

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 556.56

DOI: 10.34753/HS.2019.1.4.462

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА
ШЕРОХОВАТОСТИА.Ю. Виноградов^{1,2}, Т.А. Виноградова^{1,3},
В.А. Обязов¹, М.М. Кадацкая¹¹ООО Научно-производственное объединение
"Гидротехпроект", г. Валдай, Россия;²Санкт-Петербургский государственный ле-
сотехнический университет, г. Санкт-Пе-
тербург, Россия; ³Санкт-Петербургский гос-
ударственный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

ASSESSMENT OF ROUGHNESS
COEFFICIENT VALUEAlexey Yu. Vinogradov^{1,2},Tatiana A. Vinogradova^{1,3},Viktor A. Obyazov¹, Mariya M. Kadatskaya¹¹Scientific and Industrial Research Associ-
ation Gidrotehproekt, Valday, Rus-
sia; ²Saint Petersburg State Forest Tech-
nical University, St. Petersburg, Russia;³Saint Petersburg State University,
St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Аннотация. В статье рассматривается один из основных параметров при проведении водохозяйственных расчетов – коэффициент шероховатости. Оценка его величины до настоящего времени проводится по специальным таблицам или расчетным способом. Приведены различные методы расчета коэффициента шероховатости – от оценки обратным путем по формуле Шези по результатам измерений до эмпирических зависимостей, полученных различными специалистами на основе натурных исследований. Кроме того, авторами рассмотрены формулы расчета коэффициента шерохо-

Abstract. The article considers one of the main parameters while conducting water management calculations – the roughness coefficient. Up-to-date assessment of its value is carried out according to special tables or by calculation. Article presents various methods for calculating the roughness coefficient – from the reverse evaluation using the Chezy formula by the measurements to the empirical relations obtained by various specialists on the basis of field studies. In addition, the authors considered formulas for calculating the roughness coefficient based on physics. The results of calculations

ватости на основании физических соображений. Результаты расчетов, полученных по таким зависимостям, наилучшим образом соответствуют их значениям, полученным обратным путем из формулы Шези. Приведенные в статье методы расчета апробированы на данных гидрологических постов р. Полисть – Подтополье за 1954 г. и р. Гозовка – Гоза за период 2014-2017 гг.

При сравнении результатов измерений, расчетов по различным зависимостям и оценочных табличных данных сделаны следующие выводы. Потери напора в явном виде зависят от глубины потока и уклона свободной поверхности, последний параметр в неявном виде характеризует сопротивление русла. При одних и тех же расходах воды изменение величины коэффициента шероховатости может достигать десятков процентов. При различном же наполнении русла коэффициент шероховатости может измениться в несколько раз, что предопределяет соответствующие ошибки при табличной оценке коэффициента шероховатости даже для упрощенного случая – только для открытого русла. Поэтому все зависимости, учитывающие только крупность русловых отложений, принципиально не могут иметь практического применения.

Общий вывод: даже при одном и том же уровне воды для упрощенных условий открытого русла без растительности, коэффициент шероховатости может отличаться в разы, что сводит

obtained for such formulas best fit their values obtained in the inverse way from the Chezy formula. The calculation methods presented in the article were tested on the data of gauging station on the river Polist' – near the settlement Podtopol'e for the period of 1954 year and on the river Gozovka – near the settlement Goza for the period 2014-2017.

Behind comparing the results of measurements, calculations for various formulas and estimated tabular data, the authors made the following conclusions. Pressure losses in explicit depends on the depth of the stream and the slope of the free surface, the last one implicitly characterizes the frictional of the channel. At the same water flow rates, a change in the roughness coefficient can reach tens of percent. With different filling of the channel, the roughness coefficient can change by several times, which predetermines the corresponding errors in the tabular estimation of the roughness coefficient, even for a simplified case – only for an open channel. Therefore, all the dependencies, taking into account only the granulometric of riverbed deposits, basically can not have practical application.

