

Ю.М. КОСИЧЕНКО, О.А. БАЕВ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», г. Новочеркасск, Российская Федерация

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ШЕРОХОВАТОСТИ РУСЕЛ КАНАЛОВ С НЕОДНОРОДНЫМИ УЧАСТКАМИ

Приведены расчеты коэффициентов шероховатости неоднородных русел каналов по длине по полученным формулам авторов. Проведено сравнение результатов расчета с другими зависимостями на примере головного участка Большого Ставропольского и Бурлинского магистральных каналов. Даны расчетные формулы для определения коэффициентов шероховатости заросших растительностью русел каналов гидромелиоративных систем. Для головного участка Большого Ставропольского канала расчеты проведены по зависимостям Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина и сопоставлены с формулами Н.Н. Павловского, Хортон, Эйништейна и Лоттера при расходах в канале 185,0; 79,0; 25,0 м³/с. Результаты определения приведенного коэффициента шероховатости для Бурлинского магистрального канала по Лоттеру оказались занижены по всем бьефам канала. Также были проведены расчеты коэффициента шероховатости при сильном зарастании русла на примере Нижне-Донского магистрального канала по формуле авторов. Данные формулы показали удовлетворительное их совпадение с натурными данными с отклонением до 18,2%.

Коэффициент шероховатости, неоднородное русло, магистральный канал, облицовка.

Введение. При проектировании и особенно при эксплуатации каналов возникают задачи, связанные с их расчетом для неоднородных русел. Такие случаи обусловлены применением частично облицованных каналов, где на наиболее опасных участках устраиваются бетонные облицовки, а остальные участки выполняют в земляном русле. На каналах в земляном русле достаточно часто наблюдается частичное зарастание растительностью, преимущественно в береговой зоне. В связи с этим появляются дополнительные гидравлические сопротивления, которые приводят к повышенной шероховатости русел и снижению пропускной способности каналов.

Вопросами изучения влияния повышенной и неоднородной шероховатости русел, в том числе при зарастании, занимались В.С. Боровков [1], Э.Л. Беновицкий [2], Ю.М. Косиченко [3, 4], К.Г. Гурин [5], И.А. Долгушев [6], Н. Дзэскелеску [7], М.Г. Хубларян [8], В.Т. Чоу [9], W. Hwai [10], M. Melis [11], I. Nezu [12] и другие.

Материалы и методы. В качестве материалов исследований используем существующие расчетные зависимости [5, 9], которые применимы для неоднородной шероховатости по периметру русла канала. Из методов исследований применим расчетный, и на основе анализа видоизменим существующие зависимости применительно к рассматриваемому случаю, когда шероховатость русла изменяется по длине канала. В расчетах приведенной шероховатости русел каналов используются также таблицы значений коэффициентов шероховатости земляных и бетонных русел каналов [9, 13, 14].

Для расчета коэффициента приведенной неоднородной шероховатости по периметру русла наиболее известна формула Н.Н. Павловского:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\chi_1 n_1^2 + \chi_2 n_2^2 + \chi_3 n_3^2}{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3}}, \quad (1)$$

где χ_1, χ_2, χ_3 – смоченный периметр отдельных частей поперечного сечения канала; n_1, n_2, n_3 – коэффициенты шероховатости отдельных частей поперечного сечения канала.

Кроме того, в источниках [9, 13, 14] приведены другие формулы Хортон, Эйнштейна, Лоттера для определения средневзвешенного значения.

В работе [5] нами также была получена формула для расчета приведенного коэффициента шероховатости русла канала по длине в виде:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{n_1^2 l_1 (v_1/\bar{v})^2 + n_2^2 l_2 (v_2/\bar{v})^2 + \dots + n_m^2 l_m (v_m/\bar{v})^2}{(l_1 + l_2 + \dots + l_m)}}, \quad (2)$$

где $\bar{v} = \frac{v_1 l_1 + v_2 l_2 + \dots + v_m l_m}{l_1 + l_2 + \dots + l_m}$.

Однако в данной формуле (2) не учитывается смоченный периметр по участкам, который будет изменяться, что приведет к погрешности расчета.

С целью необходимости уточнения значения $n_{\text{пр}}$ в формуле (2) следует учитывать, что значения смоченного периметра должны быть переменными $\chi_1 \neq \chi_2 \neq \dots \neq \chi_m$.

