

УДК 627.84

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-155-168

Ю. М. Косиченко

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО ШЕРОХОВАТОСТИ РУСЕЛ КАНАЛОВ В ЗЕМЛЯНОМ РУСЛЕ И ОБЛИЦОВКЕ

Цель: анализ данных по шероховатости русел каналов в существующих таблицах коэффициентов шероховатости и расчетных значений приведенных коэффициентов при неоднородной шероховатости. **Материалы и методы:** за основу приняты обобщения значений коэффициентов шероховатости каналов в земляном русле и облицовке, которые ранее были представлены в виде таблиц нормативных и справочных значений коэффициентов шероховатости. **Результаты:** анализ представленных таблиц значений коэффициентов шероховатости каналов показывает, что для каналов в земляном русле по рекомендациям Р. Р. Чугаева максимальное значение составляет $n = 0,020$ и соответствует нормативному. При зарастании русла канала средние коэффициенты шероховатости изменяются от 0,027 до 0,100, что выше нормативных до 4,0 раз. Значения коэффициентов шероховатости в земляном русле по рекомендациям Н. Н. Павловского составляют от 0,024 до 0,033, что несколько превышено по сравнению с нормативными требованиями. В статье также представлены натурные данные о коэффициентах шероховатости более чем для 20 объектов. Их анализ показывает, что для ряда каналов в земляном русле коэффициент n соответствует нормативным значениям. Однако для некоторых каналов коэффициенты шероховатости значительно превышают нормативные и проектные значения (в 1,19–1,66 раза). Также рассматривается определение коэффициентов шероховатости каналов с неоднородной шероховатостью по длине. **Выводы:** в статье обобщены данные по наиболее известным таблицам шероховатости каналов в земляном русле и облицовке и натурные данные. Рассмотрены расчеты для определения приведенной шероховатости неоднородных русел каналов.

Ключевые слова: коэффициент шероховатости; зарастание русел; неоднородные русла каналов; приведенный коэффициент шероховатости; каналы в земляном русле.

Yu. M. Kosichenko

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

INTEGRATING DATA ON CANAL BED ROUGHNESS IN EARTHEN CHANNEL AND LINING

Purpose: data analysis on canal bed roughness in the existing tables of roughness coefficients and the calculated values of the reduced heterogeneous roughness coefficient. **Materials and methods:** the generalization of the values of the roughness coefficients of the earthen channels and lining, which were previously presented in the form of tables of normative and reference values of the roughness coefficients were taken as a basis. **Results:** analysis of the presented tables of canal roughness coefficients values shows that for earthen channel according to the recommendations by R. R. Chugaev, the maximum value is $n = 0.020$ and corresponds to the normative. With canal bed overgrowth, the average roughness coefficients vary from 0.027 to 0.100, which is higher than the standard ones by 4.0 times. The values of the earthen channel roughness coefficients according to the recommendations



by N. N. Pavlovsky range from 0.024 to 0.033, which is somewhat overstated in comparison with regulatory requirements. The field data on roughness coefficients for more than 20 objects are also presented. Their analysis shows that for a number of canals in earthen channel, the coefficient n corresponds to standard values. However, for some channels, the roughness coefficients significantly exceed the standard and project values (1.19–1.66 times). The determination of canal roughness coefficients with non-uniform length roughness is also considered. **Conclusions:** data in the most well-known tables of canal roughness in the earthen channels and lining and field data are summarized. The calculations for determining the reduced heterogeneous canals are considered.

Key words: roughness coefficient; channel overgrowth; heterogeneous channels; reduced roughness coefficient; channels in the earth channel.

