

УДК 556.537

КОЭФФИЦИЕНТ ШЕРОХОВАТОСТИ РУСЛА РЕКИ ПИССЫ

В.А. Наумов

ROUGHNESS COEFFICIENT OF THE PISSA RIVER BED

V.A. Naumov

Аннотация. По данным наблюдений реки Писсы, опубликованным в Гидрологических ежегодниках, рассчитаны значения коэффициента шероховатости в формуле Шези. Предложена эмпирическая формула зависимости этого коэффициента от средней скорости водотока. Эмпирические константы в указанной формуле найдены методом наименьших квадратов. При увеличении скоростей коэффициент шероховатости уменьшается, стремясь к постоянному значению. С уменьшением средней скорости коэффициент значительно возрастает. Для выявления региональных зависимостей необходимы дальнейшие исследования.

Ключевые слова: река Писса; формула Шези; коэффициент шероховатости; средняя скорость; эмпирическая формула.

Abstract. Values of the roughness coefficients in the Shesi's formula are calculated according to the observations of the Pissa river river published in Hydrological yearbooks. The coefficient empirical formula of dependence on average water velocity are presented. The empirical constants in this equation were found using the least squares method. With increasing speed the roughness coefficient is reduced, tending to a constant value. With the decrease of the average speed ratio increases significantly. To identify regional dependencies requires further research.

Keywords: Pissa river; Shesi's formula; roughness coefficient; average speed; the empirical formula.

Введение

При исследовании распространения примесей в водоемах используются различные методы расчета гидрологических характеристик [1, 2]. В методах расчета, связанных с реками, ручьями, каналами, как правило, требуется найти среднюю скорость течения V [3, 4]. При равномерном течении водотока средняя скорость определяется по формуле Шези:

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot I}, \quad (1)$$

где I – уклон водной поверхности; R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези.

В [5, 6] проанализированы три основных направления методик расчетов гидравлического сопротивления открытых русел. Наиболее часто применяется рекомендуемая нормативными документами (см. [3, 4]) методика расчетов, основанная на зависимости коэффициент Шези от R и n , где n – коэффициент шероховатости русла реки. Действующими нормативными документами предписано вычислять коэффициент Шези при средней глубине водотока до 5 м по формуле Н.Н. Павловского (если средняя ширина водотока B много больше глубины H , можно принять $R = H$):

$$C = R^y / n; \quad y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1), \quad (2)$$

Коэффициенты шероховатости n , в формуле (2) приходится выбирать по описательным характеристикам расчетного участка, приведенным в соответствующих таблицах. Наиболее часто в России используются таблицы М.Ф. Срибного [3] и И.Ф. Карасева [7], а в США В.Т. Чоу [8]. К сожалению, таблицы для определения коэффициентов

шероховатости имеют много недостатков, в частности, широкий диапазон значений при одной и той же описательной характеристике [5].

В РГГМУ [5] по данным наблюдений на 502 постах выполнена оценка точности расчетов на основе формул Шези и Маннинга, таблиц Срибного, Карасева, Чоу и Бредли. Среднеквадратические значения отклонений табличных величин от расчетных (по натурным данным) находятся в диапазоне от 30,8 до 36,2 %. Максимальные значения достигают 321 %. Такие данные указывают на необходимость совершенствования методики.

Целью исследований [9] являлся анализ точности определения коэффициента шероховатости. Были проведены опыты по определению влияния глубины потока и расхода воды на коэффициент шероховатости при изменении уклона дна лотка. В [10] на примере весеннего половодья реки Волги 2011 года показана неприменимость гидродинамической модели с постоянным значением коэффициента шероховатости n . Согласование результатов численного моделирования с данными наблюдений на гидропостах позволило получить оценки $n_{min} = 0.02$ и на максимуме уровня воды в русле Волги $n_{max} = 0,047$.

В Своде правил [11], наряду с предлагаемыми методами определения расчетных гидрологических характеристик, рекомендуется использовать региональные формулы при надлежащем их обосновании. При прочих равных условиях всегда следует стремиться использовать наиболее простые региональные зависимости, включающие меньшее число параметров, определяемых по выборочным данным наблюдений. В данной статье предпринята попытка получить именно такие региональные формулы.

