

УДК 556.5:627.13

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-188-201

*Н.Р. АХМЕДОВА, В.А. НАУМОВ,
Калининградский государственный технический университет*

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ РУСЛА МАЛОЙ РЕКИ В ЗАДАННОМ СТВОРЕ (НА ПРИМЕРЕ Р. ЧЕРНОЙ)

Актуальным вопросом в области гидрологических изысканий является определение коэффициента шероховатости, т. к. от данного показателя зависит один из основных расчетных параметров – уровень воды в водотоке, необходимый для обоснования проектных решений, в том числе и при разработке защитных инженерных мероприятий от затопления прилегающей территории. В соответствии с нормативными документами, действующими на территории Российской Федерации, значение шероховатости принимается по визуальной характеристике русла, что носит субъективный характер и может привести к значительным ошибкам в расчетах.

Целью настоящей работы является определение взаимосвязи коэффициента шероховатости русла с безразмерными комплексами при разных глубинах воды (до и после выхода на пойму). Все расчеты выполнены по данным систематических наблюдений за гидрологическим режимом р. Черной (пост Сагра), коэффициент шероховатости определялся численным методом. Анализ ряда максимальных глубин H позволил определить некоторое значение H_1 . Установлено, что при $H \leq H_1$ гидравлический радиус R растет вместе со значением максимальной глубины, при $H > H_1$ эта зависимость немонотонная, а при выходе воды на пойму R заметно отличается от средней глубины водотока h ; при $H \leq H_1$ есть тесная стохастическая связь уклона I с числами Рейнольдса Re ; при $H > H_1$ возрастает погрешность, вносимая заменой $R = h$ в расчетных формулах.

Расчеты показали, что до выхода на пойму наблюдается значимая стохастическая связь коэффициента шероховатости n с Re и безразмерным комплексом b , а после выхода на пойму – тесная стохастическая связь n только с числом Фруда Fr . Результаты расчетов показывают, что при определении минимальных уровней воды нельзя считать показатель степени y в формуле Маннинга постоянной величиной, т. к. это может привести к большой погрешности.

Ключевые слова: коэффициент шероховатости; малый водоток; пойма; число Фруда; р. Черная.

Для цитирования: Ахмедова Н.Р., Наумов В.А. Анализ изменения коэффициента шероховатости русла малой реки в заданном створе (на примере р. Черной) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 1. С. 188–201.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-188-201

*N.R. AKHMEDOVA, V.A. NAUMOV,
Kaliningrad State Technical University*

ROUGHNESS COEFFICIENT MEASUREMENTS OF THE CHERNAYA RIVER CHANNEL

The paper presents the determination of the roughness coefficient of the minor river channel, since one of the main design parameters depends on the minor stream, required for a substantiation of design decisions. In accordance with the regulatory documents of the Russian Federation, the roughness coefficient is taken according to the visual characteristics of the riverbed.

The purpose of this work is to determine the relationship of the roughness coefficient and dimensionless complexes at different water depths (before and after entering the floodplain).

All calculations are performed according to the results of studying the hydrological conditions of the Chernaya river. The roughness coefficient is determined by the numerical method. Analysis of the maximum depth allows to obtain its certain value. It is shown that the hydraulic radius increases at a higher depth. When the maximum depth is deeper, this dependence is nonmonotonic, and when water enters the floodplain, the hydraulic radius strongly differs from the average depth of the minor stream. It is found that before entering the floodplain, there is a significant stochastic relationship between the roughness coefficient, Reynolds number and the dimensionless complex. After entering the floodplain, there is a close stochastic relationship between roughness coefficient and the Froude number. When determining the minimum water levels, the exponent of Chezy's velocity factor in the Manning formula cannot be considered a constant value, because this can lead to a great error.

Keywords: roughness coefficient; minor stream; floodplain; Froude number; the river Chernaya.

For citation: Akhmedova N.R., Naumov V.A. Analiz izmeneniya koeffitsienta sherokhovatosti rusla maloi reki v zadannom stvore (na primere r. Chernoi) [Roughness coefficient measurements of the Chernaya River channel]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 1. Pp. 188–201.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-188-201

Введение

Инженерные изыскания для строительства являются неотъемлемым этапом подготовки проекта любого здания или сооружения. При наличии водотока на участке проектирования выполняют гидрологические и гидравлические расчеты. Как правило, требуется найти максимальный (или минимальный) расчетный уровень H_p некоторой обеспеченности P в заданном створе. На большинстве малых водотоков систематических гидрологических наблюдений не проводится. В таком случае свод правил¹ предписывает определить максимальный расчетный сток Q_p по одной из редукционных формул и найти соответствующую глубину водотока из известной формулы Шези как уравнения

$$Q_p = \omega(H_p) C(n, H_p) \sqrt{R(H_p) I}, \quad (1)$$

где I – уклон водной поверхности; R – гидравлический радиус потока; C – коэффициент Шези; n – коэффициент шероховатости русла; ω – площадь живого сечения водотока.

Зависимость R и ω от H находится по поперечному сечению русла в заданном створе, которое определено во время изысканий. При средней глубине водотока до 5 м нормативными документами коэффициент Шези предписано вычислять по формуле Н.Н. Павловского:

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

В зарубежных публикациях для вычисления коэффициента C чаще всего используют формулу Маннинга ($y = 1/6 = \text{const}$) [2, 4, 5, 7]:

$$C = R^{1/6} / n. \quad (3)$$

¹ Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Москва: Госстрой России, 2004. 74 с.