Введение. В гидравлических расчетах каналов широко используется такой параметр, как коэффициент шероховатости русел каналов n [1–7]. Он учитывается в формулах для определения коэффициента Шези C , например Н. Н. Павловского, Р. Маннига, И. И. Агроскина и др. Большое распространение получили таблицы коэффициентов шероховатости, которые применяются для их назначения при расчетах и при проектировании каналов. Первые таблицы коэффициентов n для каналов в земляном русле и облицовке были еще составлены по рекомендациям Н. Н. Павловского [6], а затем Р. Р. Чугаева [7], И. Ф. Карасева – для речных русел и пойм [4], А. Д. Альтшуля – эквивалентная шероховатость для каналов с бетонной облицовкой [4], М. Ф. Срибного – для естественных водотоков, Н. Дэскэлеску – для каналов [8], для крупных земляных каналов подготовлены рекомендации ГКНТ СССР¹.

Вопросы изучения гидравлических сопротивлений каналов рассмотрены в работах В. С. Вербицкого, И. А. Рыловой и др. [9, 10], а в научных работах за рубежом становятся все более актуальными исследования влияния растительности на шероховатость и сопротивления русла [11–13].

В последнее время в своде правил (СП 100.13330.2016)², а ранее в СНиП 2.06.03-85 приведены нормативные коэффициенты шероховатости каналов как в земляном русле, так и в облицовке.

¹ Рекомендации по гидравлическому расчету крупных каналов / ГКНТ СССР. – М., 1988. – 153 с.

² Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: СП 100.13330.2016: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17. – М.: Стандартинформ, 2016. – 229 с.

На практике получили применение кроме однородных русел каналов неоднородные по поперечному сечению и по длине, для которых вычисляются по специальным формулам так называемые приведенные коэффициенты шероховатости. Одной из первых была получена формула Н. Н. Павловского для случая неоднородного русла по поперечному сечению [5], а затем приведенного коэффициента шероховатости по длине [2].

Материалы и методы. В качестве основы в работе используется обобщение значений коэффициентов шероховатости каналов в земляном и бетонном руслах, которые ранее были представлены в виде таблиц нормативных или справочных значений коэффициентов шероховатости n .

В таблицах 1–3 приведены значения коэффициентов шероховатости каналов в земляном и облицованном руслах.

Таблица 1 – Нормативные значения коэффициентов шероховатости каналов (по СП 100.13330.2016)²

| Характеристика ложа канала | Значение n |
|---|--------------|
| 1 Земляные русла каналов | |
| С расходом воды $> 25 \text{ м}^3/\text{с}$ в нормальном состоянии в грунтах: | |
| - связных и песчаных | 0,0200 |
| - гравелисто-галечниковых | 0,0225 |
| С расходом воды $1\text{--}25 \text{ м}^3/\text{с}$ в нормальном состоянии в грунтах: | |
| - связных и песчаных | 0,0225 |
| - гравелисто-галечниковых | 0,0250 |
| В нижесредних условиях содержания | 0,0275 |
| 2 Облицованные русла каналов | |
| Бетонная облицовка, тщательно выполненная | 0,012–0,014 |
| Бетонная облицовка с грубой поверхностью | 0,015–0,017 |
| Сборные железобетонные лотки | 0,012–0,015 |
| Облицовка из асфальтобитумных материалов | 0,013–0,016 |

Таблица 2 – Коэффициенты шероховатости каналов (по Р. Р. Чугаеву [7])

| Материал стенок русла | Значение n | | |
|-----------------------|--------------|---------|--------------|
| | минимальный | средний | максимальный |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 Облицовки каналов | | | |
| - асфальт | 0,013 | – | 0,016 |
| - цементный раствор | 0,011 | 0,013 | 0,015 |
| - бетон затертый | 0,011 | 0,013 | 0,015 |
| - торкрет | 0,016 | 0,020 | 0,025 |

Продолжение таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|-------|-------|
| 2 Каналы в земляном русле | | | |
| - русла канала после строительства | 0,016 | 0,018 | 0,020 |
| - после выветривания | 0,018 | 0,022 | 0,025 |
| - гравелистое русло | 0,022 | 0,025 | 0,030 |
| - незначительное зарастание | 0,022 | 0,027 | 0,033 |
| - значительное зарастание | 0,025 | 0,030 | 0,033 |
| - с густой растительностью и водорослями | 0,030 | 0,035 | 0,040 |
| - русло, выполненное экскаватором или землечерпалкой | 0,025 | 0,028 | 0,033 |
| - то же с растительностью | 0,035 | 0,050 | 0,060 |
| - русло не содержится в исправном состоянии (растительность и кустарник не уничтожаются) | 0,050 | 0,100 | 0,140 |