General conclusion: even with the same water level for simplified conditions of an open channel without vegetation, the roughness coefficient can differ by several times,

к нулю все попытки в его теоретической оценке при отсутствии прямых измерений уклона, скорости и средней глубины.

Ключевые слова: коэффициент шероховатости; потери напора на трение; формула Шези; крупность русловых отложений; коэффициент гидравлического трения; динамическая скорость.

which nullifies all attempts to theoretically evaluate it in the absence of direct measurements of slope, speed, and average depth.

Keywords: roughness coefficient; frictional pressure losses; Chezy formula; granulometric of riverbed deposits; factor of hydraulic friction; dynamic velocity.

Введение

Коэффициент шероховатости является одним из основных параметров при проведении водохозяйственных расчетов, моделировании движения волн паводков и попусков, расчетов трансформации стока по русловой сети и уровенного режима рек и каналов при проектировании инженерных и гидротехнических сооружений.

Поскольку для определения коэффициента шероховатости используются не только разные подходы, но и множество формул, основанных даже на одном подходе, целью данной работы является оценка достоверности получаемых его величин различными методами. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявить основные параметры, определяющие величину потерь напора на трение;
- выполнить сравнительный анализ существующих зависимостей для определения коэффициента шероховатости и выявить те, которые наилучшим образом соответствуют его значениям, полученных обратным путем из формулы Шези;
- оценить ошибку табличной оценки коэффициента шероховатости;
- оценить правомерность практического применения для определения величины коэффициента шероховатости зависимостей, учитывающих только крупность русловых отложений;
- оценить возможность теоретической оценки коэффициента шероховатости при отсутствии прямых измерений уклона, скорости и средней глубины.

Условные обозначения

n – коэффициент шероховатости;

C – коэффициент Шези, $m^{1/2}/c$;

R – гидравлический радиус, м, в рассматриваемом случае плоского равномерного открытого потока гидравлический радиус $R \approx H$;

H – средняя глубина потока, м;

V – средняя скорость потока, м/с;

i – уклон водной поверхности, доли единицы;

d – эффективный диаметр русловых отложений, соответствующий 50%-му значению крупности частиц по гранулометрической кривой, m^1 ;

B – ширина русла, м;

τ – касательное напряжение, $\frac{K^2}{m \cdot c^2}$;

ρ – плотность жидкости, $1000 \text{ кг}/m^3$;

V_* – динамическая скорость (скорость трения), являющаяся мерой интенсивности турбулентного пульсационного движения и численно равная² $V_* = \sqrt{\tau / \rho}$;

g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м}/c^2$;

λ – коэффициент гидравлического трения, б/р;

$h_{\text{тр}}$ – потери напора на трение, м;

μ – динамическая вязкость, $кг}/m \cdot c$;

Δ – высота выступов шероховатости, м;

ν – кинематическая вязкость, m^2}/c ;

l – длина рассматриваемого участка, м;

A – экспериментальный коэффициент пропорциональности.

Материалы и методы

Оценка величины коэффициента шероховатости до настоящего времени проводится двумя способами: описательным, с использованием таблиц М.Ф. Срибного, В.Т. Чоу,

¹ Р 52.24.627-2007 Рекомендации. Усовершенствованные методы прогностических расчетов распространения по речной сети зон высокозагрязненных вод с учетом форм миграции наиболее опасных загрязняющих веществ. – Ростов н/Д., 2008. – 172 с.

² ГОСТ 23281-78 Аэродинамика летательных аппаратов. Термины, определения и буквенные обозначения. – М., 1979. – 33 с.