При получении видоизмененных формул по длине русла канала примем ниже следующие допущения:

- считаем движение потока в пределах расчетного участка с однородной шероховатостью равномерным с постоянной глубиной и средней скоростью;

- протяженность расчетных участков с однородной шероховатостью принимаем длиной не менее 100 м;

- смоченный периметр и гидравлический радиус принимаем равными средним значениям $\bar{\chi}$ и \bar{R} в пределах всей длины канала.

Целью исследований является получение зависимостей для определения приведенного коэффициента шероховатости неоднородного русла по длине канала.

Неоднородная шероховатость русел каналов часто возникает из-за необходимости замены отдельных участков на твердые покрытия из железобетонных плит или устройство противофильтрационных экранов из геосинтетических материалов (геомембран или бентонитовых матов) с защитным покрытием (например, из каменной наброски [15] или габионов). При этом изменяется шероховатость поверхности вместо земляного русла на облицованное с коэффициентом шероховатости из железобетонных плит от 0,015 до 0,017, а для каменной наброски – от 0,025 до 0,0275.

Другими причинами неоднородной шероховатости отдельных участков каналов

является зарастание растительностью земляных русел или образование в них водорослей [5].

Рассмотрим далее уточнение расчетных формул для определения приведенного коэффициента шероховатости ($n_{\text{пр}}$) для зависимости (1) и всех зависимостей в работе [9], поскольку в них за исключением (2) не учитывается длина каждого участка канала l_1, l_2, \dots, l_m . В тоже время, как было показано выше, нуждаются в уточнении и формула (2) за счет учета смоченного периметра $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m$.

Теперь приведем эти зависимости в уточненном виде с указанием прежних авторов:

- формула Н.Н. Павловского:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\chi_1 l_1 n_1^2 + \chi_2 l_2 n_2^2 + \dots + \chi_m l_m n_m^2}{\bar{\chi} \cdot (l_1 + l_2 + \dots + l_m)}}; \quad (3)$$

- формула средневзвешенного:

$$n_{\text{пр}} = \frac{\chi_1 l_1 n_1 + \chi_2 l_2 n_2 + \dots + \chi_m l_m n_m}{\bar{\chi} \cdot (l_1 + l_2 + \dots + l_m)}; \quad (4)$$

- формула Хортон, Эйнштейна:

$$n_{\text{пр}} = \frac{(n_1^{1.5} \chi_1 l_1 + n_2^{1.5} \chi_2 l_2 + \dots + n_m^{1.5} \chi_m l_m)^{2/3}}{\bar{\chi} \cdot (l_1 + l_2 + \dots + l_m)}; \quad (5)$$

- формула Лоттера:

$$n_{\text{пр}} = \frac{\bar{\chi} \cdot \bar{R}^{5/3} (l_1 + l_2 + \dots + l_m)}{\frac{\chi_1 l_1 R_1^{5/3}}{n_1} + \frac{\chi_2 l_2 R_2^{5/3}}{n_2} + \dots + \frac{\chi_m l_m R_m^{5/3}}{n_m}}; \quad (6)$$

- формула Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина:

$$n_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{n_1^2 l_1 \chi_1 v_1^2 + n_2^2 l_2 \chi_2 v_2^2 + \dots + n_m^2 l_m \chi_m v_m^2}{\bar{\chi} \cdot (l_1 + l_2 + \dots + l_m) \cdot \bar{v}^2}}, \quad (7)$$

где $\bar{\chi}, \bar{R}, \bar{v}$ – средние или средневзвешенные значения смоченного периметра, гидравлического радиуса и средней скорости для всего русла канала.

Далее приведем примеры расчетов приведенных коэффициентов шероховатости с неоднородными участками по полученным формулам (3)–(7).

В качестве характерных объектов для примеров выберем Большой Ставропольский канал (БСК) на I-ой очереди – Головной участок от 1 до 34 км, где расход на всем протяжении одинаковый и составляет от 185,0 м³/с (максимальный) до 25 м³/с (минимальный), а также

Бурлинский магистральный канал в Алтайском крае, с нормальным расходом $36,5 \text{ м}^3/\text{с}$, который в начальный период эксплуатации сильно зарастал растительностью.

