

УДК 627.84

DOI: 10.31774/2658-7890-2019-3-145-160

О. А. Баев, Ю. М. Косиченко

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

ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРУПНЫХ КАНАЛОВ

Цель: расчетная оценка коэффициентов шероховатости земляных, бетонных и частично облицованных русел крупных каналов. **Материалы и методы:** в основу работы положены материалы натурных исследований каналов в земляном русле и в бетонной облицовке на примере Донского магистрального, Пролетарского, Терско-Кумского, Большого Ставропольского, Невинномысского, Гиссарского и других каналов. В статье рассмотрены современные проблемные вопросы эксплуатации крупных каналов, связанные с особенностями их работы, в т. ч. при образовании ледяного покрова в зимний период при напорном и безнапорном движении воды, формировании деформаций в руслах динамической устойчивости, а также в случаях, когда наблюдается волнистый рельеф дна в виде рифелей, дюн или гряд. **Результаты:** на основании обобщающих исследований крупных каналов приведены критерии и условия их эффективности по пропускной способности, допускаемым скоростям, руслоформирующим процессам, коэффициентам шероховатости, относительной ширине русла, коэффициенту полезного действия и допускаемым потерям воды на фильтрацию. По результатам обработки натурных данных были составлены гистограммы распределения коэффициентов шероховатости земляных и бетонных русел каналов и получены их средние значения (для земляного русла $n = 0,0227$, для бетонного $n = 0,0169$). **Выводы:** согласно проведенным исследованиям, при использовании натурных данных авторов по 25 каналам были получены значения коэффициента снижения пропускной способности $\alpha' = 0,958$ и снижения коэффициента полезного действия $\beta' = 0,935$, что свидетельствует в среднем о снижении пропускной способности на 4,2 % и коэффициента полезного действия на 6,5 %. Для частично облицованных русел каналов рекомендованы расчетные зависимости для определения приведенных коэффициентов шероховатости по длине при равномерном и неравномерном движении водного потока.

Ключевые слова: магистральный канал; коэффициент шероховатости; земляное русло; бетонная облицовка; частично облицованное русло.

О. А. Baev, Yu. M. Kosichenko

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

FEATURES OF HYDRAULIC CONDITIONS OF LARGE CANALS OPERATION

Objective: a calculated assessment of the roughness coefficients of earthen, concrete and partially lined channels of large canals. **Materials and Methods:** the materials of field studies of canals in the earthen channel and in the concrete lining channel by the example of the Donskoy main canal, Proletarsky, Tersko-Kumsky, Bolshoi Stavropol'sky, Nevinno-myssky, Gissar and other canals are the basis of the work. The current issues of large canals



operation related to their work features, including the formation of ice sheet in winter at pressure and free flow of water, the formation of deformations in beds of dynamic stability, as well as in cases with a rolling bottom relief in the form of ripples, dunes or ridges are described. **Results:** based on generalized studies of large canals, the criteria and conditions for their efficiency in terms of carrying capacity, permissible velocities, bed formation flow rate, roughness coefficients, relative canal width, efficiency and permissible canal seepage loss are given. Based on the results of field data processing distribution histograms of roughness coefficients of earthen and concrete channel beds were compiled and their average values were obtained (for the earth channel $n = 0.0227$, for the concrete channel $n = 0.0169$). **Conclusions:** according to the research, when using the authors' field data on 25 canals, the values of the carrying capacity reduction coefficient $\alpha' = 0.958$ and decrease in efficiency $\beta' = 0.935$ were obtained, that indicates an average decrease in carrying capacity by 4.2 % and efficiency by 6.5 % . For partially lined channel beds, calculated dependencies for determining the given roughness coefficients along the length with uniform and unsteady flow are recommended.

Key words: main canal; roughness coefficient; earthen bed; concrete lining; partially lined bed.

Введение. В последние годы при эксплуатации крупных каналов возникает ряд проблем, которые обусловлены особенностями их работы, техническими, экологическими и многими другими причинами.