И.Ф. Карасева, Дж. Бредли, И.И. Агроскина, Л.А. Васильевой и др., и расчетным. Последний основан, как правило, на формуле Павловского-Маннинга:

$$n = \frac{1}{C} R^{1/6} \quad (1)$$

Коэффициент Шези определяется обратным путем с помощью формулы Шези по измеренным величинам скорости течения V , уклону водной поверхности i и гидравлическому радиусу R , полученному с помощью морфометрических измерений:

$$C = \frac{V}{\sqrt{Ri}} \quad (2)$$

Выбор табличных значений коэффициентов шероховатости зависит от точности и детализации описания рассматриваемого участка реки. К тому же табличное описание является качественным, что всегда подразумевает известную долю субъективизма при подборе того или иного значения коэффициента шероховатости. Точность подобранных значений даже по предложенной в [Барышников, Плоткина, Рублевская, 1991] уточненной таблице значений коэффициентов шероховатости для беспойменных русел естественных водотоков колеблется в пределах $\pm (10 \div 30)\%$.

В попытках найти более объективный подход к оценке коэффициента шероховатости многие исследователи [Мамедов, 2013] предлагают эмпирическую зависимость следующего вида:

$$n = \frac{i^a}{b} \quad (3)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты.

Считается, что зависимость (3) применима для русел, в которых формирование ложа связано непосредственно со скоростью [Мамедов, 2013]. Значения коэффициентов зависимости (3) разнятся в различных источниках:

у М.Ф. Срибного для горных рек и периодических водотоков в землисто-каменистых руслах (без растительности), при $i > 0,0005$ $a = 0,25; b = 6,5;$ (3а)

у Кханны для стабильных русел $a = 0,25; b = 8,05;$ (3б)

$$\text{у В.Ф. Толмаза при } i > 0,0075 \quad a = 0,3; b = 5,0; \quad (3\text{в})$$

$$\text{у П.А. Шатберашвили} \quad a = 0,2; b = 8,33. \quad (3\text{г})$$

В некоторых источниках основным параметром, определяющим шероховатость русла, принимают крупность русловых отложений:

$$n = \frac{d^a}{b} \quad (4)$$

$$\text{по Штриклеру [Барышников, 2003]} \quad a = \frac{1}{6}; b = \sqrt{g} / 0,15 \approx 20,88; \quad (4\text{а})$$

$$\text{по Чангу} \quad a = \frac{1}{6}; b = 19,231; \quad (4\text{б})$$

$$\text{по В.М. Маккаеву и А.В. Карашеву} \quad a = \frac{1}{6}; b = 10,753; \quad (4\text{в})$$

$$\text{по М.А. Мосткову} \quad a = \frac{1}{6}; b = 20,408; \quad (4\text{г})$$

$$\text{по Р 52.24.627-2001}^3 \quad a = \frac{1}{6}; b = 33,333; \quad (4\text{д})$$

по Г.В. Железнякову [Железняков, 1981]:

$$\text{для } 1 \leq H / d \leq 3 \quad a = \frac{1}{3}; b = 6,25 \div 12,5; \quad (4\text{е})$$

$$\text{для } 3 \leq H / d \leq 10 \quad a = \frac{1}{4}; b = 12,5 \div 17,857; \quad (4\text{ж})$$

$$\text{для } 10 \leq H / d \leq 20 \quad a = \frac{1}{5}; b = 17,857 \div 20,0; \quad (4\text{и})$$

$$\text{для } 20 \leq H / d < 1000 \quad a = \frac{1}{6}; b = 22,222 \quad (4\text{к})$$

М. Пирковским предложена следующая зависимость:

$$n = 0,025 + 0,1d. \quad (5)$$

³ Там же

Кроме того, для расчета коэффициента шероховатости в разное время предлагались следующие зависимости:

$$\text{В.М. Маккаевым [Мамедов, 2013]} \quad n = a\sqrt[6]{Hi}; \quad (6)$$

$$\text{А.Ш. Мамедовым [Мамедов, 2013]} \quad n = 0,07(i^{0,16} + i^{0,2}); \quad (7)$$