Результаты и обсуждение. Большой Ставропольский канал предназначен для комплексного использования: орошения, обводнения, водоснабжения и энергетики, поэтому режим работы канала круглогодичный, забор воды осуществляется из Усть-Джегутинского водохранилища на р. Кубань. Протяженность 1-й очереди канала (БСК-1) 156 км.

Головной участок БСК длиной 34 км проходит в сложных геологических и гидрогеологических условиях по сильно пересеченной местности. На участках канала, где выемка вскрывает гравийно-галечниковые отложения, устраивался экран из суглинка толщиной 1,0 м, который сверху покрывался бетонной облицовкой толщиной 25 см. В некоторых местах экран из суглинка покрывает облицовка из камня и гравийно-галечниковой смеси. На откосах канала для предохранения от подсечки укладывалась гравийно-галечниковая облицовка толщиной 1,0 м. На других участках весь периметр канала защищен гравийно-галечниковой облицовкой толщиной от 0,3 до 1,0 м [5].

При эксплуатации БСК-1 для предотвращения опасных карстово-суффозионных деформаций в основании канала укладывались грунтопленочный экран и бетонопленочная облицовка.

Бурлинский МК протяженностью 30 км с водозабором из Новосибирского водохранилища предназначен для обводнения бассейна р. Бурла. Строительство канала было начато с 1983 г. и проводилось до 1991 г. В этот период была выполнена часть земляных и бетонных работ (1-й и 2-й бьефы и насосные станции НС-1 и НС-2). С 1991 г. строительство было приостановлено и возобновлено в 2003 г. К 2010 г. весь комплекс работ (3-й и 4-й бьефы и НС-3, НС-4) был полностью выполнен и канал был принят в эксплуатацию.

Таким образом, возраст первого и второго бьефов Бурлинского МК к 2010 г. составил 27 лет, а третьего и четвертого бьефов – 8-14 лет. Так как в этот период канал еще не работал, то не проводились эксплуатационные работы по уходу за ним и не осуществлялся текущий ремонт. В результате состояние русла канала ухудшилось, вначале

наблюдалось зарастание травой и мелким кустарником, а затем крупным кустарником и деревьями. Вследствие этого значительно изменилась шероховатость русла по сравнению с проектным значением (0,020-0,0225). Коэффициенты шероховатости русла канала до расчистки по данным [14] достигли значений 0,10-0,15.

После расчистки русла в 2009 г. коэффициенты шероховатости 2-го бьефа составили вначале бьефа $n = 0,035 - 0,030$, а к концу бьефа изменились до $n = 0,05 - 0,10$. На основании проведенных обследований были составлены карты изменения шероховатости русла Бурлинского МК после его расчистки в соответствии с таблицей шероховатости В.Т. Чоу [9], которые и использовались для расчета приведенной шероховатости по длине.

Исходные данные для расчета приведенного коэффициента шероховатости Головного участка БСК-1 по 11 участкам с различным их покрытием приведены в таблице 1.

Канал имеет полигональное сечение с максимальным расходом $185,0 \text{ м}^3/\text{с}$, гидравлическим радиусом $R = 3,2 \text{ м}$, уклоном дна $i = 0,00015$, максимальной глубиной $h = 5,1 \text{ м}$. Общая длина Головного участка канала составляет $L = 34300 \text{ м}$.

Коэффициенты шероховатости отдельных участков Головного участка БСК приняты по [16], коэффициент Шези (C) и средняя скорость потока (v) на отдельных участках получены расчетным путем по известным гидравлическим зависимостям [13, 16, 17].

В таблице 2 приведены результаты расчета приведенного коэффициента шероховатости и головного участка БСК-1 по полученным уточненным формулам (3)–(7).

Анализ результатов расчета приведенных коэффициентов шероховатости при трех расходах канала (максимальном, среднем и минимальном) показывают, что наиболее близкие данные ($n_{\text{пр}}$) к натурным ($n_{\text{нат}}$) были получены по формуле Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина (7) при всех расходах с отклонением от – 6,3 до 7,5%. По остальным формулам отклонение от натуральных значений составляет от – 8,4% до 15,5%.