К крупным каналам относятся каналы расходом более 50–100 м³/с, которые используются комплексно для орошения и обводнения, водоснабжения, энергетики, судоходства, рыбного хозяйства и пополнения вод малых рек [1]. Особенностью их работы является круглогодичная эксплуатация с различными режимами подачи воды: в летний период с максимальными расходами, в зимний период – с минимальными расходами при возможном образовании ледяного покрова, в весенний и осенний периоды пропуск воды осуществляется расходами ниже максимальных. Для земляных русел каналов характерно образование русловых процессов, заиление, обрушение откосов, подмывы берегов, частичное зарастание погруженной водной растительностью, значительная фильтрация, подъем уровня грунтовых вод и подтопление прилегающих приканальных территорий [1–4].

Материалы и методы. В основу работы положены материалы натурных исследований каналов в земляном русле и в бетонной облицовке. При равномерном движении воды в каналах приведенный коэффициент

шероховатости определяется по формуле (1), а при равномерном движении – по формуле (2). В случае образования ледяного покрова в зимний период возможно безнапорное и напорное движение воды, что необходимо учитывать в гидравлических расчетах. Расчет канала с ледяным покровом выполняется по формуле Шези (3) с учетом приведенного коэффициента шероховатости ($n_{прив}$). На крупных каналах, выполненных в земляном русле, на гидравлические сопротивления влияют русловые деформации. При дюнно-грядовом рельефе дна гидравлические сопротивления определяются суммарным коэффициентом шероховатости по формуле (4) или обобщенным коэффициентом шероховатости по зависимости (5).

Результаты и обсуждение. На основе обобщающих исследований крупных каналов [5–8] и опыта их эксплуатации [2, 8] ранее были предложены следующие критерии и условия их эффективности:

- по пропускной способности:

$$\alpha' Q_{пр} \leq Q \leq Q_{пр};$$

- по допускаемым скоростям (для неразмываемых русел при соблюдении условий незаиляемости, неразмываемости):

$$v_{нез} \leq v \leq v_{нер};$$

- по руслоформирующим процессам (для размываемых русел каналов):

а) согласно В. С. Алтунину [4]:

$$1/6 \leq x_p \leq 1/8;$$

б) согласно С. Х. Абальянцу [9]:

$$1,0 \leq v/v_{нер} \leq 1,3 - 1,4;$$

- по коэффициенту шероховатости русла:

$$\alpha' n_{пр} \leq n \leq n_{пр};$$

- по относительной ширине русла:

$$\beta_{г.н} < \beta < \beta_{max};$$

- по коэффициенту полезного действия (КПД):

$$\beta' \eta_{\text{нор}} \leq \eta \leq \eta_{\text{нор}};$$

- по допускаемым потерям на фильтрацию:

$$\gamma' q_{\text{ф.доп}} \leq q_{\text{ф}} \leq q_{\text{ф.доп}},$$

где α' – коэффициент снижения пропускной способности (приближенно равен $\alpha' = n_{\text{пр}}/n$);

$Q_{\text{пр}}$ – проектная пропускная способность, м³/с;

Q – расход канала при эксплуатации, м³/с;

$u_{\text{нез}}$, $u_{\text{нер}}$ – средняя допускаемая незаиляющая и допускаемая неразмы-
вающая скорости, м/с;

u – средняя скорость потока, м/с;

$x_{\text{р}}$ – кинематический показатель руслового потока;

$n_{\text{пр}}$ – проектный коэффициент шероховатости русла;

n – коэффициент шероховатости русла при эксплуатации;

$\beta_{\text{г.н}}$, $\beta_{\text{мах}}$ – гидравлически наивыгоднейшая и максимальная относи-
тельная ширина по дну, м;

β' – коэффициент снижения КПД канала;

$\eta_{\text{нор}}$ – нормативный КПД¹;

η – КПД;

γ' – коэффициент допустимых потерь на фильтрацию;

$q_{\text{ф.доп}}$ – допустимые удельные потери на фильтрацию с 1 км, м³/с;

$q_{\text{ф}}$ – потери на фильтрацию, м³/с.