Исходные данные

В Гидрологических ежегодниках (ГЕ) были опубликованы (см. [12-14] и др.) данные измерения глубины H , ширины B , уклона водной поверхности I , расхода воды Q , площади живого сечения ω , средней скорости V рек региона на отдельных гидропостах. При проведении измерений фиксировалось состояние русла: свободное, ледовые явления, трава. В таблицах 1 и 2 приведены данные 1960 года на реке Писсе (гидропост у деревни Зеленый Бор) [13].

Таблица 1 – Измеренные и рассчитанные характеристики реки Писсы (Зеленый Бор, 1960) (состояние – русло заросло травой)

№	Q	ω	V	H	B	I	C	n
	м ³ /с	м ²	м/с	м	м	‰	м/с ^{0,5}	-
1	5,29	19,1	0,28	1,04	18,3	0,89	9,20	0,111
2	3,66	17,9	0,20	0,99	18,0	0,89	6,74	0,147
3	3,23	17,8	0,18	0,98	18,2	0,89	6,09	0,162
4	4,02	18,7	0,21	1,02	18,3	0,87	7,05	0,144
5	7,86	24,7	0,32	1,27	19,5	0,82	9,92	0,116
6	6,21	22,2	0,28	1,17	18,9	0,84	8,93	0,123
7	5,27	21,9	0,24	1,19	18,4	0,82	7,68	0,146
8	3,75	20,5	0,18	1,10	18,6	0,84	5,92	0,182
9	7,50	26,4	0,28	1,35	19,6	0,84	8,31	0,147
10	2,06	18,7	0,11	1,01	18,5	0,84	3,78	0,267
11	9,61	28,9	0,33	1,47	19,6	0,84	9,39	0,136
12	8,17	25,1	0,33	1,32	19,0	0,82	10,0	0,117
13	14,8	33,1	0,45	1,65	20,1	0,88	11,8	0,112
14	14,8	30,9	0,48	1,55	19,9	0,87	13,1	0,096

До 1955 года в ГЕ отсутствовала информация по уклонам водной поверхности, необходимая для расчета коэффициента шероховатости русла, но и после появления указанной колонки во многих случаях в ней были проставлены прочерки (отсутствие измерений). В 70-е годы прошлого века публиковать в ГЕ указанную информацию перестали. После 1986 года выпуск ГЕ прекратился.

Таблица 2 – Измеренные и рассчитанные характеристики реки Писсы (Зеленый Бор, 1960)
(состояние русла – свободное)

№	Q	ω	V	H	B	I	C	n
	м ³ /с	м ²	м/с	м	м	‰	м/с ^{0,5}	-
1	6,95	21,3	0,33	1,14	18,7	0,86	10,4	0,103
2	12,5	26,8	0,47	1,40	19,2	0,87	13,3	0,089
3	18,2	33,3	0,55	1,69	19,7	0,90	14,0	0,093
4	21,1	34,4	0,61	1,73	19,9	0,95	15,2	0,085
5	19,2	33,0	0,58	1,66	19,9	0,90	15,0	0,085
6	24,6	37,9	0,65	1,90	20,0	0,97	15,1	0,090
7	12,7	26,7	0,48	1,38	19,3	0,89	13,6	0,086
8	35,8	47,7	0,75	2,21	21,6	1,20	16,8	0,086
9	30,5	38,8	0,79	1,92	20,2	1,10	17,1	0,078
10	21,6	34,2	0,63	1,73	19,8	0,95	15,6	0,083
11	16,6	29,7	0,56	1,53	19,4	0,91	15,0	0,081
12	11,2	25,0	0,45	1,32	18,9	0,92	12,9	0,089
13	8,80	24,1	0,37	1,26	19,1	0,92	10,7	0,106
14	7,72	21,8	0,35	1,18	18,4	0,91	10,8	0,101
15	6,59	21,0	0,31	1,14	18,4	0,91	9,75	0,111
16	14,2	29,1	0,49	1,48	19,7	0,91	13,3	0,092
17	7,86	23,1	0,34	1,22	18,9	0,78	11,1	0,101
18	5,52	20,7	0,27	1,11	18,6	0,84	8,76	0,122
19	5,39	19,9	0,27	1,08	18,5	0,84	8,96	0,117
20	4,84	19,8	0,24	1,08	18,4	0,84	8,09	0,130
21	7,29	22,2	0,33	1,17	19,0	0,86	10,3	0,106
22	10,0	25,3	0,40	1,32	19,2	0,86	11,7	0,099
23	10,8	25,8	0,42	1,32	19,6	0,91	12,0	0,096

