

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,  
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626.82:532.5

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-274-295

**Обоснование методов гидравлических расчетов оросительных каналов**

**Олег Андреевич Баев**

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,  
Российская Федерация, Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

**Аннотация.** Цель: обоснование применимости различных методов гидравлических расчетов оросительных каналов гидромелиоративных систем. Рекомендуется применять пять типов гидравлических задач, позволяющих определять следующие основные параметры оросительных каналов для каждого типа: пропускную способность (первый тип), уклон канала (второй тип), коэффициент шероховатости (третий тип), глубину водного потока (четвертый тип), размеры поперечного сечения оросительного канала (пятый тип). **Материалы и методы.** При проведении исследований за основу были приняты известные классические методы и зависимости Н. Н. Павловского, Б. А. Бахметева, Р. Р. Чугаева, А. А. Агроскина, Шези и других ученых. **Результаты.** Рассмотрены методики определения основных гидравлических характеристик оросительных каналов, в т. ч.: расхода канала, уклона и коэффициента шероховатости. Данные методики позволяют производить расчеты методом подбора и графическими методами. Пятый тип задач представляет собой ряд самостоятельных решений, где применяется приведенная ширина, вычисляемая также графическим способом. Анализ результатов расчета показывает, что для задач первого типа при увеличении значений коэффициентов шероховатости русла снижаются коэффициенты Шези и гидравлический расход. По полученным расчетным данным построен график изменения расхода водного потока в зависимости от коэффициента шероховатости русла. **Выводы.** По результатам исследований были определены условия применения различных методов гидравлического расчета оросительных каналов. Приведены значения коэффициентов шероховатости оросительных каналов в противифльтрационной облицовке – бетонной монолитной и железобетонной из сборных плит. Представлены сводные результаты расчета для шести различных примеров.

**Ключевые слова:** оросительный канал, гидравлика каналов, гидравлическая шероховатость, гидравлический показатель русла, пропускная способность

**Для цитирования:** Баев О. А. Обоснование методов гидравлических расчетов оросительных каналов // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 274–295. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-274-295>.

HYDRAULIC ENGINEERING,  
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Justification of hydraulic calculation methods for irrigation canals**

**Oleg A. Baev**

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,  
Russian Federation, Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>



**Abstract. Purpose:** justification of the applicability of various methods of hydraulic calculations of irrigation canals of land reclamation systems. It is recommended to use five types of hydraulic tasks allowing determining the following main parameters of irrigation canals for each type: conveying capacity (first type), canal slope (second type), roughness coefficient (third type), water flow depth (fourth type), cross-section dimensions of the irrigation canal (fifth type). **Materials and methods.** The well-known classical methods and dependences of N. N. Pavlovsky, B. A. Bakhmetev, R. R. Chugaev, A. A. Agroskin, Shezi and other scientists were taken as a basis during the research. **Results.** Methods for determining the main hydraulic characteristics of irrigation canals, including: canal discharge and slope and roughness coefficient are considered. These methods allow making calculations by the selection and graphical methods. The fifth type of problems is a series of independent solutions, where the effective width also calculated graphically is used. An analysis of the calculation results shows that for problems of the first type, the Chezy coefficients and hydraulic discharge decrease with an increase in the channel roughness coefficient values. Based on the calculated data obtained, canal discharge change chart depending on the roughness coefficient of the channel was constructed. **Conclusions.** The conditions for application of various methods of hydraulic calculation of irrigation canals were determined based on the results of the research. The values of the roughness coefficients of irrigation canals in impervious lining – concrete monolithic and reinforced concrete from prefabricated slabs are given. Summary calculation results for six different examples are presented.

**Keywords:** irrigation canal, canal hydraulics, hydraulic roughness, hydraulic exponent, conveying capacity

**For citation:** Baev O. A. Justification of hydraulic calculation methods for irrigation canals. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):274–295. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-274-295>.

**Введение.** Гидравлическими исследованиями оросительных каналов в нашей стране занимались многие отечественные ученые, в частности, из основоположников следует выделить: Н. Н. Павловского, Р. Р. Чугаева, Б. А. Бахметева, А. А. Агроскина, А. Н. Рахманова, В. С. Боровкова и других ученых [1–3]. Исследования [4–6] проводились, как правило, с целью определения расхода, уклона и коэффициента шероховатости.

Ю. М. Косиченко и др. [7, 8] установлены различные причины снижения гидравлической эффективности оросительных каналов, а также обобщены данные о гидравлической шероховатости каналов и русел рек [9–11] в земляном русле и при наличии различных типов облицовок и др. [12].

Другими отечественными учеными-гидравликами, в частности А. А. Ткачевым и К. Г. Гуриным, в последней из работ [13] приведены результаты гидравлических расчетов быстротока, где одним из решений являлось применение усиленной искусственной шероховатости как эффективного средства гашения энергии по длине потока.

В работах авторов – зарубежных исследователей W. X. Huai и др. [14] рассматриваются вопросы турбулентного течения в открытых частично заросших руслах каналов. Однако неизученными остались вопросы гидравлической шероховатости при наличии различных типов облицовок и влияния растительности на скорости течения и расход.

Исследования, отраженные в работах N. Suljić [15], E. Rustem [16] и др. [17, 18], посвящены изучению влияния шероховатости прямоугольного открытого русла на скорость потока и расход воды, а также изучению новых конструкций каналов, выполненных с элементами искусственной шероховатости. M. Naghavi [19] проведена экспериментальная оценка влияния блоков в пойме каналов на гидравлические характеристики течения в меандрирующем русле.

Актуальны также расчеты коэффициента Шези  $C$ ,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ , по формулам А. А. Сабанеева, Н. Н. Павловского, В. Н. Гончарова, А. П. Зегжда, А. А. Агроскина.

Цель исследований заключается в обосновании применимости различных методов гидравлических расчетов оросительных каналов.