Коэффициенты шероховатости n в формулах (1), (2) приходится выбирать по описательным характеристикам расчетного участка, приведенным в соответствующих таблицах. В России нормативными документами предписано использовать таблицу М.Ф. Срибного, в США чаще всего применяют таблицу В.Т. Чоу. Названные таблицы основаны на большом объеме натурной информации. К сожалению, коэффициенты шероховатости и таблицы для их определения имеют много недостатков, в частности широкий диапазон значений коэффициентов шероховатости при одной и той же описательной характеристике, не учитывается изменение параметров водотока.

Вопрос обоснованного выбора коэффициента шероховатости при выполнении гидравлических расчетов является актуальным, т. к. шероховатость русла существенно влияет на динамику водотоков [1–9].

Так, в работе [1] была выполнена оценка влияния шероховатости дна на параметры прорывной волны при разрушении плотины. В работе [2] представлены результаты исследований, которые показывают, что коэффициент шероховатости имеет тенденцию уменьшаться с увеличением расхода и глубины воды, и в определенном диапазоне он, по-видимому, остается постоянным. Авторами этой работы подтверждается необходимость оценки коэффициента шероховатости методом полевых измерений. В статье [3] приведены результаты численного моделирования динамики поверхностных вод на территории Волго-Ахтубинской поймы на основе системы уравнений Сен-Венана с использованием комбинированного алгоритма Лагранжа – Эйлера. На примере весеннего половодья 2011 г. была показана неприменимость гидродинамической модели с постоянным значением коэффициента шероховатости n . Авторы [4] попытались исследовать сезонную динамику коэффициента шероховатости Маннинга (n) на основе одномерной гидравлической модели. Были созданы четыре модели участков рек на основе цифровой модели рельефа высотой 1 м и полевых измерений, в которых сезонные коэффициенты шероховатости были откалиброваны и подтверждены с помощью записи датчика. Использование фактора сезонной шероховатости улучшило производительность модели, и результаты сопоставимы с предыдущими исследованиями в той же области. В исследовании [5] формула для расчета значения n была создана на основе статистического анализа оценочных значений n по формуле Маннинга. Результаты показали, что использование динамического n может улучшить моделирование стока гидрологических моделей, особенно на склонах. В исследовании [6] было использовано вычислительное моделирование для определения взаимосвязи между коэффициентом Маннинга и параметрами мелкомасштабных возмущений дна в длинном канале.

Большинство традиционных методов калибровки n обеспечивают только среднее значение для продольных поперечных сечений реки, что может значительно увеличить ошибки при прокладке маршрута наводнения. В статье [7] был представлен метод определения функций распределения n вдоль естественных рек на основе модифицированной оптимизации случайного поиска и кластеризации (MRSOC). Результаты показали, что с помощью предложенного метода все постепенные и резкие изменения значения n на продольных сечениях естественных рек могут быть оценены с достаточной точностью и также могут быть полу-

чены уравнения для этих изменений. Это может в конечном итоге привести к заметному уменьшению ошибок при маршрутизации наводнений.

В реках поведение потока является очень сложным явлением из-за нестационарного и неравномерного течения. В работе [8] рассматривается вопрос о влиянии изменения морфологии русла реки на сток реки с использованием гидравлической модели. Результаты исследования показали, что точность прогнозируемой максимальной глубины воды и уровня поверхностных вод зависит от точного представления шероховатости Маннинга.

В исследовании [9] изучалось влияние точности входных данных на генерацию гидрологической модели. С помощью обработки данных малой беспилотной авиационной системы высокого пространственного разрешения (sUAS) для гидрологического моделирования была создана цифровая модель поверхности (DSM) и совместно зарегистрированная ортофотомозаика участка р. Драу на юге Австрии. Показатели шероховатости были рассчитаны на основе DSM, а затем использованы для определения пространственно изменяющихся значений коэффициента Маннинга n по наблюдаемой пойме. Результаты показали, что на точность гидрологического моделирования влияет пространственное разрешение изображения.

В Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) на примере около 500 рек выполнено исследование зависимости коэффициентов шероховатости от средних глубин русел $n = f(h)$ [10, 11]. Было выделено два основных типа зависимостей. К первому типу относятся возрастающие функции $f(h)$, характерные для равнинных рек, берега которых интенсивно заросли кустарником и деревьями. Убывающие функции случаются у рек с хорошо разработанными незаросшими руслами, что более характерно для горных и полуторных рек. Помимо двух основных типов зависимостей $f(h)$, возможны еще три промежуточных. В частности, встречаются реки, на которых сначала наблюдается увеличение коэффициентов шероховатости с ростом средних глубин потока, а затем при достижении некоторого их критического значения n уменьшаются. Возможна зависимость зеркального вида.

На кафедре гидрометрии РГГМУ на основе анализа натурной информации более чем по 100 рекам России и ближнего зарубежья выполнена попытка разработки методики расчетов пойменной составляющей потока, в основу которой были положены аналитические зависимости [11, 12]. Был сделан вывод, что методика расчетов средних скоростей и максимальных расходов воды на пойменных морфостворках, основанная на формулах Шези и Маннинга, которая предписана действующими нормативными документами, приводит к большим погрешностям. Разработанные в РГГМУ методы расчетов средних скоростей взаимодействующих потоков и пропускной способности русел и пойм существенно уменьшают погрешности расчетов, но требуют доработки на большем объеме натурной информации. Необходима разработка принципиально новых методов расчетов средних скоростей русловых и пойменных потоков и пропускной способности русел и пойм.

