

Гидравлика и инженерная гидрология

Научная статья
УДК 532.543:627.131
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/74-80>

Н.Р. Ахмедова, В.А. Наумов

АХМЕДОВА НАТАЛЬЯ РАВИЛОВНА – к.б.н., доцент (автор, ответственный за переписку), isfendi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3483-3580>
НАУМОВ ВЛАДИМИР АРКАДЬЕВИЧ – д.т.н., заведующий кафедрой, van-old@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>
Кафедра водных ресурсов и водопользования
Калининградский государственный технический университет
Калининград, Россия

Влияние изменения коэффициента шероховатости русла на максимальные расчетные уровни малого водотока в заданном створе (на примере р. Нельма)

Аннотация: Сопротивление русла потоку, которое принято характеризовать коэффициентом шероховатости, значительно влияет на основные гидравлические характеристики водного объекта при оценке его пропускной способности. Любой малый водоток имеет свои особенности, так как достаточно быстро реагирует на изменения, происходящие на всей площади водосбора, поэтому требует отдельного исследования. В настоящей статье мы предприняли попытку рассчитать значение коэффициента шероховатости в половодье по данным наблюдений для р. Нельма. Установлено, что справочный коэффициент шероховатости дает завышенные значения максимального уровня воды. Расчеты показали, что с увеличением числа Фруда коэффициент шероховатости русла понижался. Полученные нами результаты могут быть использованы при разработке и уточнении методов определения основных расчетных гидрологических характеристик водотоков, устанавливаемых в целях безопасного использования прилегающих к ним территорий.

Ключевые слова: река Нельма, шероховатость русла, коэффициент Шези, расчетные уровни, сопротивление речного русла

Для цитирования: Ахмедова Н.Р., Наумов В.А. Влияние изменения коэффициента шероховатости русла на максимальные расчетные уровни малого водотока в заданном створе (на примере р. Нельма) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 74–80. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/74-80>

Введение

Определить возможность затопления прилегающей к водному объекту территории – одна из основных задач инженерно-гидрометеорологических изысканий. Согласно [8, 9] исходным материалом для расчета основных гидравлических характеристик водотока (расхода, уровня) являются данные наблюдений на постах (станциях), при отсутствии которых рекомендовано использование метода гидрологической аналогии. Следует учесть, что для определения расхода и уровня воды в объекте, на котором ведутся наблюдения (но не в исследуемом створе), также используется метод гидрологической аналогии.

Коэффициент шероховатости n – интегральная характеристика гидравлических сопротивлений русел – один из значимых параметров при расчете пропускной способности водотока. Проблема выбора n обсуждается во многих работах [1, 3–7]; так, в [3, 6] исследованы сезонные изменения коэффициента шероховатости русла. Полученные в этих работах данные указывают на необходимость уточнения методики определения коэффициента шероховатости в действующих нормативных документах по определению основных расчетных гидрологических характеристик водотоков.

© Ахмедова Н.Р., Наумов В.А., 2021

Статья: поступила: 30.09.2021; рецензия: 04.10.2021; финансирование: Калининградский государственный технический университет.

Цель настоящего исследования – определить возможность применения для расчета максимальных уровней коэффициента шероховатости, установленного по данным наблюдений на гидропосту, на всем протяжении исследуемого малого водотока (р. Нельма) при сравнимых характеристиках состояния русла.

Для этого мы должны прежде всего по данным наблюдений за гидрологическим режимом [2] определить морфометрические характеристики русла р. Нельма); установить значения коэффициента шероховатости в районе гидропоста в различные периоды водности; определить зависимости коэффициента шероховатости от числа Фруда и уклона водной поверхности – от числа Рейнольдса; определить среднее значение коэффициента шероховатости русла в период половодья; сравнить максимальные уровни, рассчитанные предлагаемым авторами методом, со значениями, полученными с использованием коэффициента шероховатости русла из таблицы нормативного документа [8]. В данной статье в качестве базового был принят массив данных из [2], который содержит наибольшее количество измерений (уклоны водной поверхности, скорости, глубины и т.д.), необходимых для нашего исследования.

Река Нельма (исток в районе пос. Грачевка Зеленоградского ГО Калининградской области) относится к малым водотокам с площадью водосбора 167 км², впадает в Калининградский (Вислинский) залив, протяженность реки 30 км. Наблюдения за основными гидрологическими характеристиками р. Нельма проводились в период с 1963 по 2014 г. (пост в районе пос. Кострово) на расстоянии 4 км от устья.