**Материалы и методы.** При выполнении гидравлических расчетов оросительных каналов заложение откосов, в которых они прокладываются, обычно известно, поэтому переменными, как правило, являются: расход  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , ширина по дну  $b$ , м, глубина наполнения  $h$ , м, шероховатость русла канала  $n$  и уклон  $i_0$ .

На основании исследований турбулентного движения жидкости в открытом русле Б. А. Бахметев установил, что для правильных русел, для которых зависимость площади живого сечения от глубины не имеет точек перегиба [2], т. е. для русел с плавно изменяющимся по высоте сечением, можно использовать следующую зависимость [1]:

$$\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^x, \quad (1)$$

где  $Q_2$  – расход воды в русле при глубине  $h_2$  (м), м<sup>3</sup>/с;

$Q_1$  – расход воды в русле при глубине  $h_1$  (м), м<sup>3</sup>/с;

$x$  – постоянная величина для формы живого сечения и заданной шероховатости (гидравлический показатель русла), м [2].

Н. Н. Павловский, распространяя принятую расходную характеристику в виде  $K = \omega \cdot C \sqrt{R}$  (где  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  $C$  – коэффициент Шези, м<sup>0.5</sup>/с (по Н. Н. Павловскому);  $R$  – гидравлический радиус, м), представил зависимость (1) через расходную характеристику в виде:

$$\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^x, \quad (2)$$

где  $K_2$ ,  $K_1$  – расходные характеристики русел при глубинах  $h_2$  и  $h_1$  соответственно.

Откуда из формулы (2) получена следующая зависимость для показателя степени  $x$  [1]:

$$x = \frac{2 \lg \frac{K_2}{K_1}}{\lg \frac{h_2}{h_1}}. \quad (3)$$

Показатель степени  $x$  назван Н. Н. Павловским гидравлическим показателем русла, так как он характеризует тип живого сечения потока. Соотношение (3) является приближенным, тем не менее величина  $x$  является удовлетворительной характеристикой для различных русел. В инженерной практике эту зависимость необходимо устанавливать специальными расчетами. Согласно рекомендации Р. Р. Чугаева, для этого необходимо построить график, который назван логарифмической анаморфозой (для заданного поперечного сечения русла с коэффициентом шероховатости  $n$ ).

Функцию:

$$\lg K = f(\lg h),$$

можно представить зависимостью  $K = \omega \cdot C\sqrt{R}$ , где правая часть является функцией глубины наполнения  $h$ , м.

Из уравнения (3) определим:

$$\lg K_2 = \left( \lg K_1 - \frac{x}{2} \lg h_1 \right) + \frac{x}{2} \lg h_2. \quad (4)$$

Задаваясь глубиной  $h_1 = 1$  м, в правой части уравнения (4) получаем постоянную величину. В связи с этим для заданного русла гидравлический показатель можно считать постоянным, т. е.  $x \approx \text{const}$ .

Рассматривая гидравлический показатель русла  $x$  для отдельных сечений, получим:

- для прямоугольного сечения (широкого сечения) для участка, ограниченного глубинами  $h_1$  и  $h_2$ , найдем [1]:

$$\left( \frac{K_2}{K_1} \right)^2 = \left( \frac{\omega_2 C_2 \sqrt{R_2}}{\omega_1 C_1 \sqrt{R_1}} \right)^2 \approx \left( \frac{bh_2 C \sqrt{h_2}}{bh_1 C \sqrt{h_1}} \right)^2 = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^3,$$

где  $\omega_2, \omega_1$  – площадь живого сечения (по участкам), м<sup>2</sup>;

$C_2, C_1$  – коэффициенты Шези (по участкам);

$R_2, R_1$  – гидравлические радиусы (по участкам), м.

Гидравлический показатель  $x$  прямоугольных русел ограниченной ширины Р. Р. Чугаев получил в виде теоретической формулы [1]:

$$x = 3,4 - \frac{2,8}{\frac{b}{h_{\text{cp}}} + 2},$$

где  $h_{\text{cp}}$  – средняя глубина, м, определяемая как:  $h_{\text{cp}} = \frac{h_2 + h_1}{2}$ ;

- для широкого параболического сечения русла, когда его ширина с очертанием по параболе значительно превышает глубину  $h$ , м, получим [1]:

$$\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 \approx \frac{\left(\frac{2}{3} b_2 h_2 C_0 \sqrt{\frac{2}{3} b_2 h_2 / b_2}\right)^2}{\left(\frac{2}{3} b_1 h_1 C_0 \sqrt{\frac{2}{3} b_1 h_1 / b_1}\right)^2} \approx \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^4,$$

где  $b_2, b_1$  – постоянные коэффициенты;

$C_0$  – коэффициент Шези по А. И. Богомолу, К. А. Михайлову [1];

- для треугольного русла при ширине понизу  $b = 0$  [1]:

$$\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 \approx \frac{\left(\frac{1}{2} B_2 h_2 C_0 \sqrt{\frac{1}{2} B_2 h_2 / \chi_2}\right)^2}{\left(\frac{1}{2} B_1 h_1 C_0 \sqrt{\frac{1}{2} B_1 h_1 / \chi_1}\right)^2} \approx \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^5,$$

где  $B_2, B_1$  – ширины каналов по свободной поверхности, м;

$\chi_1, \chi_2$  – смоченные периметры участков русла, м;

$\chi_i$  – смоченный периметр треугольного русла (при  $x = 5$ ), м, вычисляется по формуле:

$$\chi_i = h_i \cdot (\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}),$$

где  $m_1, m_2$  – коэффициенты заложения откосов канала;

- для трапецидального русла значения гидравлического показателя изменяются от 3 до 5. Так как невозможно получить постоянное значение гидравлического показателя  $x$  трапецидального русла, запишем его вид [1]:

$$x = 3,4 \left[ 1 + \frac{m}{\left(\frac{b}{h_{\text{cp}}} + m\right)} \right] - 1,4 \frac{m'}{\frac{b}{h_{\text{cp}}} + m'},$$