**Таблица 3 – Коэффициенты шероховатости каналов
(по Н. Н. Павловскому [6, с. 86])**

| Характеристика канала | Значение <i>n</i> | | |
|--|-------------------|-----------------|-----------------|
| | лучшие условия | средние условия | хорошие условия |
| 1 Каналы в земляном русле (при механизированном способе строительства) | | | |
| - каналы в лессе (в нормальном состоянии) | 0,0220 | 0,0240 | 0,0260 |
| - крупные каналы в земляном русле в условиях содержания и ремонта выше средних | 0,0250 | 0,0270 | 0,0290 |
| - крупные каналы в земляном русле в средних условиях содержания | 0,0275 | 0,0300 | 0,0325 |
| - крупные каналы в земляном русле в условиях содержания ниже средних | 0,0300 | 0,0330 | 0,0358 |
| - крупные каналы в земляном русле в сравнительно плохих условиях | 0,0330 | 0,0360 | 0,0390 |
| 2 Каналы в бетонной облицовке | | | |
| - каналы с гладкой поверхностью с тщательной отделкой откосов и дна | 0,011 | 0,012 | 0,013 |
| - без гладкой отделки поверхности, без песка и гравия на дне и откосах | 0,013 | 0,014 | 0,015 |
| - при шероховатых бетонных поверхностях с неудовлетворительно выполненными швами | 0,015 | 0,016 | 0,018 |
| - облицовка бетонированная, выполненная с помощью цемент-пушки: | | | |
| а) в хороших условиях производства при гладкой поверхности | 0,016 | – | – |
| б) в средних условиях, без сглаживания поверхности | – | 0,019 | – |
| в) при неудовлетворительном производстве работ | – | – | 0,021 |
| Примечание – В случае если каналы в бетонной облицовке покрываются мхом, то значения <i>n</i> необходимо увеличивать на 0,002. | | | |

При определении значений приведенных коэффициентов шероховатости по длине применяется расчетный метод по формулам. Таблицы и

расчетные значения приведенных коэффициентов шероховатости анализируются и сравниваются с другими данными и формулами других авторов. В случае необходимости натурные значения коэффициентов шероховатости рассчитываются по формуле при известном расходе и площади живого сечения потока в виде:

$$n_{\text{нат}} = R^{2/3} J^{1/3} / v,$$

где $n_{\text{нат}}$ – натурное значение коэффициента шероховатости;

R – гидравлический радиус, м;

J – гидравлический уклон, равный отношению:

$$J = \Delta H / \Delta l,$$

где ΔH – потеря напора, м;

Δl – длина участка, м;

v – средняя скорость течения, м/с, определяемая по формуле:

$$v = \frac{Q}{w},$$

где Q – расход канала, м³/с;

w – площадь живого сечения потока, м².

Результаты и обсуждение. Анализ представленных в таблицах 1–3 значений коэффициентов шероховатости каналов выполним путем сравнения данных по коэффициентам n с нормативными значениями (когда каналы находятся в нормальном состоянии). Так, для каналов в земляном русле по рекомендациям Р. Р. Чугаева (таблица 2) сравнение с нормативными значениями показывает, что минимальное и среднее их значения после строительства $n = 0,016$ и $0,018$ находятся ниже рекомендуемых нормами, а минимальное значение $n = 0,020$ соответствует нормативному при расходе канала более $25 \text{ м}^3/\text{с}$, но при расходе $1\text{--}25 \text{ м}^3/\text{с}$ среднее значение коэффициента шероховатости n будет меньше нормативного. В случае канала с гравелистым ложем коэффициент шероховатости при расходе $1\text{--}25 \text{ м}^3/\text{с}$ соответствует нормативному при его нормальном состоянии $n = 0,025$. В случае зарастания русла канала средние коэффициенты шероховатости

изменяются от 0,027 до 0,100, что значительно превышает требуемые (нормативные) n (до 4,0 раз) (когда русло не содержится в исправном состоянии, растительность и кустарник не уничтожаются).