Согласно проведенным исследованиям [9], при использовании на-
турных данных авторов по 25 каналам были получены следующие значе-

¹ Мелиоративные системы и сооружения: СП 100.13330.2016: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва РФ 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17 // ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет [Электронный ресурс]. – Кодекс Юг, 2017.

ния коэффициентов: $\alpha' = 0,958$ и $\beta' = 0,935$, что свидетельствует в среднем о снижении пропускной способности каналов на 4,2 % и КПД каналов на 6,5 %. Эти данные соответствуют показателям каналов с нормальным техническим состоянием, при ухудшении технического состояния коэффициент α' может значительно снижаться и достигать значений для каналов в земляном русле 0,430, т. е. при снижении пропускной способности на 570 %. В то же время среднее значение коэффициентов шероховатости крупных каналов в земляном русле составило $n_{cp} = 0,0228$, а КПД – $\eta_{cp} = 0,806$.

На некоторых крупных каналах при эксплуатации, например на Большом Ставропольском канале (1-я очередь), там, где встречаются наиболее опасные участки, проходящие в насыпи, с целью исключения прорыва дамб вследствие фильтрации устраиваются бетонные облицовки, протяженность которых может составлять от 300 до 1000 м. Такие русла с чередованием участков в земляном русле и в облицовке получили название частично облицованных русел по длине [3].

Для определения шероховатости частично облицованных русел вычисляется приведенный коэффициент шероховатости ($n_{прив}$) по длине:

- при равномерном движении потока:

$$n_{прив} = \sqrt{\frac{n_1^2 l_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v}\right)^2 + n_2^2 l_2 \cdot \left(\frac{v_2}{v}\right)^2 + \dots + n_n^2 l_n \cdot \left(\frac{v_n}{v}\right)^2}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}}; \quad (1)$$

- при неравномерном движении потока:

$$n_{cp} = \sqrt{\frac{(i \cdot l + \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) \cdot R_{cp}^{2y+1}}{v_{cp}^2 \cdot l}}, \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_1 = h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}, \quad \mathcal{E}_2 = h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g},$$

где n_1, n_2, \dots, n_n – коэффициенты шероховатости отдельных участков;

l_1, l_2, \dots, l_n – длины отдельных участков, м;

v_1, v_2, \dots, v_n – средние скорости на участках, м/с;

v – условная осредненная скорость на всей протяженности канала, м/с;

n_{cp} – средний коэффициент шероховатости русла;

i – уклон для рассматриваемого участка канала;

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ – удельные энергии рассматриваемых сечений, м;

R_{cp}, v_{cp} – средние значения гидравлического радиуса (м) и скорости (м/с);

α_1, α_2 – коэффициент Кориолиса в 1-м и 2-м сечениях;

h_1, h_2 – глубины потока в рассматриваемых сечениях, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Формула (1) в частном случае при условии $v_1 = v_2 = \dots = v_n = \bar{v}$ получает вид аналогичной зависимости Н. Н. Павловского [10], но для неоднородного русла по поперечному сечению:

$$n_{прив} = \sqrt{\frac{n_1^2 l_1 + n_2^2 l_2 + \dots + n_n^2 l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}}.$$

Для определения осредненного значения коэффициентов шероховатости каналов в земляном русле используем натурные данные [1, 2, 5, 6, 8, 11] по следующим каналам: Донской магистральный канал, Пролетарский магистральный канал, Терско-Кумский канал, Большой Ставропольский канал (1-я очередь), Невинномысский канал, Большой Ферганский канал, Гиссарский магистральный канал, канал Баксан-Малка, Каракумский канал, Деривационный канал.

На рисунке 1 приведена гистограмма распределения натуральных данных для каналов в земляных руслах с общим количеством значений коэффициентов шероховатости $\sum N_i = 80$.