где  $m$  – коэффициент заложения откосов канала;

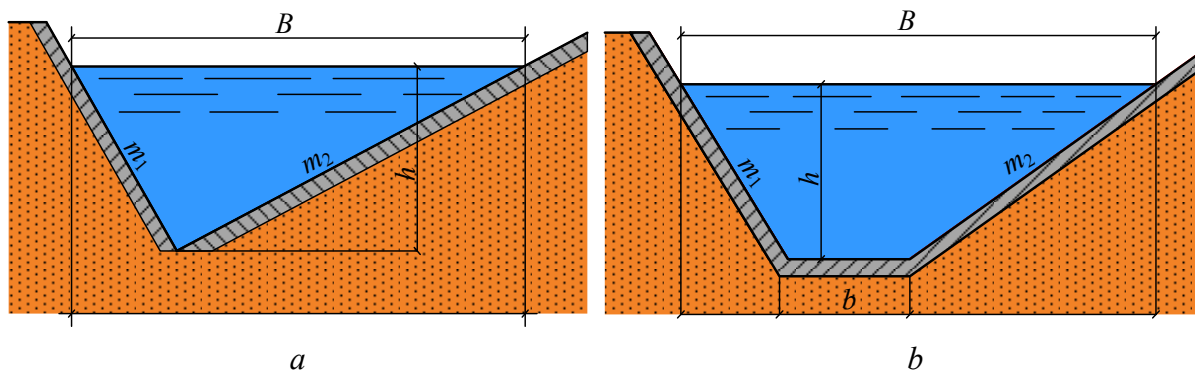
$m'$  – значение коэффициента, определяемое по следующей зависимости:

$$m' = 2\sqrt{1 + m^2}.$$

При трапецидальном сечении гидравлический показатель  $x$  будет

переменным и зависит от глубины канала. Р. Р. Чугаев предложил для гидравлического показателя трапецидального русла графическое решение.

Схемы треугольного и трапецидального сечения даны на рисунке 1.



$a$  – треугольное русло;  $b$  – трапецидальное русло;  
 $B$  – ширина канала поверху, м;  $m_1, m_2$  – коэффициенты заложения откосов;  
 $h$  – глубина воды, м;  $b$  – ширина канала по дну, м  
 $a$  – triangular channel;  $b$  – trapezoidal channel;  $B$  – channel width upward, m;  
 $m_1, m_2$  – ratio of slopes;  $h$  – water depth, m;  $b$  – channel width along the bottom, m

**Рисунок 1 – Расчетные схемы сечений оросительных каналов**  
**Figure 1 – Calculation schemes of irrigation canal sections**

Таким образом, для прямоугольного сечения, когда имеется ширина потока  $b$ , в случае равенства гидравлического показателя приближенно будет  $R \approx h$ . Тогда показатели отклонения расходов при  $(Q_2/Q_1)^2$  будут равны показателю отношения глубин  $(h_2/h_1)^x$ , а гидравлический показатель русла  $x$  будет равен постоянному значению ( $x = 3$ ).

Для широкого параболического русла учитывается предположение, что его ширина при очертании по параболе второго порядка намного превышает его глубину  $h$ , а отношение глубин в разных сечениях русла  $(h_2/h_1)^4$  дает постоянное значение, равное  $x = 4$ .

Наибольшим гидравлическим показателем характеризуется сечение треугольного профиля, которое в частном случае дает значение ширины понизу  $b = 0$ , что соответствует отношению глубин  $(h_2/h_1)^5$ , где  $x = 5$ .

Для трапецидального русла канала решение задачи усложняется,

а гидравлический показатель будет находиться в пределах 3–5. При этом в трапецидальном русле показатель отношения глубин ( $h_2/h_1$ ) будет переменным.

Гидравлические расчеты каналов трапецидального сечения по заданным коэффициентам заложения откосов и коэффициенту шероховатости сводятся к определению одной из следующих характеристик:

- а) глубины воды в канале  $h$  при заданных параметрах  $Q$ ,  $b$ ,  $i_0$ ;
- б) ширины канала по дну  $b$  при заданных параметрах  $Q$ ,  $h$ ,  $i_0$ ;
- в) глубины  $h$  и ширины по дну  $b$  при заданных параметрах  $Q$ ,  $i_0$  и  $\beta = b/h$ , где  $\beta$  – приведенная ширина канала, м;
- г) глубины  $h$  и ширины по дну  $b$  при заданных параметрах  $Q$ ,  $i_0$  и  $v$ , где  $v$  – скорость потока, м/с.

Рассмотрим определение глубины воды в канале  $h$  при заданных параметрах  $Q$ ,  $i_0$  и  $b$ , а также ширины канала  $b$  при известных  $Q$ ,  $h$  и  $i_0$ .

1 Способ последовательного приближения (подбора) дает возможность получить по формуле Шези решение с высокой степенью точности. Однако он связан с трудоемкими вычислениями.

2 Целью исследований отечественных ученых являлись гидравлические расчеты каналов, которые выполнялись по формулам А. А. Сабанеева [1] и были проведены согласно теории размерности. В результате была получена зависимость Шези в виде [1]:

$$C_0 = \sqrt{\frac{g}{k}} \left( \frac{R_0}{e} \right)^{x/2} \text{Re}^{\frac{2-n}{2}}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$k$  – параметр гладкости;

$\frac{R_0}{e}$  – величина, обратная относительной шероховатости граничных по-

верхностей русла;



$R_0$  – гидравлический радиус при средней глубине, м;

$e$  – абсолютная шероховатость;

$x$  – показатель степени, определяемый как  $x = n - p - 2$  [1], где  $p$  – показатель степени, определяемый методом размерности;

$Re$  – число Рейнольдса;

$n$  – показатель степени, обычно принимаемый 1,75–2 [1].