При этом по формуле Лоттера значения $n_{\text{пр}}$ получены заниженными от натуральных данных и других авторов. Так, отклонения от формулы Косиченко и Гурина (7) составляют от 15,3 до 19,0%.

Таблица 1

Исходные данные к расчету приведенного коэффициента шероховатости на Головном участке БСК-1

№ участ-ков	Покрытие на участке	n	l , м	C , м ^{0,5} /с	ν , м/с
1	Железобетонное повышенной шероховатости с отложением гравия на дне	0,0180	1100	67,46 64,74 55,50	1,48 1,25 0,74
2	Гравийно-галечниковое в нижнесредних условиях содержания	0,0275	1600	44,16 37,27 36,40	0,97 0,72 0,45
3	Гравийно-галечниковое в средних условиях содержания	0,0250	800	48,57 46,61 42,20	1,06 0,90 0,49
4	Бетонопленочное с полиэтиленовой пленкой	0,0180	2900	67,46 64,74 55,50	1,48 1,25 0,74
5	Железобетонное повышенной шероховатости с отложением гравия	0,0180	700	67,46 64,74 55,50	1,49 1,25 0,74
6	Гравийно-галечниковое в нижнесредних условиях содержания	0,0275	8900	44,16 37,27 36,40	0,97 0,72 0,45
7	Гравийно-галечниковое	0,0275	2000	44,16 37,27 36,40	0,97 0,72 0,45
8	Железобетонное повышенной шероховатости с отложением гравия	0,0180	700	67,46 64,74 55,50	1,48 1,25 0,74
9	Щебенчатое	0,0275	2300	44,16 37,27 36,40	0,97 0,72 0,45
10	Железобетонное грубое из плит	0,0170	300	71,43 67,35 57,30	1,56 1,30 0,72
11	Гравийно-галечниковое в нижнесредних условиях содержания	0,0275	13000	44,16 37,27 36,40	0,97 0,72 0,45

Примечание. Значения параметров C и ν даны для расходов соответственно $Q=185,0; 79,0; 25,0$ м³/с

Таблица 2

Результаты расчета приведенного коэффициента шероховатости головного участка Большого Ставропольского канала по длине 1-34 км

Расход канала, м ³ /с (7-16 км)	Натурное значение, $n_{\text{нат}}$	Значение $n_{\text{пр}}$ по уточненным формулам				
		Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина	Средневзвешенное	Н.Н. Павловского	Хортон, Эйнштейна	Лотгера
185,0	0,0226	$\frac{0,0242}{-7,1\%}$	$\frac{0,0258}{-14,2\%}$	$\frac{0,0261}{-15,5\%}$	$\frac{0,0259}{-14,6\%}$	$\frac{0,0205}{9,3\%}$
79,0	0,0231	$\frac{0,0248}{-7,4\%}$	$\frac{0,0258}{-11,2\%}$	$\frac{0,0261}{-12,5\%}$	$\frac{0,0259}{-11,6\%}$	$\frac{0,0205}{11,3\%}$
25,0	0,0238	$\frac{0,0253}{-6,3\%}$	$\frac{0,0258}{-8,4\%}$	$\frac{0,0261}{-9,6\%}$	$\frac{0,0259}{-8,8\%}$	$\frac{0,0205}{13,8\%}$

Примечание. В числителе приведены значения $n_{\text{пр}}$, а в знаменателе отклонения от натуральных значений $n_{\text{нат}}$.

Расчет приведенного коэффициента шероховатости для Бурлинского МК при его зарастании после проведенной его расчистки в 2009 году проводился по полученным нами

уточненным формулам (3)–(7). При этом вычисления ($n_{пр}$) выполнялись отдельно по каждому бьефу, где были выделены до 7 участков с однородным зарастанием и коэффициентами

шероховатости по В.Т. Чоу [9] от 0,035 до 0,10. Затем вычислялся общий приведенный коэффициент шероховатости по четырем бьефам с использованием зависимости:

$$n_{пр\text{общ}} = \sqrt{\frac{n_{пр1}^2 \cdot \chi_1 \cdot L_1 \cdot v_1^2 + n_{пр2}^2 \cdot \chi_2 \cdot L_2 \cdot v_2^2 + n_{пр3}^2 \cdot \chi_3 \cdot L_3 \cdot v_3^2 + n_{пр4(1)}^2 \cdot \chi_4 \cdot L_{4(1)} \cdot v_{4(1)}^2 + n_{пр4(2)}^2 \cdot \chi_4 \cdot L_{4(2)} \cdot v_{4(2)}^2}{\bar{v}^2 \cdot \bar{\chi} \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_{4(1)} + L_{4(2)})}}, \quad (8)$$