Заметим, что объектами большинства перечисленных исследований являются большие и средние реки, тогда как закономерности изменения коэффициента шероховатости русла малых рек имеют свои особенности (см.

[13–16] и библиографию в них). Исследования, проведенные в створах малых рек с глубоким руслом [13–15], показали, что с увеличением числа Фруда F_r коэффициент шероховатости русла снижается. В работе [16] отмечено, что влияние значений F_r на величину этого коэффициента у малых рек гораздо сильнее, чем у средних. Кроме того, любой малый водоток имеет свои особенности и требует отдельного исследования. Цель настоящего исследования заключается в определении взаимосвязи коэффициента шероховатости русла с безразмерными комплексами при различных глубинах воды в русле и при выходе на пойму.

Методы

В качестве примера была рассмотрена малая река Черная. Водная система: река Черная → Исетское озеро → река Исеть → река Тобол → река Иртыш → река Обь → Карское море. Сведения из автоматизированной информационной системы²: код водного объекта: 111200269; код пункта наблюдений: 12133; гидропост на реке Черной (створ ж/д станции Сагра) открыт 01.10.1956, закрыт 01.03.1992; отметка нуля поста: 252,74 м БС. Расстояние от истока: 22,0 км, от устья 7,6 км. Площадь водосбора: 220 кв. км.

В гидрологических ежегодниках за 1963, 1964 и 1965 гг.³ имеются данные измерений, включая необходимый для расчетов уклон водной поверхности (всего 64 набора измерений за 3 года). В табл. 1 приведена часть результатов измерений 1963 г.

Таблица 1

Данные измерений р. Черной (ж/д станция Сагра, 1963 г.)

№ п/п	Дата	Q	ω	B	h	H	I
		м ³ /с	м ²	м	м	м	‰
1	22.04	13,3	26,0	41,3	0,63	2,11	0,60
2	25.04	12,0	18,4	30,5	0,60	1,85	0,70
3	06.05	9,28	16,0	27,0	0,59	1,65	0,78
4	09.05	6,16	12,7	20,0	0,64	1,60	0,71
5	11.05	5,23	10,5	15,0	0,70	1,45	0,62
6	15.05	4,00	8,18	9,3	0,88	1,32	0,60
7	20.05	3,09	6,58	7,7	0,85	1,29	0,60
8	23.05	2,67	5,98	8,2	0,73	1,08	0,64
9	27.05	2,27	5,11	8,0	0,64	0,96	0,68
10	01.06	2,35	5,23	8,0	0,65	0,96	0,68

² Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 10.10.2021).

³ Гидрологический ежегодник 1963 г. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть) / под ред. В.С. Померанцевой. Вып. 4-9. Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. 487 с.; Гидрологический ежегодник 1964 г. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть) / под ред. В.С. Померанцевой. Вып. 4-9. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. 550 с.; Гидрологический ежегодник 1965 г. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть) / под ред. В.С. Померанцевой. Вып. 4-9. Свердловск : Гидрометеиздат, 1968. 559 с.

Окончание табл. 1

№ п/п	Дата	Q	ω	B	h	H	I
		м ³ /с	м ²	м	м	м	‰
11	04.06	1,77	4,28	7,3	0,59	0,84	0,72
12	12.06	2,36	5,36	8,2	0,65	0,97	0,68
13	21.06	1,00	3,20	6,5	0,49	0,68	0,80
14	29.06	0,57	2,23	6,2	0,36	0,51	0,90
15	08.07	0,26	1,62	5,7	0,28	0,41	0,86
16	19.08	1,57	3,95	7,3	0,54	0,78	0,80
17	30.08	0,21	1,49	5,8	0,26	0,37	0,86
18	10.09	0,18	1,37	5,7	0,24	0,32	0,86
19	26.09	1,68	4,03	7,3	0,55	0,76	0,76
20	30.09	0,64	2,46	6,3	0,39	0,53	0,86
21	07.10	0,49	2,12	6,3	0,34	0,49	0,90
22	17.10	0,53	2,19	6,3	0,35	0,50	0,90

Примечание. Q – расход воды; ω – площадь поперечного сечения; B – ширина реки по урезу воды; h – средняя глубина; H – максимальная глубина; I – уклон водной поверхности.

Проверка показала принадлежность результатов измерений за разные годы одной статистической совокупности. Для иллюстрации на рис. 1 указанные результаты показаны разными значками. Видно, что при максимальных глубинах, меньших некоторого значения H_1 , точки практически легли на одну линию; при $H > H_1$ разброс несколько больший. Далее все результаты измерений будем разделять не по годам, а по указанному признаку.

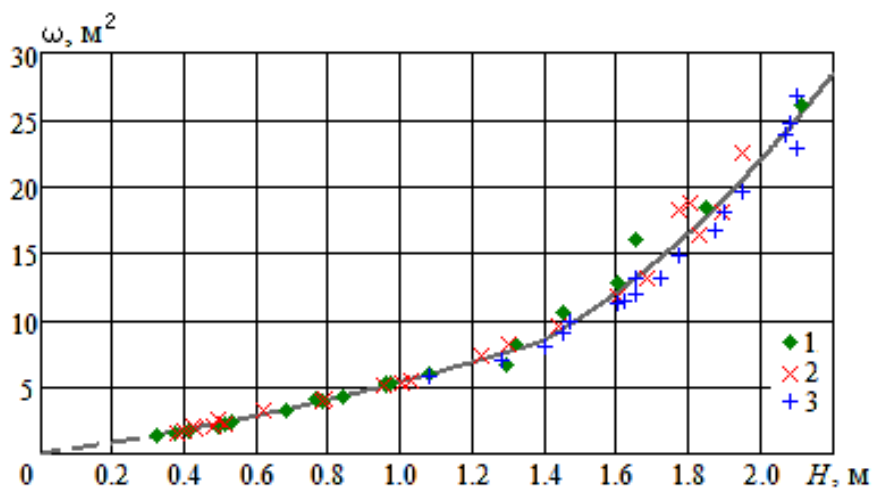


Рис. 1. Зависимость площади поперечного сечения р. Черной (пост Сагра) от максимальной глубины. Точки – данные измерений:

1 – 1963 г.; 2 – 1964 г.; 3 – 1965 г.; линия – результат расчета по формуле (5)

На рис. 2 показана связь ширины (по урезу воды) поперечного сечения исследуемого водотока с максимальной глубиной. Точки хорошо ложатся на две четко различающиеся прямые линии. Можно записать эмпирическую зависимость

$$B \equiv \varphi(H) = \begin{cases} a_{10} + a_{11}H, & H \leq H_1; \\ a_{20} + a_{21}H, & H > H_1. \end{cases} \quad (4)$$

Если проинтегрировать функцию $\varphi(H)$, получим площадь поперечного сечения водотока

$$\omega(H) = \int_0^H \varphi(z) dz = \begin{cases} a_{10}H + 0,5a_{11}H^2, & H \leq H_1; \\ \omega_1 + a_{20}(H - H_1) + 0,5a_{21}(H - H_1)^2, & H > H_1; \end{cases} \quad (5)$$

$$\omega_1 = a_{10}H_1 + 0,5a_{11}H_1^2.$$

Для расчетов по формуле Шези необходимо определить смоченный периметр χ и гидравлический радиус R в рассматриваемом створе:

$$\chi(H) = \int_0^H \sqrt{1 + (\varphi'(z))^2} dz = \begin{cases} a_{10} + A_1H, & H \leq H_1; \\ a_{10} + A_1H_1 + A_2(H - H_1), & H > H_1; \end{cases} \quad (6)$$

$$R(H) = \omega(H) / \chi(H), \quad A_1 = \sqrt{1 + a_{11}^2}, \quad A_2 = \sqrt{1 + a_{21}^2}. \quad (7)$$

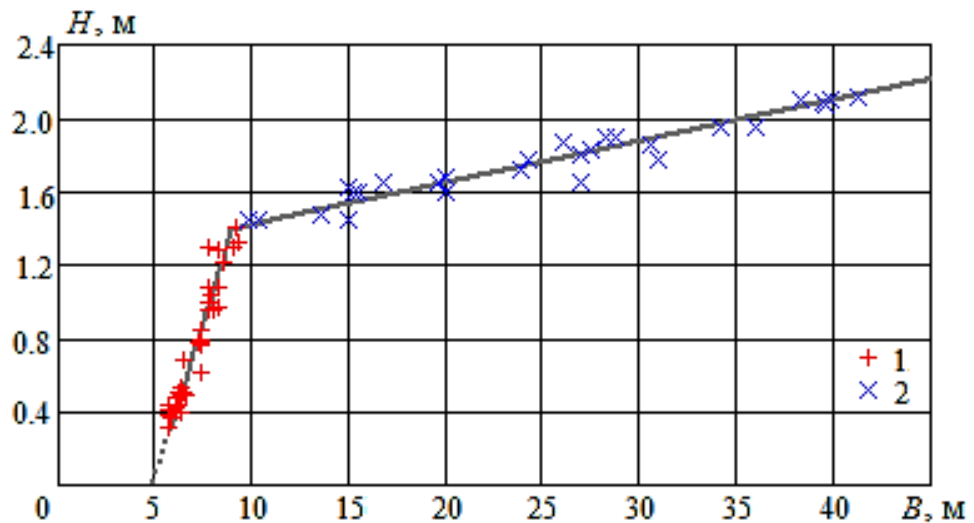


Рис. 2. Связь ширины (по урезу воды) поперечного сечения р. Черной (пост Сагра) с максимальной глубиной. Точки – данные измерений: 1 – $H \leq H_1$; 2 – $H > H_1$; линия – результат расчета по формуле (4)

По рис. 3 видно, что при $H \leq H_1$ гидравлический радиус растет в месте с максимальной глубиной, и они мало различаются. При $H > H_1$ зависимость немонотонная, причем h может заметно превышать R .

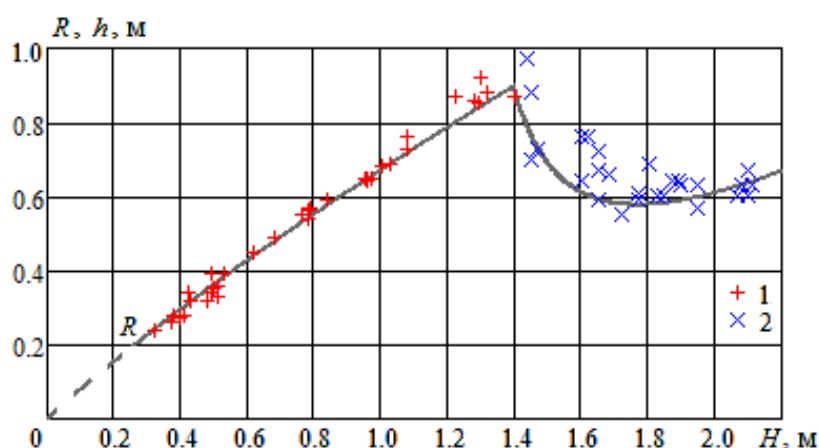


Рис. 3. Зависимость гидравлического радиуса (линия по формуле (8)) и средней глубины (точки) от максимальной глубины. Обозначения, как на рис. 2