В данной формуле (5) значения  $n$  и  $x = n - p - 2$  зависят от режима движения воды и шероховатости граничной поверхности [1]. Поэтому вид формулы (5) будет зависеть от коэффициента  $C_0$  при различных режимах движения жидкости и состояния граничных значений русла. В связи с этим коэффициент  $C_0$  и коэффициент Дарси  $\lambda$  при ламинарном режиме являются функцией только от числа Рейнольдса  $Re$ :

$$C_0 = \sqrt{\frac{g}{k}} Re^{1/2}.$$

3 Турбулентный режим при гладких поверхностях русла необходимо принять в виде  $x = n - p - 2 = 0$ , так как в уравнении (5) величина  $e^x = 1$ , а  $n = 1,75$  [1], тогда уравнение будет иметь следующий вид:

$$C_0 = \sqrt{\frac{g}{k}} Re^{0,125}.$$

4 Для турбулентного режима при шероховатых границах будет наблюдаться квадратичный закон сопротивлений, который прямо пропорционален квадрату скорости (или  $n = 2$ ) [2], где сопротивления зависят от относительной шероховатости (т. е.  $x = n - p - 2 \neq 0$ ). Тогда формула для коэффициента  $C_0$  будет зависеть от уравнения:

$$C_0 = \sqrt{\frac{g}{k}} \left( \frac{e}{R} \right)^{\frac{p}{2}}.$$

5 Исследования А. П. Зегжда свидетельствуют, что в открытых руслах

движение жидкости имеет переходную область, когда гидравлически гладкие поверхности становятся по мере увеличения числа Рейнольдса ( $Re_R$ ) гидравлически шероховатыми. Средняя высота выступов шероховатости незначительно превышает толщину ламинарной пленки, но это не вызывает интенсивной турбулентности, которая наблюдается при шероховатых поверхностях. В последнем случае  $n$  будет изменяться от 1,75 до 2, а коэффициент  $C_0$  составит комбинированную формулу:

$$C_0 = 1,81 \sqrt{1 - 0,315 \frac{h}{b}} \cdot \sqrt{Re_R},$$

где  $Re_R$  – число Рейнольдса, определяемое по гидравлическому радиусу  $R$ .

6 Для турбулентного режима в русле с гладкими поверхностями можно рекомендовать приближенную формулу Блазиуса в виде:

$$C_0 = 17,72 \lg \frac{Re_R}{C_0} + 20,36,$$

или можно записать более удобную зависимость для вычислений:

$$C_0 + 17,72 \lg C_0 = 17,72 \cdot \lg 14,1 \cdot Re_R.$$

7 Для турбулентного режима в русле с шероховатостями на основе полуэмпирической теории турбулентности А. Д. Альтшуль получил обобщенную формулу коэффициента  $C_0$  в открытых руслах [1]:

$$C_0 = 2,5 \left[ \frac{R}{(80n)^6 + \frac{0,025}{\sqrt{R \cdot J}}} \right]^{1/6},$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости;

$J$  – уклон поверхности.

8 А. А. Агроскин установил, что связь между надежной шкалой коэффициентов шероховатости ( $n$ ) и относительными выступами может быть представлена в следующем виде:

$$C_0 = 4\sqrt{2g}(k + 1gR),$$

после уточнения последнего зависимость вернее записать в виде:

$$C_0 = \frac{1}{n} + 17,721gR.$$

**Результаты и обсуждение.** Расход в трапецидальном канале будет функцией от ширины канала по дну, его глубины, коэффициентов заложения откосов, шероховатости русла и уклона дна. Таким образом, в общем виде расход канала будет представлять собой зависимость вида:

$$Q = f(b, h, m_1, m_2, n, i_0).$$

При гидравлическом расчете каналов заложение откосов  $m_1$  и  $m_2$  считается заранее известным, поскольку оно определяется в результате инженерных изысканий или соответствующих исследований.

Изучение русел каналов проводится с помощью гидравлических расчетов основных параметров, в т. ч. путем определения глубин потока  $h_1$  и  $h_2$ , м, скорости течения  $v$ , м/с, модуля расхода  $K = \omega \cdot C\sqrt{i_0}$  или  $K = \frac{Q}{\sqrt{i_0}}$ .

Тип задачи выбирается в зависимости от пропускной способности канала по заданным параметрам: ширине по дну  $b$  (м), глубине русла  $h$  (м), уклону  $i_0$  или выступу шероховатости  $e$  (мм). Пропускная способность ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) находится по уравнению [1]:

$$Q = \omega \cdot C\sqrt{R \cdot i_0}. \quad (6)$$

В случае, когда уклон дна канала при заложении откосов  $m$  вычисляется по формуле (8), при расчете каналов и лотков с большим уклоном при допускаемых скоростях потоков используют уравнение вида:

$$i_0 = \frac{Q^2}{K^2} = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}, \quad (7)$$

$$i_0 = \frac{v_{\text{макс}}^2}{C^2 R}, \quad (8)$$

где  $v_{\text{макс}}$  – максимальная допускаемая скорость, м/с.

Приведенный коэффициент шероховатости, предложенный Павловским и Эйнштейном, определяется по формуле:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\chi_1 n_1^2 + \chi_2 n_2^2 + \chi_3 n_3^2}{\sum \chi_i}},$$

где  $\chi_1, \dots, \chi_i$  – смоченные периметры участков русла с коэффициентами шероховатости  $n_1, \dots, n_3$  соответственно.

Для условий Донского магистрального канала (ДМК) определим:  $\chi_1 = 22,4$  м,  $\chi_2 = 27,0$  м,  $\chi_3 = 22,4$  м, коэффициент шероховатости  $n_1 = 0,035$ ,  $n_2 = 0,040$ ,  $n_3 = 0,035$ . Учитывая гидравлическую формулу приведенного коэффициента шероховатости ( $n_{\text{пр}}$ ), по следующей зависимости можно вычислить коэффициент шероховатости ( $n$ ):

$$n = \frac{\omega \cdot R^{1/2+y} \sqrt{i_0}}{Q}, \quad (9)$$

где  $y$  – показатель степени, зависящий от условий движения потоков, гидравлического радиуса и др.