где $n_{пр1}$, $n_{пр2}$, $n_{пр3}$, $n_{пр4(1)}$, $n_{пр4(2)}$ – расчетные приведенные значения коэффициентов шероховатости по отдельным бьефам (или участкам); L_1 , L_2 , L_3 , $L_{4(1)}$, $L_{4(2)}$ – длина бьефов канала, м.

В таблице 3 представлены результаты расчета приведенных коэффициентов шероховатости для четырех бьефов и общий

приведенный коэффициент шероховатости по всему каналу, вычисленный по формуле (8).

Таблица 3

Исходные и расчетные данные к расчету приведенных коэффициентов шероховатости Бурлинского МК (по данным [14] при $Q_m = 36,5 \text{ м}^3/\text{с}$)

Бьеф канала	Номер участка	Длина участка, l , м	Коэффициент шероховатости участка, n	Средняя скорость в бьефе, v , м/с	Выполнение условия незаиляемости
1-й	1	100	0,025	0,627	Выполняется $v > v_{нез} = 0,366 \text{ м/с}$
	2	600	0,03		
	3	200	0,025		
2-й	1	600	0,035	0,404	Выполняется $v > v_{нез} = 0,381 \text{ м/с}$
	2	2000	0,030		
	3	2000	0,025		
	4	650	0,050		
	5	750	0,10		
	6	500	0,03		
	7	250	0,05		
3-й	1	1629	0,02	0,236	Не выполняется $v < v_{нез} = 0,406 \text{ м/с}$
	2	1044	0,03		
	3	1890	0,15		
4-й (1)	1	300	0,03	0,252	Не выполняется $v < v_{нез} = 0,404 \text{ м/с}$
	2	350	0,10		
	3	1200	0,03		
	4	1500	0,03		
	5	2200	0,06		
	6	1400	0,07		
	7	1300	0,10		
4-й (2)	1	5400	0,10	0,186	Не выполняется $v < v_{нез} = 0,406 \text{ м/с}$
	2	2000	0,07		
	3	1800	0,06		

Сравнение полученных данных расчета по Бурлинскому МК свидетельствуют о близких результатах по формулам Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина с формулами Н.Н. Павловского и Хортон, Эйнштейна. По формуле Лоттера получены сильно заниженные

результаты коэффициента $n_{пр}$. Причем они оказались заниженными как по бьефам, так и по общей формуле в 1,5-2,7 раза. Так как результаты по Лоттеру значительно отличаются от других формул, считаем ее неприемлемой для подобных расчетов (табл. 4).

Результаты расчета приведенного коэффициента шероховатости по длине Бурлинского МК

По формулам	Значения $n_{пр}$ по бьефам					Общий, $n_{пр\text{общ}}$
	1-й	2-й	3-й	4-й (1)	4-й (2)	
Ю. М. Косиченко, К.Г. Гурина	0,0284	0,0419	0,0983	0,0642	0,0874	0,0642
Средневзвешенные значения [18]	0,0283	0,0394	0,0761	0,057	0,0856	0,0645
Н. Н. Павловского	0,0284	0,0419	0,0983	0,0642	0,0874	0,0738
Хортонa, Эйнштейна	0,0279	0,0422	0,0882	0,0615	0,0864	0,0695
Лотгера	0,0281	0,0327	0,0354	0,0476	0,0817	0,0454

Большое влияние на пропускную способность каналов оказывает зарастание их растительностью [6, 9], которая приводит к увеличению коэффициентов шероховатости для каналов в земляном русле до 2,5-4,0 раз.