Далее подставим (2) в (1), прологарифмируем обе части полученного равенства, внесем в него данные измерений из табл. 1 и результаты расчета гидравлического радиуса:

$$\ln Q_i = \left[2,5\sqrt{n_i} - 0,13 - 0,75\sqrt{R_i}(\sqrt{n_i} - 0,1) \right] \ln R_i - \ln n_i + \ln \omega_i + \frac{1}{2} \ln(R_i + I_i). \quad (8)$$

Из уравнения (8) значения коэффициента шероховатости русла в каждой i -й точке ($i = 1, 2, \dots, 64$) были найдены численным методом.

Результаты

Эмпирические коэффициенты в формуле (4) были определены методом наименьших квадратов: $a_{10} = 4,91$ м; $a_{11} = 2,90$; $a_{20} = -52,29$ м; $a_{21} = 43,88$; $H_1 = 1,40$ м. Тогда в формуле (6) $\omega_1 = 8,44$ м², в формуле (7) $A_1 = 3,07$; $A_2 = 43,89$. Результаты расчетов на рис 1 и 2 хорошо согласуются с данными наблюдений. Индекс детерминации $\phi(H)$ довольно высок (0,976).

Заметим, что в имеющемся массиве отсутствуют наблюдения при небольших глубинах. Прямая линия на рис. 2 была продлена до пересечения с осью абсцисс. Это равнозначно предположению, что в исследуемом створе водоток имеет плоское дно шириной $B_0 = a_{10} = 4,91$ м. Такое предположение практически не окажет влияния на результаты расчета максимальных расходов и уровней. Но при расчете минимальных расходов или уровней требуются дополнительные наблюдения при малых глубинах.

Массовые расчеты коэффициента шероховатости русла в исследованиях [2–5, 7–9] были выполнены не по уравнению (8), а по формуле, следующей из (1), (2), с заменой $y = 1/6$, $R = h$:

$$n_{hy} = h^{2/3} \cdot I^{1/2} / V. \quad (9)$$

Конечно, расчет по формуле (9) гораздо проще. Но на рис. 3 видно, что при выходе на пойму гидравлический радиус R заметно отличается от средней

глубины водотока h . Для оценки вносимой погрешности были выполнены дополнительные расчеты коэффициента шероховатости русла: 1) n_h – по уравнению (8), в котором положено $R = h$; 2) n_y – по уравнению (8), в котором положено $y = 1/6$.

На рис. 4 показаны относительные погрешности:

$$\varepsilon_h = 100(n_h / n - 1), \quad \varepsilon_y = 100(n_y / n - 1). \quad (10)$$

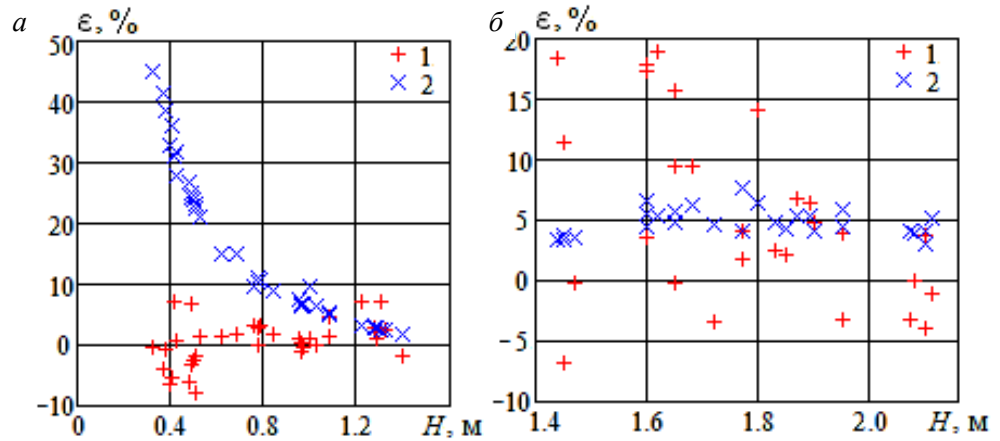


Рис. 4. Относительные погрешности расчета коэффициента шероховатости русла по формуле (10):

$a - H \leq H_1$; $б - H > H_1$; 1 – $\varepsilon_h (R = h)$; 2 – $\varepsilon_y (y = 1/6)$

На рис. 4 видно, что погрешность, вносимая заменой $R = h$, при $H \leq H_1$ не превышает 8 %, при $H > H_1$ – возрастает до 20 %. Погрешность, вносимая заменой $y = 1/6$, при $H > H_1$ менее 7 %, а при уменьшении глубины растет и достигает 45 %. Следовательно, при расчете минимальных уровней нельзя считать y постоянной величиной, это может привести к большой погрешности.

Оценим тесноту стохастической связи коэффициента шероховатости русла с безразмерными комплексами:

$$Fr = \frac{V^2}{g \cdot R}, \quad Re = \frac{V \cdot R}{\nu}, \quad b = \frac{B}{h}, \quad (11)$$

где $V = Q/\omega$ – средняя по сечению скорость; ν – коэффициент кинематической вязкости воды; g – ускорение свободного падения.