В результате обработки этих данных среднее значение коэффициента шероховатости земляных русел ($n_{зем.ср}$) составило:

$$n_{\text{зем.ср}} = \frac{\sum N_i \cdot n_i}{\sum N_i} = \frac{1,818}{80} = 0,0227,$$

где N_i – количество данных каждого интервала, ед.;

n_i – значение коэффициента шероховатости.

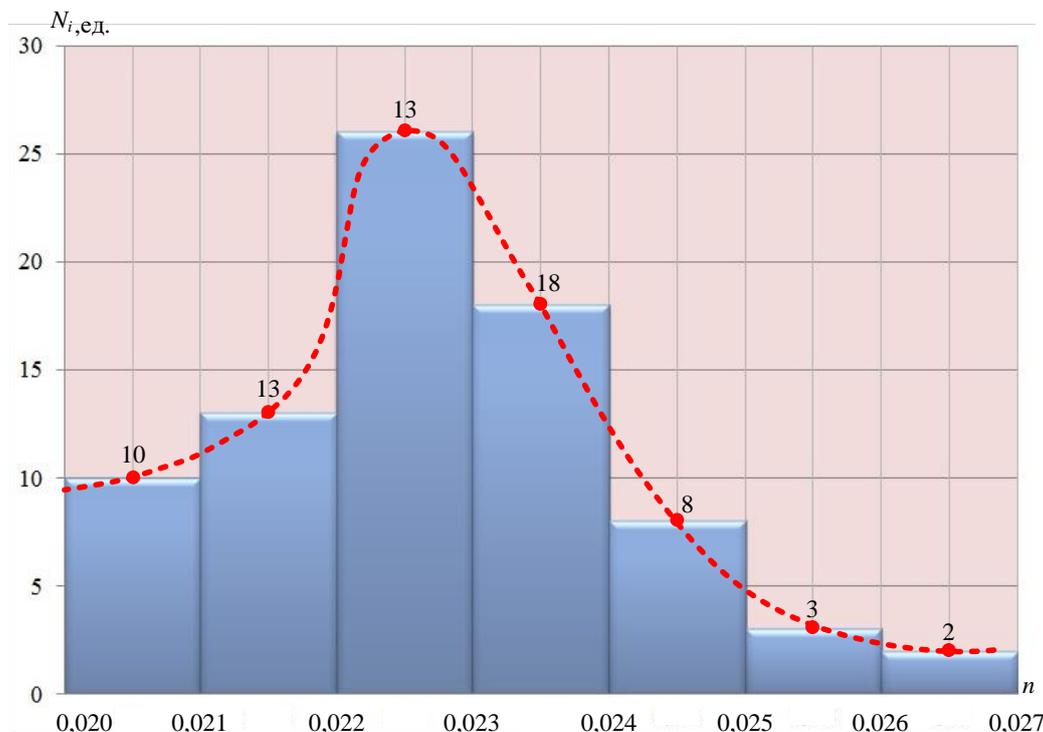


Рисунок 1 – Гистограмма распределения натуральных данных о коэффициентах шероховатости земляных русел каналов с нормальным состоянием

Анализ огибающей кривой гистограммы показывает, что она соответствует логарифмически нормальному закону (см. рисунок 1).

При определении осредненного значения коэффициента шероховатости каналов в бетонной облицовке учитываем натурные данные по каналам: Багаевские распределители Бг-Р-7, Бг-Р-8, Бг-4-Х-1, Большой Ставропольский канал (3-я очередь), Каршинский магистральный канал, Северо-Крымский канал, Большой Ферганский канал, Большой Алматинский канал, Магистральный канал Чегемской ООС, каналы Муминобод, Чоршанба, Танхоз и др. [1, 8].