Что касается облицованных русел каналов по рекомендациям Р. Р. Чугаева для облицовок, заделанных цементным раствором и бетоном затертым, с $n = 0,011 \dots 0,015$ (таблица 2), они соответствуют нормативным данным (таблица 1).

Значения коэффициентов шероховатости в земляном русле по рекомендациям Н. Н. Павловского в средних условиях (таблица 3) с $n = 0,0240$ до $n = 0,0330$ несколько завышены по сравнению с нормативными требованиями в современных условиях (таблица 1), где n изменяется от 0,020 до 0,0275. Данные по облицованным руслам с $n = 0,011 \dots 0,018$ полностью соответствуют нормативным требованиям.

Отсюда следует вывод, что анализ справочных таблиц 2, 3 свидетельствует о достаточно близких значениях коэффициентов шероховатости к нормативным данным в таблице 1, прежде всего, для бетонных облицовок и меньше для каналов в земляном русле.

Учитывая необходимость обобщения данных по коэффициентам шероховатости не только для условий нормального состояния русла каналов, но и путем сравнения их значений с фактическими данными при сильном зарастании русла растительностью и водорослями, рассмотрим натурные данные о коэффициентах шероховатости в таблице 4.

Так, для каналов в земляном русле (БСК, Терско-Кумский, Невинномысский, Баксан-Малка и др.) коэффициенты их шероховатости соответствуют нормативным значениям (см. таблицу 1). Однако для некоторых каналов (Донской МК, Нижне-Донской, Азовский, Солдатский) коэффициенты шероховатости значительно превышают их нормативные и проектные значения в 1,19–1,66 раза, а для Азовского МК – в 2,21 раза (он характеризуется зарастанием русла камышом до 60 % живого сечения).

Таблица 4 – Натурные данные о коэффициентах шероховатости каналов (по данным Ю. М. Косиченко, Ю. И. Иовчу, М. Ю. Косиченко [1, 5])

| Канал | Расход Q , м ³ /с | Натурное значение коэффициента шероховатости n | Проектное значение коэффициента шероховатости $n_{\text{проект}}$ | Средняя скорость v , м/с |
|--|--------------------------------|--|---|----------------------------|
| Каналы в земляном русле | | | | |
| Большой Ставропольский (БСК, головной участок) – 1–7 км | 189,19 | 0,0225 | 0,0225 | 1,19 |
| | 169,33 | 0,0226 | | 1,15 |
| | 116,17 | 0,0229 | | 1,01 |
| | 80,49 | 0,0232 | | 0,89 |
| | 45,60 | 0,0235 | | 0,74 |
| | 25,84 | 0,0238 | | 0,63 |
| Донской МК | 201,0 | 0,0268* | 0,020 | – |
| Терско-Кумский | 80,0 | 0,0237 | 0,020 | – |
| Невинномысский | 75,0 | 0,0225 | 0,020 | – |
| Северо-Крымский | 62,5 | 0,0224 | 0,020 | – |
| Баксан-Малка | 27,5 | 0,0225 | 0,0225 | – |
| Нижне-Донской МК | 25,6 | 0,0374* | 0,0250 | – |
| Азовский МК | 15,0 | 0,0554 | 0,0250 | – |
| Солдатский МК | 1,45 | 0,0330 | 0,0225 | – |
| Пролетарский МК | 54,0 | 0,0230 | 0,020 | – |
| Каналы в облицовке | | | | |
| БСК-3, третья очередь | 46,5 | 0,0172 | 0,0170 | – |
| Северский Донец – Донбасс | 17,0 | 0,0190 | 0,0170 | – |
| | 17,0 | 0,0300* | 0,0170 | – |
| Г. Ср. Ступки Самур-Апшеронский | 55,0 | 0,0170 | 0,0170 | – |
| Каршинский МК | 175,0 | 0,0179 | 0,0170 | – |
| Северо-Крымский распределительный канал Бг-Р-7 | 290,0 | 0,0190 | 0,0170 | – |
| ПК 30 + 60 | 3,05 | 0,0157 | 0,0150 | 0,56 |
| ПК 56 | 2,59 | 0,0354* | 0,0170 | 0,19 |
| ПК 189 | 1,01 | 0,0432* | 0,0170 | 0,18 |
| ПК 190 | 1,13 | 0,0369* | 0,0170 | 0,20 |
| Бг-Р-8 | 3,84 | 0,0198 | 0,0170 | 0,26 |
| ПК 0 + 90 | | | | |
| Бг-4-х-1 | 0,32 | 0,0146 | 0,0150 | 0,51 |
| Большой Андижанский | 180,0 | 0,0171 | 0,0150 | 3,49 |
| ПК 248 + 50 | | | | |
| ПК 283 | 180,0 | 0,0171 | 0,0150 | 2,60 |
| Канал ТМ-1 | 3,7 | 0,0330* | 0,0150 | – |
| Канал ТМ-2 | 8,4 | 0,0310* | 0,0150 | – |
| Примечание* – значения в условиях сильного зарастания русла. | | | | |