Ю.М. Косиченко [3] получил наиболее общие расчетные формулы для канала с береговой растительностью и при наличии водорослей с учетом случайного характера их распределения по закону Пуассона в виде:

$$n = n_0 \cdot \sqrt{\frac{\chi_o \cdot \left(\frac{v_o}{v}\right)^2 + \chi_p \cdot \left(\frac{v_p}{v}\right)^2 + \chi_{вод} \cdot \left(\frac{v_{вод}}{v}\right)^2}{2gH_o^2} \cdot \left[C_d d \frac{\omega_p}{\omega} \cdot \left(\frac{v_p}{v}\right)^2 \times \left(N + \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_p}{P_N}} \right) \right] + k \frac{\lambda'_p \cdot h_p \left(\frac{v_o}{v}\right)^2}{4 \omega \left(\frac{v}{v}\right)^2} + \frac{\lambda'_{вод} \cdot \omega_{вод} \left(\frac{v_o}{v}\right)^2}{4 \omega \left(\frac{v}{v}\right)^2} \cdot \ln \frac{(v_b \cdot \omega_{вод})}{P_{\Sigma} m!}} \quad (9)$$

где n_0 – коэффициент шероховатости незаросшей части русла; χ_o – часть смоченного периметра русла без растительности, м; χ – общий периметр сечения русла с учетом растительности и части периметра без растительности, м; $\chi_{вод}$ – периметр границы водорослей, м; v_o – средняя скорость потока части русла без растительности, м/с; v – средняя скорость течения потока с учетом незаросшей и заросшей части русла, м/с; $v_p, v_{вод}$ – средние скорости потока соответственно в пределах растительности и водорослей, м/с; R – гидравлический радиус, м; C_d – коэффициент лобового сопротивления растений; d – диаметр растений; ω, ω_p – площадь сечения русла соответственно без растительности, с растительностью и водорослями, м²; N – густота растительности, шт/м²; v_p, v_b – интенсивность распределения соответственно зон растений и водорослей, 1/м²; σ_N – среднеквадратическое отклонение растений; $\lambda'_p, \lambda'_{вод}$ – коэффициент гидравлического сопротивления по границе соответственно растений и водорослей; h_p – высота смоченной части растений на границе зарослей, м; m – количество интервалов зон водорослей; P_N, P_{Σ} – вероятность суммарного распределения соответственно зон растений и зон водорослей; k – число границ раздела растительности.

Из общей формулы (9) можно получить частные зависимости:

- при частичном зарастании русла водной растительностью (камышом) с двух берегов канала на откосах:

$$n = n_0 \cdot \sqrt{\frac{\chi_o \cdot \left(\frac{v_o}{v}\right)^2 + \chi_p \cdot \left(\frac{v_p}{v}\right)^2 + \frac{R^{4/3}}{2gn_o^2} \times \left[C_d d \frac{\omega_p}{\omega} \cdot \left(\frac{v_p}{v}\right)^2 \times \left(N + \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_p}{P_N}} \right) \right] + k \frac{\lambda'_p \cdot h_p \left(\frac{v_o}{v}\right)^2}{4 \omega \left(\frac{v}{v}\right)^2}} \quad (10)$$

- при наличии только водорослей без водной растительности:

$$n = \frac{n_0}{\omega/\omega_o} \sqrt{1 + \frac{R^{4/3}}{4} \cdot \frac{\lambda'_p}{4} \cdot \frac{\omega_b}{\omega} \ln \frac{(v_b \cdot \omega_b)^m}{P_{\Sigma} m!}} \quad (11)$$

Рассмотрим пример расчета коэффициента шероховатости при зарастании Нижне-Донского МК с одного берега растительностью, с другого – водорослями при исходных данных: $Q = 6,4$ м³/с; $n_0 = 0,0225$; $n_{нат} = 0,0374$; $h = 2,8$ м; $b = 7,0$; $R = 1,45$ м; $C_d = 0,5$; $N = 10$ шт/м² [3] (остальные данные здесь не представлены).

Результаты расчета коэффициента шероховатости при зарастании по формуле (9) для Нижне-Донского МК показали, что расчетное значение составило $n_{расч} = 0,0442$, а натурное значение $n_{нат} = 0,0374$ при отклонении расчетного значения от натурального в $\varepsilon = 18,2\%$, что свидетельствует об удовлетворительном их совпадении.

Выводы

1. Получены расчетные зависимости для определения приведенного коэффициента шероховатости при наличии

неоднородной шероховатости по длине канала и при зарастании русла растительностью и водорослями.