В.С. Алтуниным и Л.В. Ларионовой [Косиченко, 2011]

$$n = 0,000005(50 - B/H)^{2,5} + 0,018. \quad (8)$$

В [Железняков, 1981] предлагается использование следующей зависимости, которую автор выводит из формулы Шези:

$$n = \frac{H^{0,5+y}i^{0,5}}{V} = \frac{H^{2/3}i^{0,5}}{V} \quad (9)$$

Рассмотрим равномерное установившееся движение водного потока по прямолинейному участку русла. Для упрощения задачи примем отсутствие ледовых явлений и водной растительности на участке русла. Воздействие на реальный турбулентный поток оказывают донные отложения различной крупности, гряды и другие формы микрорельефа дна. Для турбулентного режима за придонную скорость принимается скорость потока на высоте выступов шероховатости [Виноградов и др., 2019а].

Касательное напряжение на границе дно-поток [Гришанин, 1969]:

$$\tau = \rho V_*^2 = \rho \cdot gHi \quad (10)$$

В турбулентном потоке касательное напряжение будет пропорционально второй степени скорости:

$$\tau = \rho\lambda \frac{V^2}{2} \quad (11)$$

Потери напора на трение: $h_{nn} = \lambda \frac{V^2}{2g}$, то есть $\lambda \frac{V^2}{2} = h_{nn}g$, откуда $\tau = \rho \cdot gh_{nn}$.

Учитывая ранее приведенную формулу (10) получаем простое выражение для оценки потерь напора на трение:

$$h_{nn} = Hi \text{ или } h_{nn} = \frac{\tau}{\rho g} \quad (12)$$

что позволяет сделать следующий важный вывод: величина потерь напора на трение в явном виде зависит от глубины потока и уклона свободной водной поверхности и прямо пропорциональна касательному напряжению на границе дно-поток.

Далее, поскольку известно, что

$$h_{nn} = \lambda \frac{V^2}{2g}$$

$$\lambda = \frac{2g}{C^2}$$

$$C = \frac{1}{n} H^{1/6},$$

получаем

$$h_{nn} = \frac{2gV^2}{C^2 2g} = \frac{V^2}{C^2} = \frac{V^2 n^2}{H^{1/3}} \quad (13)$$

Учитывая (12) получаем окончательно:

$$n = \sqrt{\frac{h_{nn} H^{1/3}}{V^2}} = \frac{1}{V} \sqrt{HiH^{1/3}} = \sqrt{H^{4/3}i} = \frac{H^{2/3}i^{1/2}}{V} \quad (14)$$

Полученная зависимость соответствует формулам Г.В. Железнякова (9) и Шези.

Второй вариант расчета коэффициента шероховатости можно оценить с учетом крупности донных отложений d , м и динамической вязкости μ , кг/м·с.

Высота выступов шероховатостей [Виноградов и др., 20196]:

$$\mu \frac{V}{\Delta^2} \approx \frac{\rho \cdot V^2}{l}, \quad (15)$$

на участке единичной длины $l = 1$: $\Delta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho V}}$. Например, средний диаметр частиц донных отложений в створе гидрометрического поста р. Вилия-Малые Свирянки на дату отбора проб октябрь 2014 г. – 0,0012 м, расчетное значение – 0,0015 м.

В литературе [Гришанин, 1969; Снищенко, 2010; Триандафилов, Ефимова, 2012] высоту внешней границы буферного слоя (в нашем примере соответствует высоте выступов шероховатости) считают по следующей зависимости:

$$\Delta = \frac{Av}{V\sqrt{\lambda}}, \quad (16)$$

С учетом

$$V = \frac{1}{n} H^{1/6} \sqrt{Hi} \quad (17)$$

$$n = \frac{H^{1/6} \sqrt{Hi}}{Av / \Delta \sqrt{\lambda}} \quad (18)$$

Некоторую неопределенность в зависимость (18) привносит коэффициент A , величина которого по различным данным может изменяться от 10 до 50. Значения A для р. Полпе ($\Delta = 0,0026$ м) – 49; р. Вилии ($\Delta = 0,0015$ м) – 47; р. Страчи ($\Delta = 0,0031$ м) – 26; р. Гозовки ($\Delta = 0,0025$ м) – 41.