В этой формуле площадь живого сечения определяем по зависимости:

$$\omega = (b + m \cdot h) \cdot h = (5,0 + 3,0 \cdot 3,0) \cdot 3,0 = 42 \text{ м}^2.$$

Гидравлический радиус:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{42}{24,9} = 1,69 \text{ м.}$$

Отсюда по общей зависимости для коэффициента шероховатости (9) получим:

$$n = \frac{42 \cdot 2,20 \cdot \sqrt{0,0006}}{110,0} = 0,020.$$

Значения коэффициентов шероховатости каналов в облицовке даны в таблице 1.

**Таблица 1 – Коэффициенты шероховатости ( $n$ ) каналов в облицовке [7]**  
**Table 1 – Roughness coefficient ( $n$ ) of lined channels [7]**

Тип облицовки	Коэффициент шероховатости
Бетонная монолитная: - хорошо отделанная - грубая	0,013–0,015 0,015–0,017
Железобетонная сборная из плит НПК	0,0165–0,0175
Бетонные и железобетонные облицовки после 5 лет эксплуатации: - без деформаций и зарастания - с незначительными деформациями и зарастанием - с деформациями и зарастанием	0,016–0,020 0,020–0,030 0,030–0,040

Гидравлический расчет каналов может быть переменным по расходу  $Q$ , ширине по дну  $b$ , глубине канала  $h$ , шероховатости ложа канала  $n$  и продольному уклону дна  $i_0$ . Таким образом, при гидравлическом расчете трапецеидальных каналов необходимо задаваться четырьмя характеристиками и находить пятую. В связи с этим рассмотрим следующие пять типов задач, которые определяют пропускную способность, уклон канала, коэффициент шероховатости, глубину при равномерном движении.

С целью упрощения вычислений глубины канала  $h$ , м, при равномерном движении задаются глубиной потока  $h_1$ , м, и определяют площадь живого сечения  $\omega_1$ , м<sup>2</sup>, находят расходную характеристику  $K_1$  или расход  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/с, при этой глубине. Если полученное значение расхода или расходной характеристики отклоняется от заданного расхода  $Q_1$  или расходной характеристики  $K_1$  не более чем на 5 %, то глубину можно принимать примерно равной глубине потока  $h_1$ .

Графические методы решения данной задачи считаются простейшими, и они допускают использование графиков расходной характеристики  $K = f(h)$  или расхода  $Q = f(h)$ . Для гидравлического расчета трапецеидальных русел каналов необходимо определить четыре параметра, а пятый найти в зависимости от принятых данных.

*Первый тип задач.* Определяется пропускная способность канала

$Q$ , м<sup>3</sup>/с, при заложении откосов  $m$  по параметрам: ширина по дну  $b$ , м, глубина  $h$ , м, уклон дна  $i_0$ , коэффициент шероховатости  $n$ . Такой тип задач является поверочным. Расход канала вычисляется по уравнению (6).

Рассмотрим определение коэффициента Шези  $C$  при различных значениях расхода воды в канале.

1 При  $Q > 39$  м<sup>3</sup>/с. Исходные данные:  $b = 5,0$  м,  $h = 3,0$  м,  $m = 3,0$ ,  $i_0 = 0,000052$ ,  $n = 0,020$  – без зарастания.

Найдем площадь живого сечения:

$$\omega = (b + mh)h = (5,0 + 3,0 \cdot 3,0) \cdot 3,0 = 42,0 \text{ м}^2.$$

Определим смоченный периметр:

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 5 + 2 \cdot 3,0\sqrt{1 + 3,0^2} = 24,9 \text{ м}.$$

Вычислим гидравлический радиус:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{42}{24,9} = 1,69 \text{ м}.$$

Рассчитаем коэффициент Шези:

$$C = \frac{1}{n} R^y = \frac{1}{0,02} \cdot 1,69^{1,3} = 98,7 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

Окончательно определим расход оросительного канала (при  $R > 1$  м,  $y = 1,3$ ) по зависимости:

$$Q = \omega \cdot C \sqrt{R \cdot i_0} = 42 \cdot 98,7 \sqrt{1,69 \cdot 0,000052} = 38,86 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2 При  $Q < 25,0$  м<sup>3</sup>/с. Исходные данные:  $b = 5,0$  м,  $h = 3,0$  м,  $m = 3,0$ ,  $i_0 = 0,000052$ ,  $n = 0,0225$  – при нормальном состоянии.

3 При  $Q < 25,0$  м<sup>3</sup>/с. Исходные данные:  $b = 5,0$  м,  $h = 3,0$  м,  $m = 3,0$ ,  $i_0 = 0,000052$ ,  $n = 0,0250$  – при незначительном зарастании.

4 При  $Q < 25,0$  м<sup>3</sup>/с – при очень сильном зарастании. Исходные данные:  $b = 5,0$  м,  $h = 3,0$  м,  $m = 3,0$ ,  $i_0 = 0,000053$ ,  $n = 0,030$ .

5 При  $Q < 25,0 \text{ м}^3/\text{с}$  – при значительном зарастании. Исходные данные:  $b = 5,0 \text{ м}$ ,  $h = 3,0 \text{ м}$ ,  $m = 3,0$ ,  $i_0 = 0,000053$ ,  $n = 0,035$ .

6 При  $Q < 25,0 \text{ м}^3/\text{с}$  – при существенном зарастании. Исходные данные:  $b = 5,0 \text{ м}$ ,  $h = 3,0 \text{ м}$ ,  $m = 3,0$ ,  $i_0 = 0,000053$ ,  $n = 0,040$ .