На рисунке 2 представлена гистограмма распределения натуральных

данных для каналов в бетонной облицовке с общим количеством значений коэффициентов шероховатости $\sum N_i = 65$. Среднее значение коэффициента шероховатости каналов в бетонной облицовке ($n_{\text{бет.ср}}$) будет равно:

$$n_{\text{бет.ср}} = \frac{\sum N_i \cdot n_i}{\sum N_i} = \frac{1,0995}{65} = 0,0169.$$

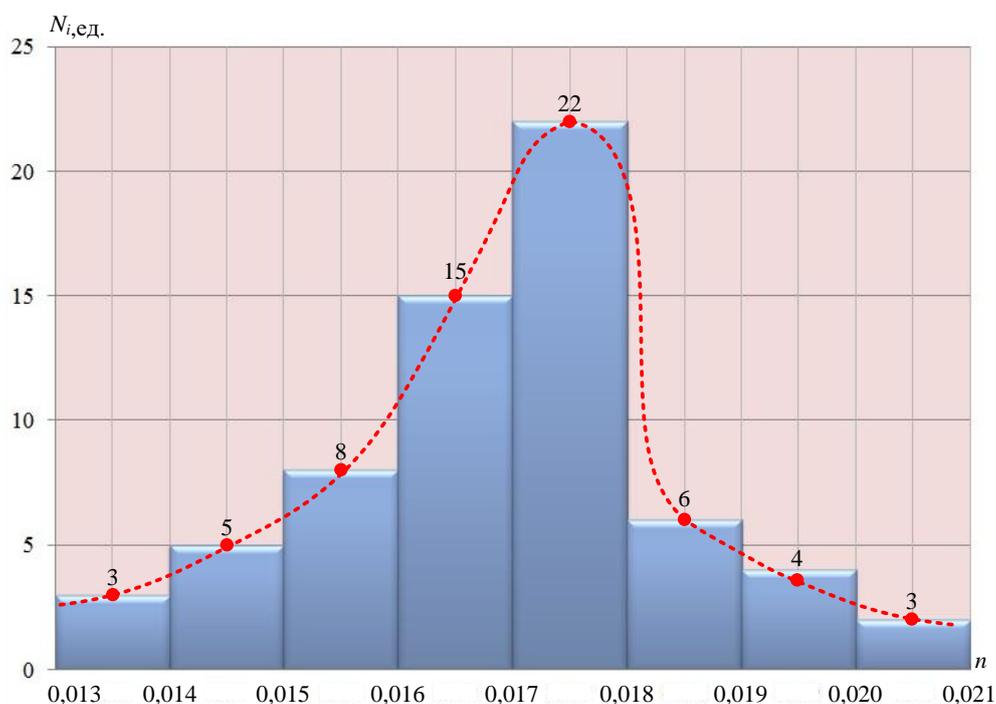


Рисунок 2 – Гистограмма распределения натуральных данных о коэффициентах шероховатости каналов в бетонной облицовке с нормальным состоянием

Кривая распределения будет близка к нормальному закону (см. рисунок 2). Таким образом, полученные средние значения коэффициентов шероховатости $n_{\text{зем.ср}} = 0,0227$ и $n_{\text{бет.ср}} = 0,0169$ достаточно близки к данным натурных наблюдений Ф. И. Карасева [5, 12], В. С. Алтунина [4], Ю. М. Косиченко [1, 2, 11]. Указанные значения коэффициентов шероховатости рекомендуются к использованию при проектировании новых объектов.

В случае образования ледяного покрова в зимний период работы каналов возможно безнапорное и напорное движение воды. Когда наблюдается безнапорное движение, ледяной покров изменяется вместе с уровнями воды, а уровень воды в лунках льда находится ниже на $0,92h_{\text{л}}$ нижней по-

верхности льда (где $h_{\text{л}}$ – толщина льда, м). При безнапорном движении лед представляет собой плавающее тело, которое оказывает дополнительное сопротивление потоку. Когда лед прочно смерзается с откосами и не изменяется одновременно с уровнями воды, наступает напорное движение потока.

