogo Bagaevskogo gidrouzla na reke Don* [Fish-ways of the low-head Bagaevsky waterworks on the River Don]. *Gidrotekhnika* [Hydrotechnics], no. 2(55), pp. 22-25. (In Russian).

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

18. Pavlov D.S., 1979. *Biologicheskie osnovy upravleniya povedeniem ryb v potoke vody* [Biological Bases of Fish Behavior Control in Water Flow]. Moscow, Nauka Publ., 320 p. (In Russian).

19. Poddubny A.G., Malinin L.K., 1988. *Migratsii ryb vo vnutrennikh vodoemakh: monografiya* [Fish Migrations in Inland Waters: monograph]. Moscow, Agropromizdat Publ., 224 p. (In Russian).

20. Golovanov V.K., Poddubny A.G., 1976. *Povedenie osetrovyykh v nizhnem b'efe Kochetovskogo gidrouzla* [Behavior of sturgeons in the downstream of the Kochetovsky waterworks]. *Biologiya vnutrennikh vod: inform. byul.* [Biology of Internal Waters: information bull.]. Leningrad, no. 29, pp. 54-56. (In Russian).

21. Pereira H.R., Gomes L.F., Barbosa H.O., Pelicice F.M., Nabout J.C., Teresa F.B., Vieira L.C.G., 2020. Research on dams and fishes: determinants, directions, and gaps in the world scientific production. *Hydrobiologia*, vol. 847, pp. 579-592, <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04122-y>.

22. Brito-Santos J.L., Dias-Silva K., Brasil L.S., da Silva J.B., Santos A.M., de Sousa L.M., Vieira T.B., 2021. Fishway in hydropower dams: a scientometric analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 28 Oct., vol. 193, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09360-z>.

23. Borovskoy V.P., Garbuz A.Yu., Baev O.A., 2018. [Hydraulic calculation methodology of spawning canal with differently fractured gravel-pebble-bed covering]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 1(29), pp. 233-248, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=923> [accessed 30.01.2022]. (In Russian).

24. Kiselev P.G., Kraev A.D., Danilchenko N.V., 2011. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of Hydraulic Calculations]. 4th ed., rev., corr., Moscow, Ecolit Publ., 312 p. (In Russian).

Информация об авторах

В. Н. Шкура – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, профессор;
А. В. Шевченко – младший научный сотрудник, аспирант.

Information about the authors

V. N. Shkura – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Professor;

A. V. Shevchenko – Junior Researcher, Postgraduate Student.

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

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

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

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 05.05.2022; принята к публикации 11.05.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 05.05.2022; accepted for publication 11.05.2022.