Метод расчета

По данным табл. 1 и 2 рассчитывался коэффициент Шези:

$$C_i = V_i / \sqrt{R_i \cdot I_i}, \quad (3)$$

Так как в табл. 1 и 2 ширина реки много больше средней глубины ($B \gg H$), можно принять $R \approx H$. Значения n_i находим, решая численным методом в среде Mathcad уравнение, полученное логарифмированием (2):

$$\left(2,5\sqrt{n_i} - 0,13 - 0,75\sqrt{H_i}(\sqrt{n_i} - 0,1)\right) \cdot \ln H_i - \ln n_i = \ln C_i. \quad (4)$$

Результаты расчета C_i и n_i занесены в табл. 1, нанесены на рис. 1. По рис. 1 (а так же рис. 2) была выдвинута гипотеза, что зависимость коэффициента шероховатости русла от средней скорости может быть описана следующей формулой:

$$n = a + b \cdot \exp(-\beta \cdot V), \quad (5)$$

где a , b , β – эмпирические коэффициенты подлежащие определению.

К сожалению, в ГЕ [12-14] не указывалась степень зарастания русла травой. Возможно, в [13] она была невелика, и поэтому вся выборка табл. 1 и 2, вне зависимости от состояния русла, оказалась принадлежащей одной генеральной совокупности.

Методом наименьших квадратов были получена система уравнений для расчета эмпирических констант:

$$\sum_i [(a + b \cdot \exp(-\beta \cdot V_i) - n_i) \cdot \exp(-\beta \cdot V_i) \cdot V_i] = 0; \quad (6)$$

$$\sum_i [(a + b \cdot \exp(-\beta \cdot V_i) - n_i) \cdot \exp(-\beta \cdot V_i)] = 0; \quad (7)$$

$$\sum_i (a + b \cdot \exp(-\beta \cdot V_i) - n_i) = 0. \quad (8)$$

При решении системы уравнений (6)-(8) для данных наблюдений 1960 года реки Писса (Зеленый Бор) [13] были получены значения эмпирических констант $a = 0,071$; $b = 0,406$; $\beta = 7,396$. Причем они соответствуют данным наблюдений не только 1960 года (рис. 1), но и 1961 года [14] (рис. 2).

Результаты расчетов

На рис. 1 видно, что результаты расчета по формуле (5) с полученными значениями эмпирических констант удовлетворительно согласуются с данными наблюдений, как для свободного русла, так и при наличии травы. При больших скоростях (в частности, во время половодья) коэффициент шероховатости русла реки Писсы у Зеленого Бора уменьшается и стремится к величине 0,071. Тогда как в межень он значительно возрастает.

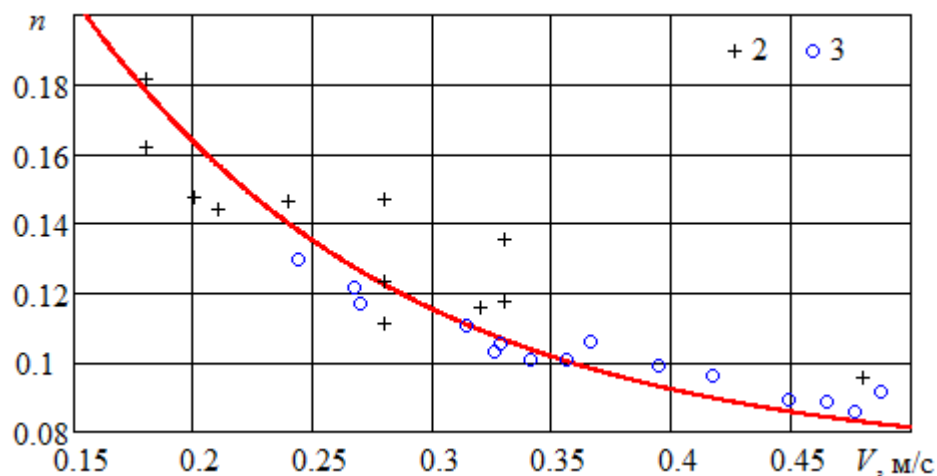


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента шероховатости русла реки Писса (Зеленый Бор, 1960) от средней скорости: 1 – расчет по формуле (5), 2 – по данным наблюдений (русло с травой), 3 – по данным наблюдений (русло свободное)