Напорный поток под ледяным покровом разделяют на два слоя, в которых распределение скоростей на вертикали различно. В. С. Алтунин [4] из анализа кинематической структуры потока под ледяным покрытием выделяет три наиболее типичные расчетные схемы. Первая схема относится к каналам, покрытым льдом малой толщины ($h_{\text{л}} = 0,2 \dots 0,5$ м) с гладкой поверхностью нижней кромки. Высота выступов шероховатости на нижней поверхности льда ($\Delta_{\text{л}}$) настолько незначительна, что при наличии неподвижных русловых деформаций (рифелей) или небольших гряд в русле (при $\Delta_{\text{д}} > \Delta_{\text{л}}$) коэффициент шероховатости русла $n_{\text{р}} > n_{\text{л}}$ (где $n_{\text{р}}$ – коэффициент шероховатости русла канала; $n_{\text{л}}$ – коэффициент шероховатости нижней поверхности ледяного покрытия). Для каналов значение $n_{\text{р}}$ принимают в интервале 0,015–0,035. Меньшие значения $n_{\text{р}}$ характерны для устойчивых каналов с глубиной потока свыше 5 м, а большие – для каналов с интенсивным русловым процессом с глубиной до 5 м, схема справедлива для тех напорных потоков под ледяным покровом, у которых $n_{\text{л}} < 0,015 - 0,020$ (для больших каналов) и $n_{\text{л}} < 0,020 - 0,035$ (для средних каналов).

Вторая и третья схемы будут наблюдаться во второй и третий период ледостава, когда $\Delta_{\text{д}} \approx \Delta_{\text{л}}$ или $\Delta_{\text{д}} > \Delta_{\text{л}}$. Вторым случаем характерен для периода появления волновых образований на нижней поверхности ледяного покрова, а третья схема представляет наиболее сложный случай, когда образуется ледяной покров с повышенной шероховатостью нижней кромки при $n_{\text{л}} > n_{\text{д}}$ и $\Delta_{\text{л}} > \Delta_{\text{д}}$.

Расчет каналов с ледяным покровом проводится по формуле Шези с учетом приведенного коэффициента Шези:

$$Q = C_{\text{пр}} \cdot \omega \cdot \sqrt{R \cdot I}, \quad (3)$$

где Q – расход воды в канале, м³/сут;

$C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент Шези, определяемый из соотношения

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{n_{\text{пр}}} R^y;$$

ω – площадь живого сечения, м²;

R – гидравлический радиус, м;

I – гидравлический уклон.

Приведенный коэффициент шероховатости русла ($n_{\text{прив}}$) с ледяным покровом определяется по формуле Н. Н. Павловского [13]:

$$n_{\text{прив}} = \sqrt{\frac{n_{\text{р}}^2 \cdot \chi_{\text{р}} + n_{\text{л}}^2 \cdot \chi_{\text{л}}}{\chi_{\text{р}} + \chi_{\text{л}}}},$$

где $n_{\text{р}}$, $n_{\text{л}}$ – коэффициенты шероховатости русла и нижней поверхности ледяного покрова;

$\chi_{\text{р}}$, $\chi_{\text{л}}$ – смоченные периметры русла и поверхности ледяного покрова.

На крупных каналах в земляном русле существенное влияние на гидравлические сопротивления оказывают русловые деформации. Гидравлические сопротивления в земляных руслах каналов динамической устойчивости формируются при значительных средних скоростях потока, которые превышают допустимые неразмывающие ($v > v_{\text{н.р}}$). Особенностью русел каналов динамической устойчивости [6] является формирование волнистого рельефа дна в виде рифелей, дюн или гряд, обеспечивающих транспортирование наносов и создающих дополнительное сопротивление движению потока.

Для таких русел каналов динамической устойчивости различают два

типа шероховатостей дна: шероховатость, обусловленная крупностью фракций донных наносов (зернистая шероховатость), и шероховатость, обусловленная высотой русловых образований.