Из табл. 2, в которой представлены коэффициенты парной корреляции, следует, что при любой глубине коэффициент шероховатости русла имеет наиболее тесную стохастическую связь с числом Фруда. Корреляция отрицательная. До выхода на пойму наблюдается значимая стохастическая связь ($r > 0,7$) n с Re и b . Однако при построении регрессионной модели указанные факторы можно исключить, т. к. велики модули коэффициентов парной корреляции Fr с Re и b (0,881 и 0,890 соответственно). После выхода на пойму тесная стохастическая связь у n наблюдается только с Fr .

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции

Параметр	$H \leq H_1$			$H > H_1$		
	Fr	Re	b	Fr	Re	b
n	-0,938	-0,724	0,761	-0,912	-0,215	-0,534
I	-0,827	-0,915	0,834	0,409	-0,142	0,012
Fr	1	0,881	-0,890	1	0,372	0,495
Re	0,881	1	-0,911	0,372	1	-0,010
b	-0,890	-0,911	1	0,495	-0,010	1

Была выдвинута гипотеза, что зависимость коэффициента шероховатости русла от чисел Фруда, как в [13, 14], может быть описана формулой

$$n = n_0 + A \cdot \exp(-\alpha \cdot Fr), \quad (12)$$

где $\alpha = 25,85$; $A = 0,0449$; $n_0 = 0,0223$ – эмпирические константы, найденные методом наименьших квадратов.

На рис. 5 видно, что результаты расчета по формуле (12) вполне удовлетворительно согласуются с данными наблюдений; индекс детерминации составил 0,960.

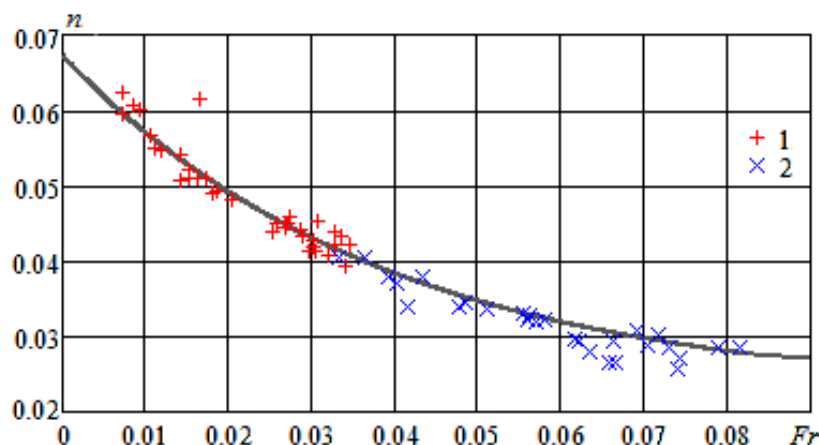


Рис. 5. Зависимость коэффициента шероховатости русла от числа Фруда. Линия – результат расчета по формуле (12). Обозначения точек, как на рис. 2

При определении максимального расчетного уровня по формулам (1), (2) можно рекомендовать значение $n = 0,028$, минимального – $n = 0,065$.

Расчет по формуле Шези (1), кроме n , требует задания уклона I , который также не остается постоянным в течение года (см., например, [17]). По табл. 2 при $H > H_1$ стохастическая зависимость I наблюдается только от Fr , но и она слабая, не позволяющая построить регрессионную модель. При $H \leq H_1$ наиболее тесная стохастическая связь уклона с числами Рейнольдса. Для указанной области найдем регрессионную зависимость в виде формулы (рис. 6):

$$I = I_0 + \Theta \cdot \exp(-\Theta \cdot Re), \quad (13)$$

где $\theta = 0,572 \cdot 10^{-5}$; $\Theta = 0,378$; $I_0 = 0,642$ – эмпирические константы, найденные методом наименьших квадратов. Индекс детерминации (13) по области $H \leq H_1$ составил 0,802. В области $H > H_1$ построить регрессионную модель не представляется возможным (см. точки 2 на рис. 6).

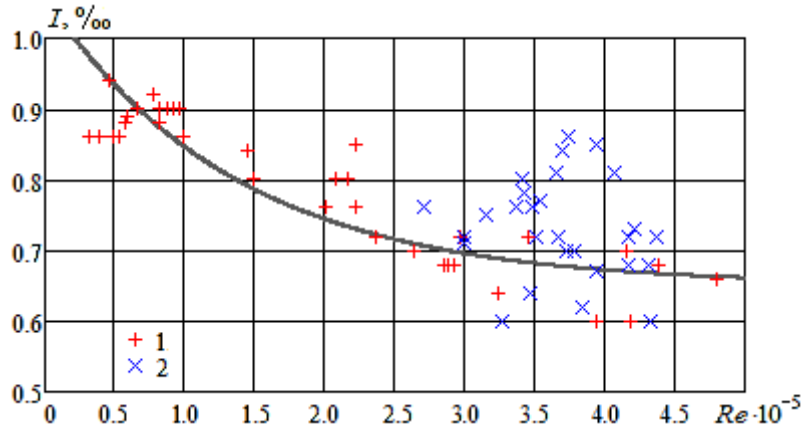


Рис. 6. Зависимость уклона водной поверхности от числа Рейнольдса. Линия – результат расчета по формуле (13). Обозначения точек, как на рис. 2

При определении минимального расчетного уровня можно рекомендовать значение $I = 0,9$ ‰. При определении максимального расчетного уровня придется находить его наибольшее значение по $I = 0,6$ ‰ и наименьшее – по $I = 0,87$ ‰.