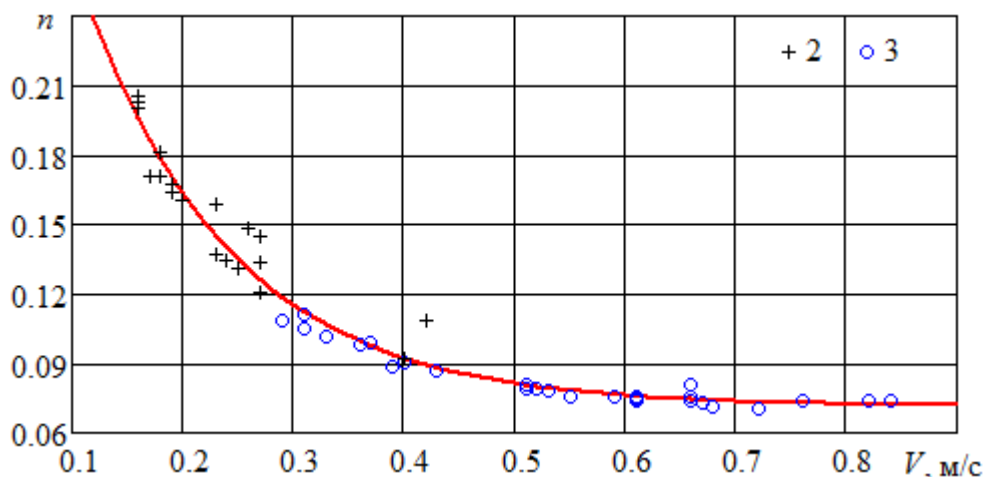


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента шероховатости русла реки Писса (Зеленый Бор, 1961) от средней скорости. Обозначения, как на рис. 1

Заключение

По данным наблюдений на реке Писсе, опубликованным в Гидрологических ежегодниках, рассчитаны значения коэффициентов шероховатости в формуле Шези. Предложена эмпирическая формула зависимости этого коэффициента от средней скорости водотока. Эмпирические константы в указанной формуле найдены методом наименьших квадратов. При увеличении скоростей коэффициент шероховатости уменьшается, стремясь к постоянному значению для реки Писса $n = 0,071$. С уменьшением средней скорости коэффициент шероховатости значительно возрастает. Для выявления региональных зависимостей и рекомендаций необходим дальнейший анализ данных наблюдений как реки Писсы на протяжении ряда лет, так и других водотоков.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания НИОКР 2017 года по теме: «Определение расходов и уровней воды в малых реках рыбохозяйственного значения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумов В.А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водотоке // Известия КГТУ, 2017. № 44. С. 46-58.
2. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Моделирование распространения взвешенных органических примесей в водотоках // Вода: химия и экология, 2017. № 3. С. 3-8.
3. Строительные нормы и правила. СНиП 3.07.03-85*. Мелиоративные системы и сооружения. Утверждены постановлением Госстроя СССР № 230 от 16.12.1985.
4. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. Утверждена приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации № 333 от 17.12. 2007 (ред. от 29.07.2014, пр. № 339).
5. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел // Журнал университета водных коммуникаций, 2010. № 2. С. 90-93.
6. Барышников Н.Б., Овсейко П.П., Субботина Е.С., Терентьев И.С. Гидравлические сопротивления движению потоков в руслах с поймами // Ученые записки РГМУ, 2014. № 36. С. 29-36.
7. Карасев И.Ф., Коваленко В.В. Статистические методы речной гидравлики и гидрометрии. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 208 с.

8. Чоу В. Гидравлика открытых каналов. М.: Стройиздат, 1969. 462 с.
9. Щедрин В.Н., Вайнберг М.В., Чураев А.А. Совершенствование способов определения расхода воды в открытых мелиоративных каналах // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, 2016. № 1(21). С. 1-20.
10. Писарев А.В., Храпов С.С., Агофонникова Е.О., Хоперсков А.В. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости // Вестник Удмуртского университета, 2013. № 1. С. 114-130.
11. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России № 218 от 26.12.2003.
12. Гидрологический ежегодник 1959 г. Бассейн Балтийского моря / Под ред. В.В. Селянкиной. Вып. 5, 6. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. 209 с.
13. Гидрологический ежегодник 1960 г. Бассейн Балтийского моря / Под ред. Л.М. Жвирздинене. Вып. 5, 6. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. 262 с.
14. Гидрологический ежегодник 1961 г. Бассейн Балтийского моря / Под ред. Л.М. Жвирздинене. Вып. 5, 6. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. 198 с.