Результаты и обсуждение

Точность определения коэффициентов шероховатости равнинных ручьев и рек, рассчитанных обратным путем, можно оценить по результатам анализа таблицы 1. В ней приведены данные различных по размерам рек, меженные расходы воды которых меняются от 0,060-0,070 (руч. Полпе) до 900-1000 м³/с (р. Ока). Состояние рек на участке гидроствора в момент измерений – свободное русло, ледовые явления и русловая водная растительность отсутствуют.

Анализ таблицы 1 показывает, что расчетный коэффициент шероховатости не остается постоянным даже при близких по значению расходах воды. В некоторых случаях при незначительных колебаниях последнего на единицы процентов значения коэффициента шероховатости могут измениться на 20-30% и более.

Таблица 1. Расчетные значения руслового коэффициента шероховатости n для ручьев и рек различных размеров

Table 1. Calculated values of the riverbed roughness coefficient n for streams and rivers of various sizes

Река	Дата	$C, м^{1/2}/с$	$R, м$	$Q, м^3/с$	n расчетное	i	n табличное ⁴ по Р 52.24.627-2007
Полпе	07.12.2013	17,4	0,12	0,072	0,040	0,0013	0,030
	17.03.2014	14,6	0,09	0,062	0,046	0,0043	
Гозовка	22.03.2015	13,3	0,20	0,246	0,058	0,00091	0,030
	25.03.2015	15,2	0,20	0,280	0,050	0,00099	
	28.03.2015	18,8	0,19	0,253	0,040	0,00061	
	24.05.2015	16,3	0,19	0,274	0,047	0,00097	
Страча	25.02.2016	18,7	1,74	7,47	0,059	0,000056	0,040
	27.02.2016	23,7	1,73	7,01	0,046	0,000031	
	27.11.2017	15,7	1,63	7,45	0,069	0,000093	
Вилия	21.03.2015	21,2	1,67	63,2	0,051	0,0005	0,035
	26.03.2015	27,9	1,61	60,7	0,039	0,0003	
	12.12.2015	40,5	1,47	46,2	0,026	0,00011	
	14.12.2015	33,2	1,47	46,4	0,032	0,00017	
Ока	30.10.2013	41,4	4,1	942	0,031	0,000055	0,040
	01.05.2014	34,5	4,5	1048	0,037	0,000074	
Мзымта	27.05.1974	23,3	1,14	124	0,044	0,0079	0,067
	06.07.1972	24,5	1,11	123	0,042	0,0074	
	25.10.1972	23,0	1,18	128	0,045	0,0078	
	30.02.1970	24,7	1,19	140	0,042	0,0074	
	14.05.1969	23,1	1,10	116	0,044	0,0076	

При сравнении расчетных значений коэффициента шероховатости с его табличными значениями, составленными на основании полевых описаний, выявляется их существенное

⁴ Р 52.24.627-2007 Рекомендации. Усовершенствованные методы прогностических расчетов распространения по речной сети зон высокозагрязненных вод с учетом форм миграции наиболее опасных загрязняющих веществ. – Ростов н/Д., 2008. – 172 с

отличие. Отклонения рассчитанных обратным путем через измеренную скорость потока значений от табличных достигают 50-70 и даже 90%.

Таким образом, применение табличных значений коэффициентов шероховатости могут приводить к существенным погрешностям в оценке речного стока и соответствующих уровней при решении водохозяйственных задач, проектировании инженерных дорожных сооружений и гидротехнических объектов.