2. Результаты расчета приведенного коэффициента шероховатости были проверены на двух объектах с характерной неоднородной шероховатостью по длине: на Головном участке Большого Ставропольского канала длиной 34 км с 11-ю различными участками с изменением шероховатости от 0,018 (для железобетонного покрытия повышенной шероховатости с отложением гравия на дне) до 0,0275 (для гравийно-галечникового покрытия в нижесредних условиях содержания) и Бурлинском магистральном канале в земляном русле длиной 30 км с 4-мя бьефами, которые разделены на 23 участка с различной степенью зарастания растительностью с коэффициентом шероховатости от 0,025 до 0,10.

3. Для головного участка Большого Ставропольского канала расчеты проведены по формуле Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина (7) и сопоставлены с другими формулами Н.Н. Павловского, средневзвешенного, Хортонна, Эйнштейна и Лоттера при расходах в канале 185,0; 79,0; 25,0 м³/с. Сравнение результатов с натурными данными коэффициентов шероховатости показывает, что наиболее близкие значения ($n_{пр}$) к ($n_{нат}$) получены по формуле Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина для всех расчетов с отклонением в пределах 6,3-7,4%. Остальные формулы дают отклонение от 8,4 до 15,5%.

4. Приведенный коэффициент шероховатости Бурлинского МК был сопоставлен по различным формулам (3)–(7), в том числе Лоттера, для 4-х бьефов канала и с общим приведенным коэффициентом шероховатости, рассчитанным по зависимости (8). Наиболее близкие значения ($n_{пр,общ}$) были получены по формулам Ю.М. Косиченко, К.Г. Гурина, средневзвешенного и Хортонна, Эйнштейна. В тоже время по Н.Н. Павловскому результаты ($n_{пр,общ}$) завышены на 15%, а по Лоттеру, наоборот, занижены на 29,3%. При этом результаты определения приведенного коэффициента шероховатости по Лоттеру оказались занижены не только для общего ($n_{пр}$), но и по всем бьефам, что не позволяет ее рекомендовать для подобных расчетов.

5. Также были проведены расчеты коэффициента шероховатости при сильном зарастании русла на примере Нижне-Донского МК по формуле авторов, которые показали удовлетворительное их совпадение с натурными данными с отклонением до 18,2%.

Библиографический список

1. **Боровков В.С.** Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Л.: Гидрометеоздат. – 1989. – 286 с.

2. **Беновицкий Э.Л.** Вывод расчетных зависимостей для коэффициента шероховатости частично заросшего русла // Водные ресурсы. – 1988. – № 1. – С. 68-74.

3. **Косиченко Ю.М.** Расчет коэффициентов шероховатости заросших русел каналов // Известия вузов. Сев. – Кав. Регион. Технические науки. – 1997. – № 2. – С. 75-80.

4. **Косиченко Ю.М., Угроватова Е.Г.** Повышение эффективности эксплуатации крупных каналов и обоснование формы и гидравлических сопротивлений русел полигонального сечения // Известия вузов. Сев.-Кав. Регион. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 39-45.

5. **Косиченко Ю.М., Гурин К.Г.** Определение приведенного коэффициента шероховатости для неоднородного русла канала по длине // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1997. – № 3. – С. 85-88.

6. **Долгушев И.А.** Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов. – М.: Колос, 1975. – 136 с.

7. **Дэскэлеску Н.** Рациональное распределение воды в оросительной сети / пер. с рум. и ред. В.К. Штефана. – М.: Колос, 1982. – 158 с.

8. **Хубларян М.Г., Фролов А.П., Зырянов В.Н.** Моделирование водных потоков при наличии высшей водной растительности // Водные ресурсы. – 2004. – Том 31. – № 6. – С. 668-674.

9. **Чоу В.Т.** Гидравлика открытых каналов / [пер. с англ.]. – М.: Стройиздат. – 1969. – 464 с.

10. **Huai W.X.** 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. – Pp. 180-193.

11. **Melis M.** Resistance to flow on a sloping channel covered by dense vegetation following a dam break / M. Melis, D. Poggi G.O.D. Fasanello S. Cordero, G.G. Katul // Water Resources Research. – 2019. – № 31 (2). – Pp. 274-292.