REFERENCES

1. Naumov V.A. *Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vzveshennykh primesey ot tochechnogo istochnika i ikh osazhdeniya v vodotoke* [Mathematical modeling of the suspended contaminants from a point source and their deposition in the stream]. *Izvestiya KGTU*, 2017. No 44, pp. 46-58.
2. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Modelirovanie rasprostraneniya vzveshennykh organicheskikh primesey v vodotokakh* [Modeling of the propagation of the weighted or-organic impurities in waters]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017. No 3, pp. 3-8.
3. *Stroitel'nye normy i pravila SNIp 3.07.03-85*. Meliorativnye sistemy i sooruzheniya* [Building regulations SNIp 3.07.03-85*. Drainage systems and structures]. *Utverzhdeny postanovleniem Gosstroya SSSR № 230, 16.12.1985.*
4. *Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnye ob"ekty dlya vodopol'zovateley* [The methodology for the development of standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. *Utverzhdena prikazom Ministerstva prirodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii № 333, 17.12. 2007 (ed. 29.07.2014, No 339).*
5. Baryshnikov N.B., Pagan A.O. *Gidravlichesкое soprotivlenie rechnyykh rusel* [Hydraulic resistance of river channels]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy*, 2010. No 2, pp. 90-93.
6. Baryshnikov N.B., Ovseyko P.P., Subbotina E.S., Terent'ev I.S. *Gidravlicheskie soprotivleniya dvizheniyu potokov v ruslakh s poymami* [Hydraulic resistance of flow in channels with flood plains]. *Uchenye zapiski RGMU*, 2014. No 36, pp. 29-36.
7. Karasev I.F., Kovalenko V.V. *Statisticheskie metody rechnoy gidravliki i gidrometrii* [Statistical methods, river hydraulics and hydrometry]. SPb: Gidrometeoizdat Publ., 1994. 208 p.
8. Chow V. *Gidravlika otkrytykh kanalov* [Hydraulics of open channels]. Moscow: Sroyizdat Publ., 1969. 462 p.
9. Shchedrin V.N., Vaynberg M.V., Churaev A.A. *Sovershenstvovanie sposobov opredeleniya raskhoda vody v otkrytykh meliorativnykh kanalakh* [Improving ways of determining water flow in open drainage channels]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, 2016. No 1(21), pp. 1-20.
10. Pisarev A.V., Khrapov S.S., Agofonnikova E.O., Khoperskov A.V. *Chislennaya model' dinamiki poverkhnostnykh vod v rusle Volgi: otsenka koeffitsienta sherokhovatosti*



[Numerical model of the dynamics of surface water in the channel of Volga: estimation of roughness]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2013. No 1, pp. 114-130.

11. *Svod pravil SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [The set of rules SP 33-101-2003. Determination of basic design hydrological characteristics]. *Odobren dlya primeneniya v kachestve normativnogo dokumenta postanovleniem Gosstroya Rossii*. No 218, 26.12.2003.

12. *Gidrologicheskiy ezhegodnik 1959 g. Basseyn Baltiyskogo moray. Pod red. L.M. Zhvirzdinene* [Hydrological Yearbook 1960, Baltic sea basin. Editor V.V. Selyankina]. V. 5, 6. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1963. 209 p.

13. *Gidrologicheskiy ezhegodnik 1960 g. Basseyn Baltiyskogo moray. Pod red. L.M. Zhvirzdinene* [Hydrological Yearbook 1960, Baltic sea basin. Editor L.M. Zhvirzdinene]. V. 5, 6. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1963. 262 p.

14. *Gidrologicheskiy ezhegodnik 1961 g. Basseyn Baltiyskogo moray. Pod red. L.M. Zhvirzdinene* [Hydrological Yearbook 1961, Baltic sea basin. Editor L.M. Zhvirzdinene]. V. 5, 6. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1963. 198 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Наумов Владимир Аркадьевич

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, действительный член Российской инженерной академии, действительный член Российской академии естественных наук,

E-mail: van-old@rambler.ru

Naumov Vladimir Arkad'evich

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, Chairman of The Water Resources Department, Doctor of Technical Science, Professor, Member of Russian Engineering Academy, Member of Russian Academy of Natural Science,

E-mail: van-old@rambler.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
236022, Россия, Калининград, Советский пр., 1, КГТУ, ГУК, каб. 372. Наумов В.А.
8(4012)99-53-37