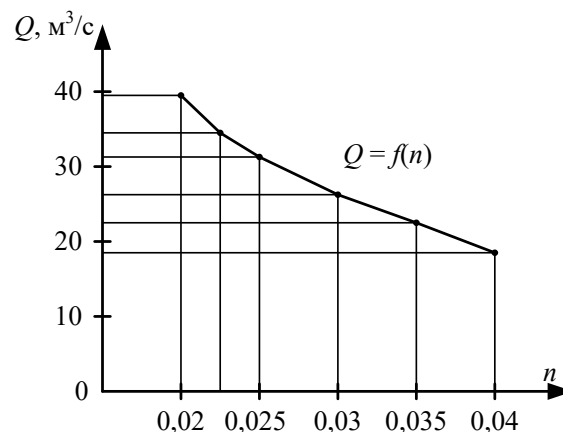
Сводные данные гидравлических расчетов для шести примеров приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Сводные результаты гидравлических расчетов**

**Table 2 – Summary results of hydraulic calculations**

Пример	$n$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$C, \text{ м}^{0,5}/\text{с}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$
1	0,020	42,0	24,9	1,69	98,70	38,86
2	0,0225	42,0	24,9	1,69	87,91	34,61
3	0,0250	42,0	24,9	1,69	79,12	31,15
4	0,030	42,0	24,9	1,69	65,93	26,21
5	0,035	42,0	24,9	1,69	56,51	22,46
6	0,040	42,0	24,9	1,69	49,45	19,65

Анализ результатов показывает, что для задач первого типа при увеличении значений коэффициентов шероховатости снижаются коэффициенты Шези и гидравлический расход. По полученным расчетным данным построен график изменения расхода канала (рисунок 2).



$n$  – коэффициент шероховатости;  $Q$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$

$n$  – roughness coefficient;  $Q$  – water consumption,  $\text{m}^3/\text{s}$

**Рисунок 2 – График изменения расхода канала в зависимости от коэффициента шероховатости русла**

**Figure 2 – Canal discharge change chart depending on the channel roughness coefficient**

*Второй тип задач.* Выполняется определение уклона дна канала при заложении откосов  $m$  по заданным его параметрам:  $Q$ ,  $b$ ,  $h$  и  $n$ . Уклон дна ( $i_0$ ) определяется по расходной характеристике  $K$  из уравнения (7), тогда:

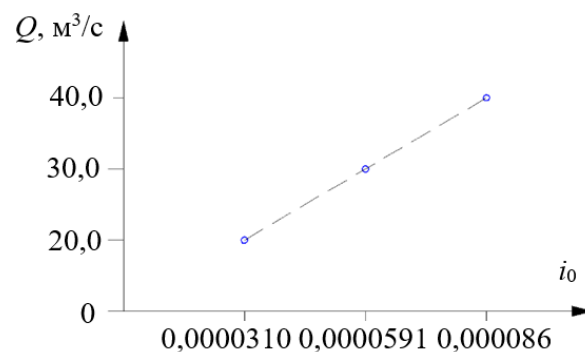
$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}},$$
$$C = \frac{1}{n} R^y,$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости по Гангиле – Куттеру, который составляет 0,01–0,03;

$y$  – показатель степени, зависящий от условий движения потоков, а также гидравлического радиуса и состояния шероховатости поверхности  $n$ ,  $y = 1,3\sqrt{n}$  при  $R > 1$ ,  $y = 1,5\sqrt{n}$  при  $R < 1$ .

В случае гидравлического расчета каналов уклоны необходимо подбирать по допускаемым наибольшим скоростям потока, используя уравнение (8).

По результатам проведенных расчетов построен график изменения расхода воды в зависимости от уклона дна канала (рисунок 3).



$i_0$  – уклон дна;  $Q$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$

$i_0$  – bottom slope;  $Q$  – water consumption,  $\text{m}^3/\text{s}$

**Рисунок 3 – График изменения расхода воды в канале в зависимости от уклона его дна**

**Figure 3 – Canal discharge change chart depending on the bottom slope**



*Третий тип задач.* Для гидравлического расчета канала трапецеидального сечения выполняется определение коэффициента шероховатости  $n$  по заданным элементам канала: расход канала  $Q$ , м<sup>3</sup>/с; ширина канала  $b$ , м; глубина воды в канале  $h$ , м; уклон дна канала  $i_0$ ; коэффициент откоса канала  $m$ .

Коэффициент шероховатости определяется по формуле [1]:

$$n = \frac{\omega \cdot R^y \sqrt{R \cdot i_0}}{Q}.$$

Далее при проведении расчета определяются следующие параметры (по формулам, изложенным выше): 1) площадь живого сечения канала трапецеидального русла ( $\omega$ , м<sup>2</sup>); 2) гидравлический радиус ( $R$ ); 3) смоченный периметр ( $\chi$ , м); 4) показатель степени ( $y$ ).

*Четвертый тип задач.* Производится вычисление глубины потока при равномерном движении  $h$  и средней скорости течения потока  $v_{cp}$  для этой глубины. Исходные параметры для расчета принимаются следующие:  $b$ ,  $Q$ ,  $m$ ,  $i_0$ ,  $n$ . Для четвертого типа задач применяется уравнение (6) [1], в котором неизвестным параметром является глубина канала  $h$ . С целью упрощения вычислений глубину канала при равномерном движении можно вычислить методом подбора.

При применении метода подбора учитывают произвольно глубину  $h_1$  и рассчитывают параметры потока  $\omega_1$ ,  $\chi_1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$  и расходную характеристику  $K_1$  или расход  $Q_1$ , который соответствует глубине  $h_1$ . В случае, если полученные величины расхода  $Q_1$  и расходной характеристики  $K_1$  соответствуют заданному расходу или расходной характеристике с отклонением в пределах не более чем 5 %, глубину потока  $h_1$  можно считать равной глубине  $h$ . При неравенстве этих значений следует задаться другой глубиной  $h_2$  и пересчитать значения  $Q_2$  и  $K_2$ .