Работоспособность рассмотренных зависимостей апробирована на материалах измерений гидрологических постов р. Полисть – Подтополье за 1954 г. и р. Гозовка – Гоза за 2014-2017 гг. и представлена в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2. Расчет коэффициента шероховатости по предложенным зависимостям для $d = 0,001$ м, для поста р. Полисть – Подтополье, 1954 год

Table 2. Calculated values of the roughness coefficient according to the proposed formulas for particles with $d = 0.001$ m, for gauging station on the river Polist' – near the settlement Podtopol'e for the period of 1954 year

дата	08.04	09.04	10.04	12.04	13.04	14.04	15.04	17.04	22.04	29.04	05.05
i	0,00013	0,00012	0,0001	0,00012	0,00012	0,0001	0,00013	0,0001	0,0001	0,000082	0,000043
B , м	41,3	40,4	40	39,2	38,9	38,2	37,8	37,9	38,7	38	39
H , м	2,05	1,93	1,79	1,48	1,39	1,36	1,34	1,3	1,32	1,21	1,31
R , м	1,86	1,76	1,64	1,38	1,30	1,27	1,25	1,22	1,24	1,14	1,23
V , м/с	0,55	0,53	0,51	0,42	0,44	0,41	0,39	0,38	0,37	0,31	0,32
C	35,1	36,7	39,8	32,7	35,3	36,4	30,2	34,8	32,8	32,2	43,4
$n(1)$	0,033	0,031	0,028	0,033	0,030	0,029	0,035	0,030	0,032	0,032	0,024
$n(10)$	0,033	0,032	0,029	0,034	0,031	0,030	0,036	0,031	0,033	0,033	0,025
$n(36)$	0,013	0,013	0,012	0,013	0,013	0,012	0,013	0,012	0,012	0,012	0,010
$n(3г)$	0,020	0,020	0,019	0,020	0,020	0,019	0,020	0,019	0,019	0,018	0,016
$n(7)$	0,028	0,028	0,027	0,028	0,028	0,027	0,028	0,027	0,027	0,026	0,023
$n(8)$	0,042	0,041	0,038	0,031	0,029	0,029	0,029	0,028	0,028	0,025	0,027

Аналогичные расчетные значения шероховатостей по зависимостям от крупности русловых отложений (при условии размера частиц в 1 мм) получены для створа р. Полисть – Подтополье.

По Штриклеру (4а)

$$n = 0,15d^{1/6} / \sqrt{g} = 0,015.$$

По Чангу (4б) $n = d^{1/6} / 19,231 = 0,016.$

По В.М. Маккавееву и А.В. Караушеву (4в) $n = d^{1/6} / 10,753 = 0,029.$

По М.А. Мосткову (4г) $n = d^{1/6} / 20,408 = 0,015.$

По Р 52.24.627-2001⁵ (4д) $n = d^{1/6} / 33,333 = 0,01.$

По М. Пирковскому (5) $n = 0,025 + 0,1d = 0,025.$

Зависимости (4е)-(4к) практически не применимы, поскольку отношение h/d для больших, средних и большинства малых рек всегда >1000 .

Таблица 3. Расчет коэффициентов шероховатости для $d = 0,0026$ м для поста Гозовка – Гоза
Table 3. Calculation of roughness coefficients for particles with $d = 0.0026$ m for the gauging station on the river Gozovka – near the settlement Goza

t воды, °С	Дата изменения	Уровень воды над нулем графика, см	Расход воды, м ³ /с	Средняя скорость течения, м/с	Средняя глубина, м	n (15)	n (18)	n (14)
15,5	07.06.2017	45	0,151	0,17	0,14	0,047	0,051	0,048
15,8	10.06.2017	47	0,182	0,18	0,16	0,036	0,038	0,036
6,5	28.03.2015	49	0,253	0,20	0,19	0,040	0,039	0,041
14,1	24.05.2015	49	0,274	0,22	0,20	0,047	0,051	0,048
12,6	02.10.2016	50	0,252	0,18	0,20	0,051	0,050	0,052
2,4	22.03.2015	51	0,246	0,18	0,21	0,058	0,050	0,059
4,1	25.03.2015	51	0,279	0,21	0,20	0,050	0,048	0,052
3,9	13.12.2015	51	0,277	0,21	0,20	0,035	0,034	0,036
12,1	30.09.2016	52	0,306	0,19	0,22	0,056	0,055	0,057
3,7	05.11.2014	55	0,237	0,15	0,24	0,074	0,058	0,076
4,0	15.12.2015	55	0,336	0,22	0,22	0,034	0,033	0,035
2,9	27.11.2017	56	0,385	0,24	0,24	0,045	0,044	0,047
8,4	10.04.2017	57	0,436	0,24	0,26	0,054	0,055	0,055
7,7	13.04.2017	57	0,427	0,24	0,25	0,050	0,051	0,052
2,2	30.11.2017	58	0,453	0,26	0,26	0,039	0,038	0,040