Заключение

До выхода на пойму наблюдается значимая стохастическая связь коэффициента шероховатости n с числами Фруда Fr , Рейнольдса Re и отношением ширины водотока к его средней глубине b ; после выхода на пойму тесная стохастическая связь у n наблюдается только с числом Фруда Fr . Модули коэффициентов парной корреляции Fr с Re и b велики (0,881 и 0,890 соответственно). Была найдена регрессионная зависимость $Fr - n$ в экспоненциальной форме, справедливая при любой глубине.

При выходе на пойму гидравлический радиус русла R заметно отличается от средней глубины водотока h . Погрешность, вносимая допущением $R = h$, при $H \leq H_1$ не превышает 8 %, при $H > H_1$ возрастает до 20 %. Погрешность, вносимая в формулу для определения коэффициента Шези заменой показателя степени $y = 1/6$, при $H > H_1$ менее 7 %, а при уменьшении глубины растет и достигает 45 %. Следовательно, при расчете минимальных уровней нельзя считать y постоянной величиной, это может привести к большой погрешности.

Анализ ряда максимальных глубин H_p . Черной (пост Сагра) позволил определить некоторое значение H_1 , которое делит зависимость площади попе-

речного сечения реки от максимальной глубины на две части. При $H \leq H_1$ гидравлический радиус растет вместе с максимальной глубиной, и они мало различаются, а при $H > H_1$ зависимость немонотонная, и средняя глубина h может заметно превышать R . При $H \leq H_1$ наблюдается значимая стохастическая связь уклона I с числами Рейнольдса; при $H > H_1$ таковая отсутствует.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valov A.O., Degtyarev V.V., Fedorova N.N. Evaluation of the influence of bottom roughness on parameters of wave flows in channels // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1939. P. 020041. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5027353>
2. Kim J.S., Lee C.J., Kim W., Kim Y.J. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river // Water Science and Engineering. 2010. V. 3. I. 2. P. 217–232. URL: <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.010>
3. Писарев А.В., Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Хоперсков А.В. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2013. № 1. С. 114–130. DOI: 10.20537/vm130111
4. Song S., Schmalz B., Xu Y.P., Fohrer N. Seasonality of roughness – the indicator of annual river flow resistance condition in a lowland catchment // Water Resources Management. 2017. V. 31. I. 11. P. 3299–3312. URL: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1656-z>
5. Ye A., Zhou Z., You J., Ma F., Duan Q. Dynamic Manning's roughness coefficients for hydrological modelling in basins // Hydrology Research. 2018. V. 49. I. 5. P. 1379–1395. URL: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.175>
6. Dyakonova T., Khoperskov A. Bottom friction models for shallow water equations: Manning's roughness coefficient and small-scale bottom heterogeneity // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 973. P. 012032. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012032>
7. Attari M., Taherian M., Hosseini S.M., Niazmand S.B., Jeiroodi M., Mohammadian A. A simple and robust method for identifying the distribution functions of Manning's roughness coefficient along a natural river // Journal of Hydrology. 2020. V. 595. P. 125680. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125680>
8. Mardani N., Suara K., Fairweather H., Brown R., McCallum A., Sidle R. Improving the accuracy of hydrodynamic model predictions using Lagrangian calibration // Water. 2020. V. 12. P. 575. URL: <https://doi.org/10.3390/w12020575>
9. Beene D., Zhang S., Paulus G. Workflow for hydrologic modelling with sUAS-acquired aerial imagery // Geocarto International. 2021. V. 36. I. 12. P. URL: <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1648562>
10. Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Демидова Ю.А. Коэффициенты шероховатости речных русел // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 14–19.
11. Барышников Н.Б., Дрезваль М.С., Исаев Д.И., Гаврилов И.С. Гидравлические сопротивления и скоростные поля потоков в руслах сложных форм сечения // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 46. С. 10–20.
12. Барышников Н.Б., Исаев Д.И., Сакович В.М. Методы расчетов максимальных расходов воды руслопойменных потоков в условиях изменения климата // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. № 1. С. 90–96.
13. Наумов В.А. Эмпирическая зависимость коэффициента шероховатости русла реки Красной от чисел Фруда // Вестник науки и образования Северо-Запада России : электронный журнал. 2018. Т. 4. № 3. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Naumov.pdf> (дата обращения: 23.10.2021).
14. Наумов В.А. Анализ изменчивости коэффициента шероховатости русла реки по данным измерений, приведенных в гидрологических ежегодниках // Вестник научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2019. № 14. С. 50–55.
15. Кочкарева А.С., Ахмедова Н.Р. Определение коэффициентов шероховатости при выполнении гидрологических исследований // Вестник науки и образования Северо-Запада

- России. 2021. Т. 7. № 1. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2021/02/2021-N1-Kochkareva-Akhmedova.pdf> (дата обращения: 23.10.2021).
16. Калинин А.В. Зависимость коэффициента Шези от числа Фруда // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2019. Т. 5. № 3. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2019/10/2019-N3-Kalinin.pdf> (дата обращения: 23.10.2021).
 17. Наумов В.А. Влияние изменений уровня в течение года на уклон водной поверхности реки Мсты // Вестник научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2021. № 21. С. 80–86.