*Пятый тип задач.* К этому типу задач относятся наиболее широко распространенные расчеты, сводящиеся к определению размеров сечения каналов, т. е. ширины по дну  $b$  или глубины наполнения  $h$ , по известным элементам  $Q$ ,  $i_0$ ,  $n$  и  $m$ . По существу этот тип задач представляет собой ряд самостоятельных решений, так как живое сечение определяется двумя переменными  $b$  и  $h$ , которые могут быть заданы любого размера и в любом соотношении.

Один из наиболее простых приемов определения элементов живого сечения сводится к уменьшению количества неизвестных путем использования приведенной относительной ширины канала  $\beta = \frac{b}{h}$ . В этом случае определяется  $\beta$  и по данному значению устанавливаются окончательные размеры: ширина канала по дну  $b$  и глубина наполнения  $h$ . Приведенная ширина  $\beta$  здесь определяется подбором или графическим путем после построения зависимости  $\frac{Q}{\sqrt{i_0}} = K = f(\beta)$ . При этом значение приведенной ширины канала может выбираться так, чтобы при заданном расходе  $Q$ , уклоне дна  $i_0$  и состоянии его стенок  $n$  значение  $\beta$  лежало в таких пределах, которые определяются лучшими эксплуатационными условиями каналов или их наибольшей пропускной способностью.

Последние условия позволили обратиться к поискам более рациональных методов решений, которые исключили бы большие арифметические вычисления, графические построения и были бы применимы к задачам любого типа. При анализе решения последнего типа задач возникает также вопрос о выборе наиболее рационального соотношения размеров сечения канала.

## **Выводы**

1 Гидравлический показатель русла (показатель  $x$ ) является прибли-

женным и описывает удовлетворительные характеристики для различных русел (прямоугольного, параболического, треугольного и трапецидального сечения).

2 На основе движения воды в открытом русле Б. А. Бахметев установил, что для правильных русел каналов с плавно изменяющимся движением гидравлический показатель для отдельных сечений прямоугольной формы равен  $x = 3$ , для параболического сечения  $x = 4$ , для треугольного  $x = 5$ , для трапецидального – от 3 до 5.

3 По результатам исследований обобщены методики определения основных гидравлических характеристик каналов, в т. ч. для первых трех типов задач: по определению пропускной способности канала  $Q$ , уклона  $i_0$ , коэффициента шероховатости  $n$ . Для четвертого типа задач определяется глубина потока при равномерном движении  $h$  и скорости при этой глубине. Кроме изложенного метода можно применять графические решения, предложенные А. Н. Рахмановым. Для пятого типа задач рекомендованы методы расчета элементов живого сечения, заключающиеся в использовании приведенной ширины канала  $\beta$ .

### Список источников

1. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
2. Долгушев И. А. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов. М.: Колос, 1975. 136 с.
3. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов / пер. с англ. И. В. Филимоновой. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.
4. Рылова И. А., Боровков В. С. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 181–187.
5. Ахмедова Н. Р., Наумов В. А. Влияние изменения коэффициента шероховатости русла на максимальные расчетные уровни малого водотока в заданном створе (на примере р. Нельма) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 74–80. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-4/74-8.
6. Вербицкий В. С., Ходзинская А. Г. Приведенные гидравлические сопротивления рек и каналов // Гидротехническое строительство. 2018. № 3. С. 37–47.
7. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 8. С. 1147–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162.
8. Баев О. А., Косиченко Ю. М. Особенности гидравлических условий эксплуата-

ции крупных каналов // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. 2019. № 3(03). С. 145–160. URL: <http://rosniipm-sm1.ru/article?n=43> (дата обращения: 24.05.2023). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2019-3-145-160>.

9. Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12, № 2. С. 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.

10. Беновицкий Э. Л. Вывод расчетных зависимостей для коэффициента шероховатости частично заросших русел // Водные ресурсы. 1988. № 1. С. 68–74.

11. Белавкин А. В. Анализ существующих подходов к оценке движения потока воды в заросших руслах // Инновации и инвестиции. 2019. № 4. С. 229–233.

12. Косиченко Ю. М. Влияние эксплуатационных факторов на пропускную способность земляных русел каналов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2011. № 3(03). 13 с. URL: [http://rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec43-field6.pdf](http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec43-field6.pdf) (дата обращения: 24.05.2023).

13. Ткачев А. А., Гурин К. Г. Гидравлические расчеты лотка быстротока Новотроицкого водохранилища // Мелиорация и водное хозяйство: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 145-летию образования «Донлесхоза». Новочеркасск, 2021. С. 104–109.

14. Turbulence structure in open channel flow with partially covered artificial emergent vegetation / W. X. Huai, J. Zhang, W. J. Wang, G. G. Katul // Journal of Hydrology. 2019. № 573. P. 180–193. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.071.

15. Suljić N. Influence of roughness of a rectangular open channel on flow speeds and water flow // Technical Institute Bijeljina, Archives for Technical Sciences. 2021. Vol. 24. P. 57–64. DOI: 10.7251/afts.2021.1324.057.

16. Study of new designs of spillway channels with artificial roughness / E. Rustem, K. Yestaev, M. Abdimomynova, A. Abduvalova, A. Tassybayev // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2021. Vol. 9, № 4. P. 117–133. DOI: 10.21533/pen.v9i4.2303.

17. Drag coefficient and hydraulic roughness generated by an aquatic vegetation patch in a semi-arid alluvial channel / J. A. S. Filho, J. Cantalice, S. Guerra, E. Nunes, J. C. Santos, M. M. Corrêa, G. B. Junior, V. P. S. Junior // Ecological Engineering. 2019. Vol. 141. Article number: 105598. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105598.

18. Huang P. C., Lee K. T. Channel hydrological response function considering inflow conditions and hydraulic characteristics // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 591. Article number: 125546. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125546.