Результаты

По данным наблюдений за гидрологическим режимом р. Нельма (пост пос. Кострово) [2] авторами работы определена зависимость площади поперечного сечения русла ω от максимальной глубины H в нем:

$$\omega = a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 + a_4 H^4, \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – эмпирические коэффициенты, найденные стандартным математическим методом: $a_1 = 3,64; a_2 = 6,81; a_3 = -3,01; a_4 = 0,536$. На рис. 1 видно хорошее согласование с данными наблюдений.

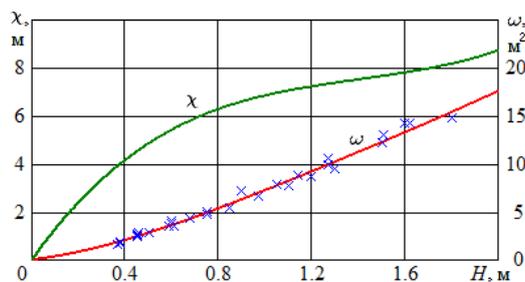


Рис. 1. Зависимость смоченного периметра и площади живого сечения от максимальной глубины р. Нельма (пост пос. Кострово)

Также на рис. 1 показана зависимость смоченного периметра χ от максимальной глубины в русле H , которая была рассчитана с помощью численного интегрирования:

$$\chi(H) = \int_0^H \sqrt{1 + (\varphi'(h))^2} dh. \quad (2)$$

Значения площади поперечного сечения русла ω и смоченного периметра χ необходимы для вычисления гидравлического радиуса R , который используется при определении пропускной способности русла:

$$Q(H) = \omega(H)C(H)\sqrt{R(H)I}, \quad (3)$$

где Q – расход; ω – площадь сечения; R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези; I – гидравлический уклон русла.

Как правило, коэффициент Шези C при $R \leq 5$ м находят по формуле

$$C = \frac{R^y}{n}, \quad (4)$$

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

где y – показатель степени; n – коэффициент шероховатости.

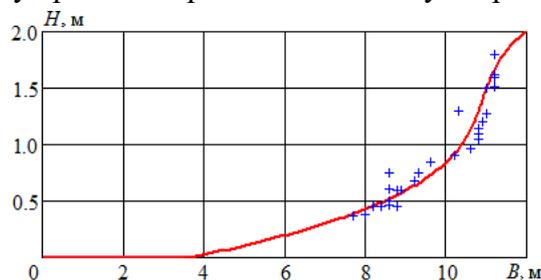
При ширине по урезу воды $B \gg H$ рассматривается возможность принимать $R \approx H$ [4, 7]. Обозначим зависимость ширины водотока в заданном створе от максимальной глубины $B = \varphi(H)$, она связана с площадью поперечного сечения следующим образом:

$$\omega(H) = \int_0^H \varphi(h) dh. \quad (6)$$

Продифференцировав левую и правую части (6) по H с учетом (1), получим

$$\varphi(H) = \omega'(H) = a_1 + 2a_2H + 3a_3H^2 + 4a_4H^3. \quad (7)$$

Для контроля построен рис. 2. Проверим справедливость $R \approx H$ для створа р. Нельма (пост пос. Кострово): вычислим гидравлический радиус $R \equiv f(H) = \omega(H)/\chi(H)$. Полученное значение сопоставим со средней глубиной в исследуемом створе водного объекта: рис. 3 показывает, что разница значительна, поэтому принимать равенство этих двух параметров русла нельзя.



**Рис. 2. Связь между максимальной глубиной (H) и шириной по урезу (B) для р. Нельма (здесь и далее в рисунках – пост).
Здесь и на рис. 3 крестики – данные наблюдений [2], линия – результат расчета по (7)**

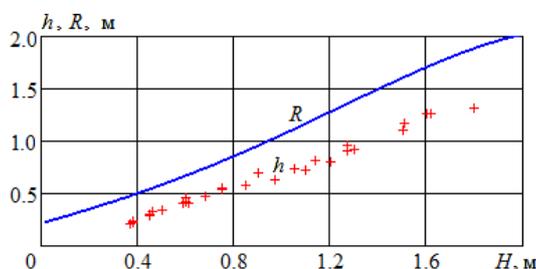


Рис. 3. Сравнение результатов расчета гидравлического радиуса и средней глубины р. Нельма

Прологарифмируем обе части равенства (3) с учетом (4) и (5):

$$\left(2,5\sqrt{n_i} - 0,13 - 0,75\sqrt{R_i}(\sqrt{n_i} - 0,1)\right) \cdot \ln R_i - \ln n_i = \ln v_i - 0,5(\ln R_i + \ln I_i). \quad (8)$$

Решение данного уравнения выполняем относительно величины n_i с использованием измеренных значений из [2]. Значения гидравлического радиуса рассчитываем как $R_i = f(H_i)$. Решаем (8) с помощью автоматизированной программы. В первом приближении ограничимся учетом влияния фактора с большим коэффициентом парной корреляции (табл. 1): Fr для n и Re для I .