REFERENCES

1. Valov A.O., Degtyarev V.V., Fedorova N.N. Evaluation of the influence of bottom roughness on parameters of wave flows in channels. *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 1939. 020041.
2. Kim J.S., Lee C.J., Kim W., Kim Y.J. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Science and Engineering*. 2010. V. 3, No. 2, 2010. Pp. 217–232. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.010
3. Pisarev A.V., Khrapov S.S., Agafonnikova E.O., Khoperskov A.V. Chis-lennaya model' dinamiki poverkhnostnykh vod v rusle Volgi: otsenka koeffitsienta sherokhovatosti [Numerical model of shallow water dynamics in the Volga channel: Roughness coefficient measurement]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki*. 2013. No. 1. Pp. 114–130. DOI: 10.20537/vm130111 (rus)
4. Song S., Schmalz B., Xu Y.P., Fohrer N. Seasonality of roughness – the indicator of annual river flow resistance condition in a lowland catchment. *Water Resources Management*. 2017. V. 31. No. 11. Pp. 3299–3312. DOI: 10.1007/s11269-017-1656-z
5. Ye A., Zhou Z., You J., Ma F., Duan Q. Dynamic Manning's roughness coefficients for hydrological modelling in basins. *Hydrology Research*. 2018. V. 49. No. 5. Pp. 1379–1395. DOI: 10.2166/nh.2018.175
6. Dyakonova T., Khoperskov A. Bottom friction models for shallow water equations: Manning's roughness coefficient and small-scale bottom heterogeneity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 973. 012032.
7. Attari M., Taherian M., Hosseini S.M., Niazmand S.B., Jeirooti M., Mohammadian A. A simple and robust method for identifying the distribution functions of Manning's roughness coefficient along a natural river. *Journal of Hydrology*. 2020. V. 595. 125680. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125680
8. Mardani N., Suara K., Fairweather H., Brown R., McCallum A., Sidle R. Improving the accuracy of hydrodynamic model predictions using Lagrangian calibration. *Water*. 2020. V. 12. P. 575. DOI: 10.3390/w12020575
9. Beene D., Zhang S., Paulus G. Workflow for hydrologic modelling with sUAS-acquired aerial imagery. *Geocarto International*. 2021. V. 36, No. 12. Pp. 1346–1364. DOI: 10.1080/10106049.2019.1648562.
10. Baryshnikov N.B., Subbotina E.S., Demidova Yu.A. Koeffitsienty sherokhovatosti rechnykh rusel [Roughness coefficients of riverbeds]. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2010. No. 12. Pp. 14–19. (rus)
11. Baryshnikov N.B., Dregval' M.S., Isaev D.I., Gavrilov I.S. Gidravlicheskie soprotivleniya i skorostnye polya potokov v ruslakh slozhnykh form secheniya [Hydraulic resistance and velocity flow fields in riverbeds with complicated section shapes]. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2017. No. 46. Pp. 10–20. (rus)
12. Baryshnikov N.B., Isaev D.I., Sakovich V.M. Metody raschetov maksimal'nykh raskhodov vody ruslopoimennykh potokov v usloviyakh izmeneniya klimata [Maximum water rate calculation methods for floodplain flows in different climatic conditions]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*. 2019. V. 29. No. 1. Pp. 90–96. (rus)
13. Naumov V.A. Empiricheskaya zavisimost' koeffitsienta sherokhovatosti rusla reki Krasnoi ot chisel Fruda [Empirical dependence of roughness coefficient of the Red riverbed from Froude number]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii: elektronnyi zhurnal*. 2018. V. 4, No. 3. Available: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Naumov.pdf> (accessed October 23, 2021). (rus)

14. Naumov V.A. Analiz izmenchivosti koefitsienta sherokhovatosti rusla reki po dannym izmenenii, privedennykh v gidrologicheskikh ezhegodnikakh [Analysis of riverbed roughness coefficient according to data given in hydrological yearbooks]. *Vestnik nauchno-metodicheskogo soveta po prirodoobustroistvu i vodopol'zovaniyu*. 2019. No. 14. Pp. 50–55. (rus)
15. Kochkareva A.S., Akhmedova N.R. Opredelenie koefitsientov sherokhovatosti pri vypolnenii gidrologicheskikh issledovaniy [Determination of roughness coefficients when performing hydrological research]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2021. V. 7. No. 1. Available: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2021/02/2021-N1-Kochkareva-Akhmedova.pdf> (accessed October 23, 2021). (rus)
16. Kalinin A.V. Zavisimost' koefitsienta Shezi ot chisla Fruda [Dependence of Chezy's velocity factor from Froude number]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2019. V. 5. No. 3. Available: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2019/10/2019-N3-Kalinin.pdf> (accessed October 23, 2021). (rus)
17. Naumov V.A. Vliyaniye izmenenii urovnya v techeniye goda na uklon vodnoi poverkhnosti reki Msty [Annual changes in the water surface level of the Msta river]. *Vestnik nauchno-metodicheskogo soveta po prirodoobustroistvu i vodopol'zovaniyu*. 2021. No. 21. Pp. 80–86. (rus)

Сведения об авторах

Ахмедова Наталья Равиловна, канд. биол. наук, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский пр., 1, isfendi@mail.ru

Наумов Владимир Аркадьевич, докт. техн. наук, профессор, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский пр., 1, van-old@mail.ru

Authors Details

Natalia R. Akhmedova, PhD, Kaliningrad State Technical University, 1, Sovetsky Ave., 236000, Kaliningrad, Russia, isfendi@mail.ru

Vladimir A. Naumov, DSc, Professor, Kaliningrad State Technical University, 1, Sovetsky Ave., 236000, Kaliningrad, Russia, van-old@mail.ru