Гидравлические сопротивления при донно-грядовом рельефе дна учитываются двумя способами: суммарным коэффициентом шероховатости (n_c):

$$n_c = n_з + n_r, \quad (4)$$

и обобщенным коэффициентом шероховатости (n_o), учитывающим суммарно коэффициент зернистой и донно-грядовой шероховатости:

$$n_o = n_{з.с} + n_{r.с}, \quad (5)$$

где $n_з$ – коэффициент зернистой шероховатости;

n_r – коэффициент донно-грядовой шероховатости;

$n_{з.с}$ – коэффициент суммарной зернистой шероховатости;

$n_{r.с}$ – коэффициент суммарной донно-грядовой шероховатости.

Коэффициент Шези зернистой шероховатости определяем по формулам с использованием коэффициента шероховатости ложа канала с учетом вида грунта (связный, несвязный). Для коэффициента Шези грядовой шероховатости (C_r) рекомендуется формула В. С. Кнороза, полученная на основании лабораторных экспериментов [4]:

$$C_r = 3,16 \cdot \sqrt{g} \cdot \left(\frac{R}{h_r}\right)^{\frac{1}{8}} \cdot \left(\frac{l_r}{h_r}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где $\frac{R}{h_r}$ – относительная высота гряды, м;

l_r – длина гряды, м;

$\frac{l_r}{h_r}$ – крутизна гряды.

На основании исследований В. И. Елфимова [7] с использованием

натурных данных рассмотрим следующие формулы для определения коэффициента шероховатости при дюнно-грядовом рельефе дна:

- для дюнного рельефа (n_d):

$$n_d = 0,023 \cdot \left[\frac{h_d}{\left(\frac{v}{v_o} \right) - \left(\frac{v_d}{v_o} \right)_o} \right]^{0,55};$$

- для грядового рельефа (n_r):

$$n_r = 0,027 \cdot \frac{h_r}{\left(\frac{v}{v_o} \right) - \left(\frac{v_r}{v_o} \right)_o},$$

где h_d , h_r – высота дюн и гряд, м;

v – средняя скорость в русле, м/с;

v_o – неразмывающая скорость частиц, определяемая по зависимости

Ц. Е. Мирцхулавы, м/с;

v_d , v_r – скорость начала образования дюнно-грядового рельефа, м/с:

$$\left(\frac{v_d}{v_o} \right)_o = 1,07 \dots 1,10, \left(\frac{v_r}{v_o} \right)_o = 1,15 \dots 1,18.$$

Фактические натурные наблюдения показывают, что в каналах с песчаным руслом при скоростях течения, превышающих предельные неразмывающие, русло канала по дну принимает однородное грядовое очертание [14, 15]. Такой же рельеф можно заметить и в каналах, выполненных в супеси и суглинке, где дно русла покрывается песком. Для более надежной оценки гидравлических сопротивлений необходимо использовать данные натурных наблюдений, определяя их суммарно по второму способу.

Выводы

1 В статье рассмотрены современные проблемные вопросы эксплуатации крупных каналов, связанные с особенностями их работы, в т. ч. при образовании ледяного покрова в зимний период при напорном и без-

напорном движении воды, формировании деформаций в руслах динамической устойчивости, когда наблюдается волнистый рельеф дна в виде рифелей, дюн или гряд.

2 На основании обобщающих исследований и опыта эксплуатации крупных каналов приведены критерии и условия их эффективности по пропускной способности, допускаемым скоростям, руслоформирующим процессам, коэффициентам шероховатости, относительной ширине русла, коэффициенту полезного действия и допускаемым потерям воды на фильтрацию.

3 По результатам обработки натуральных данных были составлены гистограммы распределения коэффициентов шероховатости земляных и бетонных русел каналов с нормальным техническим состоянием и получены их средние значения, составляющие $n_{зем.ср} = 0,0227$ и $n_{бет.ср} = 0,0169$.

4 Для частично облицованных русел каналов рекомендованы расчетные зависимости для определения приведенных коэффициентов шероховатости по длине при равномерном и неравномерном движении водного потока.

Список использованных источников

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

2 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.

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 Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

5 Карасев, И. Ф. Русловые процессы при переброске стока / И. Ф. Карасев. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.

6 Железняков, Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек / Г. В. Железняков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.