⁵ Там же

Выводы

1. Величина потерь напора на трение в явном виде зависит только от глубины потока и уклона свободной поверхности. В неявном виде влияние сопротивления русла учитывается в изменении уклона свободной поверхности.

2. Коэффициент шероховатости для прямолинейного участка русла пропорционален глубине в степени $2/3$ и уклону в степени $1/2$ и обратно пропорционален средней скорости течения.

3. Результаты расчетов, полученных по зависимостям (10) и (12), выведенных на основании физических соображений, наилучшим образом соответствуют значениям коэффициентов шероховатости, полученных обратным путем из формулы Шези.

4. Ошибка табличной оценки коэффициента шероховатости только для русла может составлять 100 и более процентов.

5. Все зависимости, учитывающие только крупность русловых отложений, принципиально не могут иметь практического применения, так как при одних и тех же расходах воды изменение величины коэффициента шероховатости может достигать десятков процентов. При различном же наполнении русла коэффициент шероховатости может измениться в несколько раз.

6. При одном и том же уровне воды даже для условий открытого русла без растительности, коэффициент шероховатости может отличаться в разы, что сводит к нулю все попытки в его теоретической оценки при отсутствии прямых измерений уклона, скорости и средней глубины.

Литература

References

- Барышников Н.Б.* Гидравлические сопротивления речных русел: учебное пособие. СПб.: изд. РГГМУ, 2003. 147 с.
- Baryshnikov N.B.* *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel: Uchebnoe posobie [Hydraulic resistance of river channels]*. Saint-Petersburg, Publ. of the Russian State Hydrometeorological University, 2003. 147 p. (In Russian)
- Барышников Н.Б., Плоткина Н.П., Рублевская Р.М.* Коэффициенты шероховатости речных русел // Динамика русловых
- Baryshnikov N.B., Plotkina N.P., Rublevskaya R.M.* Coefficients of roughness of river beds] In Baryshnikov N.B. et al. (eds.) *Dinamika ruslovykh potokov i okhrana prirodnnykh vod. Sbornik*