Аналогично для каналов в бетонной облицовке (БСК-3, Самур-Апшеронский, Каршинский, Большой Андижанский, Бг-Р-7, Бг-Р-8) на-

турные значения коэффициента шероховатости соответствуют нормативным и проектным данным. В то же время для таких каналов, как Бг-Р-7 (ПК 56, ПК 189, ПК 190), ТМ-1 и ТМ-2, фактические значения коэффициента n превышают проектные в 2,0–2,54 раза.

Таким образом, как свидетельствуют натурные данные, для многих каналов в процессе эксплуатации характерно превышение нормативных или проектных данных, что обусловлено неизбежным ухудшением их технического состояния, а соответственно снижением их пропускной способности.

В работе Ю. М. Косиченко, Ю. И. Иовчу, М. Ю. Косиченко [1] предлагается ввести в условие по пропускной способности коэффициент α_0 допустимого снижения проектного расхода, который может приниматься по результатам статистической обработки натурных данных:

$$\varphi(Q) = Q_{\text{пр}} - Q, \alpha_0 \cdot Q_{\text{пр}} \geq \varphi(Q) \geq 0,$$

где Q , $Q_{\text{пр}}$ – фактическая и проектная пропускная способность.

В результате статистической обработки данных доверительный интервал варьирования показателя снижения пропускной способности каналов составил $\alpha' = 0,889...0,983$, а коэффициент допустимого снижения пропускной способности $\alpha_0 = 0,047$, т. е. 4,7 % от расхода.

Анализ состояния ложа каналов ряда натурных объектов с бетонными облицовками (БСК, 3-я очередь, распределительные каналы Бг-Р-7 и Бг-Р-8), а также каналов с земляным руслом (БСК-1, Нижне-Донской МК, Азовский МК, Багаевский МК) позволил выявить следующие основные причины повышенной шероховатости русел:

- значительный срок эксплуатации каналов (более 15–20 лет);
- неравномерные деформации оснований бетонных облицовок;
- подмывы плит облицовки водным потоком;
- заиление и зарастание каналов;
- обрушение грунтовых откосов под действием ливневых и грунтовых вод;

- размывы русел каналов в земляном русле.

Рассмотрим далее определение коэффициентов приведенной шероховатости каналов с неоднородной шероховатостью по длине.