7 Рабкова, Е. К. Проектирование и расчет оросительных каналов в земляном русле / Е. К. Рабкова. – М.: УДК, 1990. – 252 с.

8 Косиченко, Ю. М. Повышение эффективности эксплуатации крупных каналов и обоснование формы и гидравлических сопротивлений русел полигонального сечения / Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 93–103.

9 Абальянц, С. Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах / С. Х. Абальянц. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 239 с.

10 Павловский, Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения: собр. соч. / Н. Н. Павловский. – Т. 2. – М. – Л., 1956. – 771 с.

11 Косиченко, Ю. М. Гидравлические и эксплуатационные критерии функционирования крупных каналов перераспределения стока / Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 5(174). – С. 62–66.

12 Карасев, И. Ф. Комплексы подобия и гидравлические сопротивления самоформирующихся русел рек и каналов / И. Ф. Карасев // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 12. – С. 27–31.

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

14 Курбанов, С. О. К гидравлическому расчету наивыгоднейших сечений энергетических каналов полигонального профиля / С. О. Курбанов, Н. В. Ханов // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 7. – С. 40–43.

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

References

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

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

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

4 Altunin V.S., 1979. *Meliorativnye kanaly v zemlyanykh ruslakh* [Reclamation Canals in Earthen Beds]. Moscow, Kolos Publ., 255 p. (In Russian).

5 Karasev I.F., 1975. *Ruslovye protsessy pri perebrozke stoka* [Channel Processes at Water Transfer]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 288 p. (In Russian).

6 Zheleznyakov G.V., 1981. *Proyektirovanie i raschet orositel'nykh kanalov v zemlyanom rusle* [Carrying Capacity of Canal and River Beds]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 311 p. (In Russian).

7 Rabkova E.K., 1990. *Proyektirovanie i raschet orositel'nykh kanalov v zemlyanom rusle* [Designing and Calculation of Irrigation Canals in the Earthen Channel]. Moscow, UDC Publ., 252 p. (In Russian).

8 Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., 2018. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii krupnykh kanalov i obosnovanie formy i gidravlicheskikh soprotivleniy rusel poligonal'nogo secheniya* [Increasing efficiency of operation of large canals and substantiation of the form and hydraulic resistance of channels of the polygonal section]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. North Caucasus Region. Technical Sciences], no. 2, pp. 93-103. (In Russian).

9 Abal'yants S.Kh., 1981. *Ustoychivye i perekhodnye rezhimy v iskusstvennykh ruslakh* [Stable and Transitional Regimes in Artificial Canals]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 239 p. (In Russian).

10 Pavlovsky N.N., 1956. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod pod gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami i ee osnovnye prilozheniya: sobr. soch.* [Theory of Groundwater Movement Under Hydraulic Structures and Its Main Applications: coll. ed.], vol. 2. Moscow - Leningrad, 771 p. (In Russian).

11 Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., 2013. *Gidravlicheskie i ekspluatatsionnye kriterii funktsionirovaniya krupnykh kanalov pereraspredeleniya stoka* [Hydraulic and operational criteria for the functioning of large channels of flow redistribution]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. North Caucasus Region. Technical Sciences], no. 5(174), pp. 62-66. (In Russian).

12 Karasev I.F., 2006. *Kompleksy podobiya i gidravlicheskie soprotivleniya samoformiruyushchikhsya rusel rek i kanalov* [Similarity complexes and hydraulic resistance of self-forming river and canal beds]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 12, pp. 27-31. (In Russian).

13 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).

14 Kurbanov S.O., Khanov N.V., 2003. *K gidravlicheskomu raschetu naivyygodneyshikh secheniy energeticheskikh kanalov poligonal'nogo profilya* [On hydraulic calculation of the most efficient section of power engineering canals with polygonal profile]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 7, pp. 40-43. (In Russian).

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

Баев Олег Андреевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: старший 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: Oleg-Baev1@yandex.ru

Baev Oleg Andreyevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

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

E-mail: Oleg-Baev1@yandex.ru

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