19. Naghavi M., Mohammadi M., Mahtabi G. An experimental evaluation of the blocks in floodplain on hydraulic characteristics of flow in a meandering compound channel // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 612. Article number: 127976. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127976.

## References

1. Bogomolov A.I., Mikhailov K.A., 1972. *Gidravlika* [Hydraulics]. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and add., Moscow, Stroyizdat Publ., 648 p. (In Russian).

2. Dolgushev I.A., 1975. *Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti orositel'nykh kanalov* [Improving the Operational Reliability of Irrigation Canals]. Moscow, Kolos Publ., 136 p. (In Russian).

3. Chow V.T., 1969. *Gidravlika otkrytykh kanalov* [Open-Channel Hydraulics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 464 p. (In Russian).

4. Rylova I.A., Borovkov V.S., 2013. *Ekvivalentnaya sherokhovatost' napornykh i beznapornykh vodovodov* [Equivalent roughness of pressure and pressure-free conduits]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], no. 4, pp. 181–187. (In Russian).

5. Akhmedova N.R., Naumov V.A., 2021. *Vliyanie izmeneniya koefitsiyenta shero-*

*khovatosti rusla na maksimal'nye raschetnye urovni malogo vodotoka v zadannom stvore (na primere r. Nel'ma)* [Influence of the channel roughness factor change on the maximal design levels of a small watercourse in a given river cross (Nelma river example)]. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [FEFU: School of Engineering Bulletin], no. 4(49), pp. 74-80, DOI: 10.24866/2227-6858/2021-4/74-8. (In Russian).

6. Verbitsky V.S., Khodzinskaya A.G., 2018. *Privedennye gidravlicheskie soprotivleniya rek i kanalov* [Integrated hydraulic resistance of rivers and canals]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 3, pp. 37-47. (In Russian).

7. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2020. *Gidravlicheskaya effektivnost' orositel'nykh kanalov pri ekspluatatsii* [Hydraulic efficiency of irrigation channels in the course of operation]. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], vol. 15, no. 8, pp. 1147-1162, DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162. (In Russian).

8. Baev O.A., Kosichenko Yu.M., 2019. [Features of hydraulic conditions of large canals operation]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo*, no. 3(03), pp. 145-160, available: <http://rosniipm-sm1.ru/article?n=43> [accessed 24.05.2023], <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2019-3-145-160>. (In Russian).

9. Gladkov G.L., 2020. *Issledovanie zernistoy sherokhovatosti dna rechnykh rusel* [Studying the granular roughness of river channels bottom]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* [Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping], vol. 12, no. 2, pp. 336-346, DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346. (In Russian).

10. Benovitsky E.L., 1988. *Vyvod raschetnykh zavisimostey dlya koeffitsienta sherokhovatosti chastichno zarosshikh rusel* [Derivation of the calculated dependencies for the roughness coefficient of a partially overgrown channel]. *Vodnye resursy* [Water Resources], no. 1, pp. 68-74. (In Russian).

11. Belavkin A.V., 2019. *Analiz sushchestvuyushchikh podkhodov k otsenke dvizheniya potoka vody v zarosshikh ruslakh* [Analysis of existing approaches to the assessment of the water flow in weedy beds]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], no. 4, pp. 229-233. (In Russian).

12. Kosichenko Yu.M., 2011. [Influence of operational factors on the earth channels carrying capacity]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 3(03), 13 p., available: [http://rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec43-field6.pdf](http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec43-field6.pdf) [accessed 24.05.2023]. (In Russian).

13. Tkachev A.A., Gurin K.G., 2021. *Gidravlicheskie raschety lotka bystrotoka Novotroitskogo vodokhranilishcha* [Hydraulic calculations of the fast-flow flume of the Novotroitsk reservoir]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakt. konferentsii, posvyashchennoy 145-letiyu obrazovaniya "Donleskhoza"* [Land Reclamation and Water Management: Proc. of All-Russian Scientific-Practical Conference, Dedicated to the 145<sup>th</sup> Anniversary of the Formation of "Donleskhoz"]. Novocherkassk, pp. 104-109. (In Russian).

14. Huai W.X., Zhang J., Wang W.J., Katul G.G., 2019. Turbulence structure in open channel flow with partially covered artificial emergent vegetation. *Journal of Hydrology*, no. 573, pp. 180-193, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.071.

15. Suljić N., 2021. Influence of roughness of a rectangular open channel on flow speeds and water flow. *Technical Institute Bijeljina, Archives for Technical Sciences*, vol. 24, pp. 57-64, DOI: 10.7251/afts.2021.1324.057.

16. Rustem E., Yestaev K., Abdimomynova M., Abduvalova A., Tassybayev A., 2021. Study of new designs of spillway channels with artificial roughness. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, no. 4, pp. 117-133, DOI: 10.21533/pen.v9i4.2303.

17. Silva Filho J.A.S. [et al.], 2019. Drag coefficient and hydraulic roughness generat-

ed by an aquatic vegetation patch in a semiarid alluvial channel. Ecological Engineering, vol. 141, article number: 105598, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105598.

18. Huang P.C., Lee K.T., 2020. Channel hydrological response function considering inflow conditions and hydraulic characteristics. Journal of Hydrology, vol. 591, article number: 125546, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125546.

19. Naghavi M., Mohammadi M., Mahtabi G., 2022. An experimental evaluation of the blocks in floodplain on hydraulic characteristics of flow in a meandering compound channel. Journal of Hydrology, vol. 612, article number: 127976, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127976.

---

#### ***Информация об авторе***

**О. А. Баев** – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук.

#### ***Information about the author***

**O. A. Baev** – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences.

*Автор несет ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*The author is responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

*The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 01.06.2023; одобрена после рецензирования 05.07.2023; принята к публикации 05.07.2023.*

*The article was submitted 01.06.2023; approved after reviewing 05.07.2023; accepted for publication 05.07.2023.*