Для их расчета используем следующие формулы:

- Н. Н. Павловского (видоизмененная) [5]:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{n_1^2 l_1 + n_2^2 l_2 + n_3^2 l_3 + n_4^2 l_4 + n_5^2 l_5}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент шероховатости канала с пятью неоднородными участками;

n_1, n_2, \dots, n_5 – коэффициент шероховатости пяти неоднородных участков канала;

l_1, l_2, \dots, l_5 – длина каждого неоднородного участка, м;

- Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурина [5]:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{n_1^2 l_1 v_1^2 + n_2^2 l_2 v_2^2 + n_3^2 l_3 v_3^2 + n_4^2 l_4 v_4^2 + n_5^2 l_5 v_5^2}{\bar{v}^2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)}}, \quad (2)$$

где v_1, v_2, \dots, v_5 – средние скорости на отдельных участках канала, м/с;

\bar{v} – средняя скорость всего канала с неоднородной шероховатостью, м/с:

$$\bar{v} = \frac{v_1 l_1 + v_2 l_2 + v_3 l_3 + v_4 l_4 + v_5 l_5}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5};$$

- формула средневзвешенного значения:

$$n_{\text{ср.взв}} = \frac{n_1 l_1 + n_2 l_2 + n_3 l_3 + n_4 l_4 + n_5 l_5}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}. \quad (3)$$

Пример: канал трапецидального сечения с расходом $50 \text{ м}^3/\text{с}$, глубиной $4,5 \text{ м}$, частично облицован железобетонными плитами, а частично имеет земляное русло с гравийно-галечниковым покрытием, уклон дна канала – $0,000045$, длина $L_k = 12300 \text{ м}$. Остальные данные заданы в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные для расчета приведенного коэффициента шероховатости с неоднородной шероховатостью по длине

| Покрытие ложа канала | n | l , м | C , м ^{0,5} /с | v , м/с |
|--|--------|--------------------|---------------------------|-----------|
| 1 Гравийно-галечниковое, средние условия | 0,0250 | 1000 | 73,9 | 0,784 |
| 2 Облицовка железобетонными плитами грубая | 0,017 | 1500 | 108,65 | 1,150 |
| 3 Крепление русла габионными плитами | 0,030 | 3000 | 61,57 | 0,653 |
| 4 Гравийно-галечниковое в нижесредних условиях | 0,0275 | 4500 | 67,16 | 0,712 |
| 5 Облицовка железобетонными плитами грубая | 0,015 | 2300 | 123,18 | 1,305 |
| | | $\Sigma = 12300$ м | | |

Определение приведенного коэффициента шероховатости:

- по формуле Н. Н. Павловского (1):

$$n_{пр} = \sqrt{\frac{0,025^2 \cdot 1000 + 0,017^2 \cdot 1500 + 0,03^2 \cdot 3000 + 0,0275^2 \cdot 4500 + 0,015^2 \cdot 2300}{1000 + 1500 + 3000 + 4500 + 2300}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \sqrt{\frac{7,678}{12300}} = 0,0250;$$

- по формуле Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурина (2):

$$n_{пр} = \sqrt{\frac{0,025^2 \cdot 1000 \cdot 0,784^2 + 0,017^2 \cdot 1500 \cdot 1,15^2 + 0,03^2 \cdot 3000 \cdot 0,653^2 + 0,0275^2 \cdot 4500 \cdot 0,712^2 + 0,015^2 \cdot 2300 \cdot 1,305^2}{0,867^2 (1000 + 1500 + 3000 + 4500 + 2300)}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \sqrt{\frac{4,054}{9245,8}} = 0,0209,$$

где $v = \frac{0,784 \cdot 1000 + 1,15 \cdot 1500 + 0,653 \cdot 3000 + 0,712 \cdot 4500 + 1,305 \cdot 2300}{1000 + 1500 + 3000 + 4500 + 2300} =$

$$= \frac{10673,5}{12300} = 0,867 \text{ м/с};$$

- по формуле средневзвешенного значения (3):

$$n_{ср.взв} = \frac{0,025 \cdot 1000 + 0,017 \cdot 1500 + 0,03 \cdot 3000 + 0,0275 \cdot 4500 + 0,015 \cdot 2300}{1000 + 1500 + 3000 + 4500 + 2300} =$$

$$= \frac{264,25}{12300} = 0,0215.$$

Результаты расчетов приведенного коэффициента шероховатости с неоднородной шероховатостью показаны в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение результатов расчета приведенного коэффициента шероховатости по длине с использованием различных формул

| Исходные данные | $n_{пр}$ по формуле | | |
|---|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| | Н. Н. Павловского | Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурина | средневзвешенного значения |
| $n_1 = 0,0250; n_2 = 0,017;$ $n_3 = 0,030; n_4 = 0,0275;$ $n_5 = 0,015; L_k = 12300;$ $\bar{v} = 0,867$ | $\frac{0,0250}{19,6 \%}$ | $\frac{0,0209}{-}$ | $\frac{0,0215}{2,8 \%}$ |
| Примечание – Числитель – значения $n_{пр}$, знаменатель – отклонение значения $n_{пр}$ от формулы Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурина. | | | |