12. **Nezu I.** Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows / I. Nezu, M. Sanjou // Journal of Hydro-Environment Research. – Vol. 2. – 2008. – Pp. 62-90.

13. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков [и др.]. – Киев: Вища школа, 1984. – 343 с.

14. **Кошелева Е.Д., Кошелев К.Б.** Компьютерное моделирование взаимодействия грунтовых и поверхностных вод в зоне Бурлинского магистрального канала – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2010. – 238 с.

15. **Баев О.А., Косиченко Ю.М.** Особенности гидравлических условий эксплуатации крупных каналов // Экология и водное хозяйство. – 2019. – № 3 (03). – С. 145-160.

16. СП 100.13330.2016 Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85. – Введ. 2017-06-17. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 209 с.

17. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев [и др.]. – М.: ЭКОЛИТ. – 2011. – 312 с.

Материал поступил в редакцию 25.06.2020 г.

Сведения об авторах

Косиченко Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, «РосНИИПМ»; 346421, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, e-mail: Kosichenko-11@mail.ru

Баев Олег Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, «РосНИИПМ»; 346421, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, e-mail: oleg-baev1@yandex.ru

YU.M. KOSICHENKO, O.A. BAEV

Federal state budget scientific institution «Russian research institute of problems of land reclamation», Novocherkassk, Russian Federation

CALCULATION OF ROUGHNESS COEFFICIENTS FOR CHANNELS WITH HETEROGENEOUS SECTIONS

There are given calculations of roughness coefficients of heterogeneous channel beds along the length according to the obtained formulas of the authors. The calculation results are compared with other dependences using the example of the head section of the Bolshoi Stavropolsky and Burlinsky main canals. Calculation formulas are given for determining roughness coefficients of vegetation overgrown channel beds of hydro reclamation systems. For the head section of the Bolshoj Stavropolsky canal the calculations were performed according to the dependencies of Yu.M. Kosichenko, K.G. Gurin and compared with the formulas of N.N. Pavlovsky, Horton, Einstein, and Lotter under consumptions in the channel of 185.0; 79.0; 25.0 m³/s. The results of determination of the reduced roughness coefficient for the Burlinsky main canal according to Lotter turned out to be underestimated for all channel ponds. Roughness coefficient calculations were also performed for strong channel overgrowing using the example of the Nizhne-Donsoj main canal according to the authors' formula which showed their satisfactory coincidence with field data with a deviation of up to 18.2%.

Roughness coefficient, heterogeneous canal, main canal, facing.

References

1. **Borovkov V.S.** Ruslovyje protsessy i dinamika rechnyh potokov na urbanizirovannyh territoriyah / V.S. Borovkov. – L.: Gidrometeoizdat. – 1989. – 286 p.

2. **Benovickij E.L.** Vyvod raschetnyh zavisimostej dlya koeffitsienta sherohovatosti chastichno zarosshogo rusla // Vodnye rekursy. – 1988. – № 1. – S. 68-74.

3. **Kosichenko Yu.M.** Raschet koeffitsientov sherohovatosti zarosshih rusel kanalov // Izvestiya vuzov. Sev. – Kav. Region. Tehnicheskie nauki. – 1997. – № 2. – S. 75-80.

4. **Kosichenko Yu.M.** Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii krupnyh kanalov i obosnovanie formy i gidravlicheskih soprotivlenij

rusel poligonalnogo secheniya / Yu.M. Kosichenko, E.G. Ugrovatova // Izvestiya vuzov. Sev. – Kav. Region. Tehnicheskie nauki. – 2018. – № 12. – S. 39-45.

5. **Kosichenko Yu.M.** Opredelenie privedennogo koeffitsienta sherohovatosti dlya neodnorodnogo rusla kanala po dline / Yu.M. Kosichenko, K.G. Gurin // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. – 1997. – № 3. – S. 85-88.

6. **Doligushev I.A.** Povyshenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti orositelnyh kanalov / I.A. Doligushev. – M.: Kolos, 1975. – 136 s.

7. **Deskelesku N.** Ratsionalnoe raspredelenie vody v orositelnoj seti / per. s rum. i red. V.K. Shtefana. – M.: Kolos, 1982. – 158 s.