- потоков и охрана природных вод. Сборник научных трудов (межвузовский). Вып. 107 / Под ред. Н.Б. Барышникова и др. Л.: изд. ЛГМИ, 1990. С. 4-11.
- Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бирман А.Р., Беленький Ю.И., Кадацкая М.М., Обязов В.А., Виноградова Т.А. Взаимодействие руслового потока с дном в пограничном слое // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019а. №. 12. С. 38-43. DOI: [10.31044/1994-6260-2019-0-12-38-43](https://doi.org/10.31044/1994-6260-2019-0-12-38-43)
- Виноградов А.Ю., Минаев А.Н., Кадацкая М.М., Кучмин А.В., Хвалев С.В. Расчет значений параметров И.И. Никурадзе и Т. Кармана в зависимости от температуры воды и крупности донных отложений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019б. Вып. 229. С. 196-204. DOI: [10.21266/2079-4304.2019.229.196-204](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.229.196-204)
- Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 428 с.
- nauchnykh trudov (mezhvuzovskii) [Dynamics of channel flows and protection of natural waters. Collection of scientific papers (interuniversity)].* Iss. 107. Leningrad, Publ. of the Leningrad Hydrometeorological Institute, 1990, pp. 4-11. (In Russian)
- Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov [The dynamics of channel flows]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1969. 428 p. (In Russian).
- Kosichenko Yu.M. Vliyanie ekspluatatsionnykh faktorov na propusknuyu sposobnost' zemlyanykh rusel kanalov [Influence of operational factors on ground channels capacity]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems]*, 2011, no. 3(03), pp. 55-68. (In Russian; abstract in English)
- Mamedov A.Sh. Ob opredelenii koeffitsienta sherokhovatosti rek [On determination of the river roughness coefficient]. *Trudy Sed'mogo Vserossiiskogo gidrologicheskogo s"ezda (Sankt-Peterburg, 19-20 noyabrya 2013 g.) [Proceedings of the Seventh All-Russian Hydrological Congress (St. Petersburg, November 19-20, 2013)]*. Available at: <https://clck.ru/LfhCf> (In Russian).
- Snishchenko B.F. K.V. Grishanin i uchenie o dinamike ruslovykh potokov [K.V. Grishanin and his doctrine on dynamics of streams flow]. *Zhurnal universiteta vodnykh komunikatsii [The journal of university of water communications]*, 2010, iss. 2 (6), pp. 10-18. (In Russian; abstract in English).
- Triandafilov A.F, Efimova S.G. *Gidravlika i gidravlicheskie mashiny: uchebnoe posobie [Hydraulics*

- Железняков Г.В.* Пропускная способность русел и каналов рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 308 с.
- Косиченко Ю.М.* Влияние эксплуатационных факторов на пропускную способность земляных русел каналов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 3(03). С. 55-68.
- Мамедов А.Ш.* Об определении коэффициента шероховатости рек [Электронный ресурс] // Труды VII Всероссийского гидрологического съезда (г. Санкт-Петербург, 19-20 ноября 2013 г.). URL: <https://clck.ru/LfhCf> (дата обращения: 26.05.2019).
- Снищенко Б.Ф.* К.В. Гришанин и учение о динамике русловых потоков // Журнал университета водных коммуникаций. 2010. Вып. 2 (6). С. 10-18.
- Триандафилов А.Ф., Ефимова С.Г.* Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие. Сыктывкар: изд. СЛИ, 2012. 212 с.
- and hydraulic machines: a training manual*]. Syktyvkar, Publ. of the Syktyvkar Forest Institute, 2012. 212 p.
- Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Birman A.R., Belen'kii Yu.I., Kadatskaya M.M., Obyazov V.A., Vinogradova T.A. Vzaimodeistvie ruslovogo potoka i dna v pograničnom sloe [Interaction of streamflow and bottom in boundary layer] // *Vse materialy. Entsiklopedičeskii spravocnik [Vse Materialy. Entsiklopedičeskii Spravochnik]*. Moscow, Publ. House "Nauka & Technology", 2019a, no. 12, pp. 38-43. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.31044/1994-6260-2019-0-12-38-43](https://doi.org/10.31044/1994-6260-2019-0-12-38-43)
- Vinogradov A.Yu., Minaev A.N., Kadatskaya M.M., Kuchmin A.V., Hvalev S.V. Raschet znachenii parametrov I.I. Nikuradze i T. Karmana v zavisimosti ot temperatury vody i krupnosti donnykh otlozhenii [Calculation of constant J. Nikuradze and T. von Karman depending on water temperature and the size of bottom sediments] *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehničeskoj Akademii [Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehničeskoj Akademii]*, 2019b, is. 228, pp. 196-204. (In Russian; summary in English). DOI: [10.21266/2079-4304.2019.229.196-204](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.229.196-204)
- Zheleznyakov G.V. Propusknaya sposobnost' rusel i kanalov rek [Discharge capacity of channels and river beds]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 308 p. (In Russian; abstract in English)