Полученные результаты расчета значений приведенного коэффициента шероховатости показывают, что по формулам Н. Н. Павловского значение $n_{пр}$ завышено на 19,6 %, а формулы Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурина и средневзвешенного значения дают очень близкие результаты с отклонением 2,8 %.

Выводы

1 В статье обобщены данные по наиболее известным таблицам шероховатости каналов в земляном русле и облицовке по СП 100.13330.2016, материалам Р. Р. Чугаева и Н. Н. Павловского. Проведено сравнение данных с нормативными значениями коэффициентов шероховатости, которое показывает достаточно близкие результаты для бетонных облицовок и недостаточно совпадающие данные для каналов в земляном русле.

2 С целью обобщения данных по коэффициентам шероховатости не только при нормальном состоянии каналов, но и при сильном их зарастании растительностью и водорослями проанализированы натурные данные о коэффициентах шероховатости.

3 Установлено, что для каналов в земляном русле (БСК, Терско-Кумский, Невинномысский и др.) коэффициенты их шероховатости соответствуют нормативным и проектным значениям, для Донского МК, Ниж-

не-Донского и др. коэффициенты n значительно превышают нормативные и проектные значения (в 1,19–1,66 раза), а для Азовского МК – в 2,21 раза (он характеризуется зарастанием русла до 60 % живого сечения).

4 Для каналов в бетонной облицовке (БСК-3, Самур-Апшеронский, Каршинский и др.) натурные значения коэффициентов n соответствуют нормативным и проектным данным, а для Бг-Р-7, ТМ-1, ТМ-2 фактические значения коэффициента шероховатости превышают проектные в 2,0–2,54 раза.

5 В связи с этим предлагается ввести в условие по пропускной способности коэффициент α_0 допустимого снижения проектного расхода, который может приниматься по результатам статистической обработки натурных данных, что обусловлено неизбежным ухудшением технического состояния каналов. В результате статистической обработки данных доверительный интервал варьирования показателя снижения пропускной способности составил $\alpha' = 0,889...0,983$, или от 1,7 до 11,1 % от проектного расхода в канале.

6 Проведенный анализ состояния ложа каналов ряда натуральных объектов с бетонными облицовками и каналов с земляными руслами позволил выявить основные причины повышенной шероховатости поверхности русел: значительный срок эксплуатации каналов (более 15–20 лет), неравномерные деформации оснований бетонных облицовок, заиление и зарастание русел каналов, обрушение откосов под действием ливневых и грунтовых вод, размывы русел каналов.

7 Рассмотрены формулы для определения коэффициентов приведенной шероховатости неоднородных русел каналов. Проведены расчеты $n_{пр}$ для примера, которые показали, что значение $n_{пр}$ по формуле Н. Н. Павловского получено завышенным до 20 %, а другие формулы дают близкие результаты с отклонением до 3 %.

Список использованных источников

1 Косиченко, Ю. М. Вероятностная модель эксплуатационной надежности крупных каналов / Ю. М. Косиченко, Ю. И. Иовчу, М. Ю. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 12. – С. 39–45.

2 Баев, О. А. Особенности гидравлических условий эксплуатации крупных каналов / О. А. Баев, Ю. М. Косиченко // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. – 2019. – № 3(03). – С. 145–160. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=43>. – DOI: 10.31774/2658-7890-2019-3-145-160.

3 Косиченко, Ю. М. Гидравлическая эффективность крупных каналов Северного Кавказа / Ю. М. Косиченко, К. Г. Гурин, А. В. Самойленко // Водное хозяйство России. – 2005. – Т. 7, № 4. – С. 378–391.

4 Штеренлихт, Д. В. Гидравлика: учеб. для вузов / Д. В. Штеренлихт. – М.: Колос, 2004. – 655 с.

5 Косиченко, Ю. М. Каналы переброски стока России / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 470 с.

6 Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. – М.: Эколит, 2011. – 312 с.

7 Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) / Р. Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

8 Дэскэлеску, Н. Рациональное распределение воды в оросительной сети / Н. Дэскэлеску. – М.: Колос, 1982. – 158 с.

9 Вербицкий, В. С. Приведенные гидравлические сопротивления рек и каналов / В. С. Вербицкий, А. Г. Ходзинская // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 3. – С. 37–47.

10 Рылова, И. А. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов / И. А. Рылова, В. С. Боровков // Вестник МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 181–187.

11 Чоу, В. Т. Гидравлика открытых каналов / В. Т. Чоу; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.

12 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.

13 Resistance to flow on a sloping channel covered by dense vegetation following a dam break / M. Melis, D. Poggi, G. O. Fasanella, S. Cordero, G. G. Katul // Water Resources Research. – 2019. – № 31(2). – P. 274–292. – DOI: 10.1029/2018WR023889.

References

1 Kosichenko Yu.M., Iovchu Yu.I., Kosichenko M.Yu., 2007. *Veroyatnostnaya model' ekspluatatsionnoy nadezhnosti krupnykh kanalov* [A probabilistic model of operational reliability of major canals]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 12, pp. 39-45. (In Russian).

2 Baev O.A., Kosichenko Yu.M., 2019. *Osobennosti gidravlicheskih usloviy ekspluatatsii krupnykh kanalov* [Features of hydraulic conditions of major canals operation]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo* [Ecology and Water Management], no. 3(03), pp. 145-160, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=43>, DOI: 10.31774/2658-7890-2019-3-145-160. (In Russian).

3 Kosichenko Yu.M., Gurin K.G., Samoilenko A.V., 2005. *Gidravlicheskaya effektivnost' krupnykh kanalov Severnogo Kavkaza* [Hydraulic efficiency of major canals of the North Caucasus]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii* [Water Management of Russia], vol. 7, no. 4, pp. 378-391. (In Russian).

4 Shterenlikht D.V., 2004. *Gidravlika: uchebnik dlya vuzov* [Hydraulics: Textbook for Higher Educational Institutions]. Moscow, Kolos Publ., 655 p. (In Russian).

5 Kosichenko Yu.M., 2004. *Kanally perebroski stoka Rossii* [Runoff Transfer Canals in Russia]. Novocherkassk, NGMA Publ., 470 p. (In Russian).

6 Kiselev P.G. [et al.], 2011. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of Hydraulic Calculations]. Moscow, Ekolit Publ., 312 p. (In Russian).

7 Chugaev R.R., 1982. *Gidravlika (tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti)* [Hydraulics (Technical Fluid Mechanics)]. 4th ed., Leningrad, Energoizdat Publ., 672 p. (In Russian).

8 Descalescu N., 1982. *Ratsional'noe raspredelenie vody v orositel'noy seti* [Rational Distribution of Water in Irrigation Network]. Moscow, Kolos Publ., 158 p. (In Russian).

9 Verbitskiy V.S., Khodzinskaya A.G., 2018. *Privedennyye 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).

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

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

12 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*, 573, pp. 180-193, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.071.

13 Melis M., Poggi D., Fasanella G.O., Cordero S., Katul G.G., 2019. Resistance to flow on a sloping channel covered by dense vegetation following a dam break. *Water Resources Research*, no. 31(2), pp. 274-292, DOI: 10.1029/2018WR023889.

Косиченко Юрий Михайлович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор

Должность: главный научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: kosichenko-11@mail.ru

Kosichenko Yuriy Mikhaylovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Professor

Position: Chief Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: kosichenko-11@mail.ru