С увеличением числа Фруда n уменьшается [4, 5], и при выполнении ряда условий эта зависимость имеет вид экспоненты (4–9):

$$n = n_0 + \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot Fr), \quad Fr = v^2 / (g \cdot h), \quad (9)$$

где n_0 – эмпирический коэффициент, по физическому смыслу – среднее значение коэффициента шероховатости русла в период половодья; v, h – средняя скорость и глубина в рассматриваемом створе водотока; g – ускорение свободного падения.

Коэффициенты парной корреляции

Показатель	<i>Fr</i>	<i>Re</i>
<i>n</i>	-0,772	0,613
<i>I</i>	-0,386	0,752

При вычислении для русла р. Нельма (пост пос. Кострово) значения шероховатости *n* используем формулу (9) с коэффициентами $n_0 = 0,034$; $\alpha = 0,268$; $\beta = 98$ (рис. 4). Индекс детерминации зависимости (9) равен 0,778. Необходимо отметить, что полученное в результате расчетов значение эмпирического коэффициента *n* для р. Нельмы сопоставимо с этим же показателем для малого водотока, расположенного на территории Калининградской области – р. Красной [7].

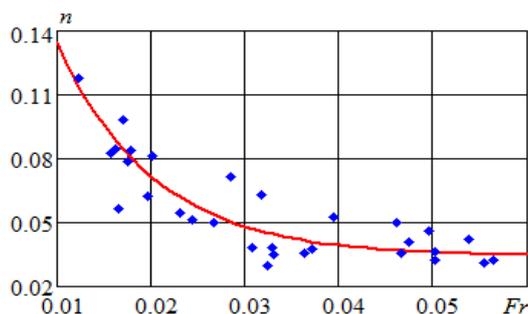


Рис. 4. Зависимость $n = f(Fr)$ для р. Нельма. Точки по [2], линия – расчет по формуле (9)

Уклон водной поверхности *I* определялся по формуле (рис. 5):

$$I = I_0 \cdot (1 - \exp(-\gamma \cdot Re \cdot 10^{-5})), \tag{10}$$

$$Re = v \cdot h/\nu, \tag{11}$$

где I_0 , γ – эмпирические коэффициенты, равные 0,68 и 0,71 соответственно; ν – кинематический коэффициент вязкости; *Re* – число Рейнольдса.

Индекс детерминации зависимости *I* от *Re* по (10) равен 0,756.

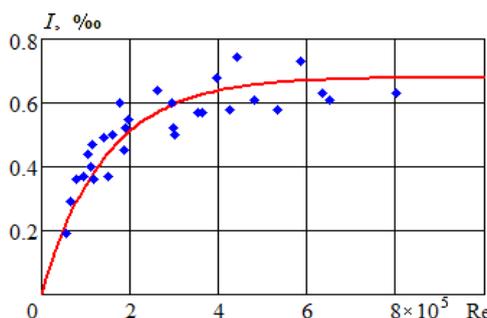


Рис. 5. Зависимость уклона водной поверхности от числа Рейнольдса для р. Нельмы (пост)

В соответствии с требованиями [8, 9] определены максимальные расчетные расходы различной обеспеченности в створе 1 р. Нельмы (рис. 6, табл. 2). По данным геодезической съемки русла исследуемого водотока получена зависимость ширины водотока от максимальной глубины $B = \varphi(H)$, по формулам (2) и (6) – зависимость от *H* смоченного периметра, площади живого сечения, гидравлического радиуса. Принимая для половодья $n = n_0 = 0,034$; $I = I_0 = 0,68$ и считая по (3) уравнение относительно *H*, найдем максимальные расчетные уровни для трех значений расхода (табл. 2). Для сравнения был выполнен расчет максимальных уровней воды в створе 1 при коэффициенте шероховатости $n=0,065$, что соответствует характеристике русла из справочной таблицы, приведенной в [8].

Профиль поперечного сечения русла в створе 1 р. Нельма с указанием максимальных расчетных уровней воды 1% обеспеченности при разных значениях коэффициента шероховатости n в нем представлен на рис. 7.

Таблица 2

Максимальные расчетные расходы и уровни воды в створе 1 р. Нельма

Максимальный расчетный расход ($\text{м}^3/\text{с}$) обеспеченностью P (%)		Максимальная расчетная глубина (м) при шероховатости (n)	
		$n=0,034$	$n=0,065$
$P=1\%$	9,38	0,848	1,163
$P=5\%$	8,78	0,822	1,123
$P=10\%$	8,39	0,807	1,101

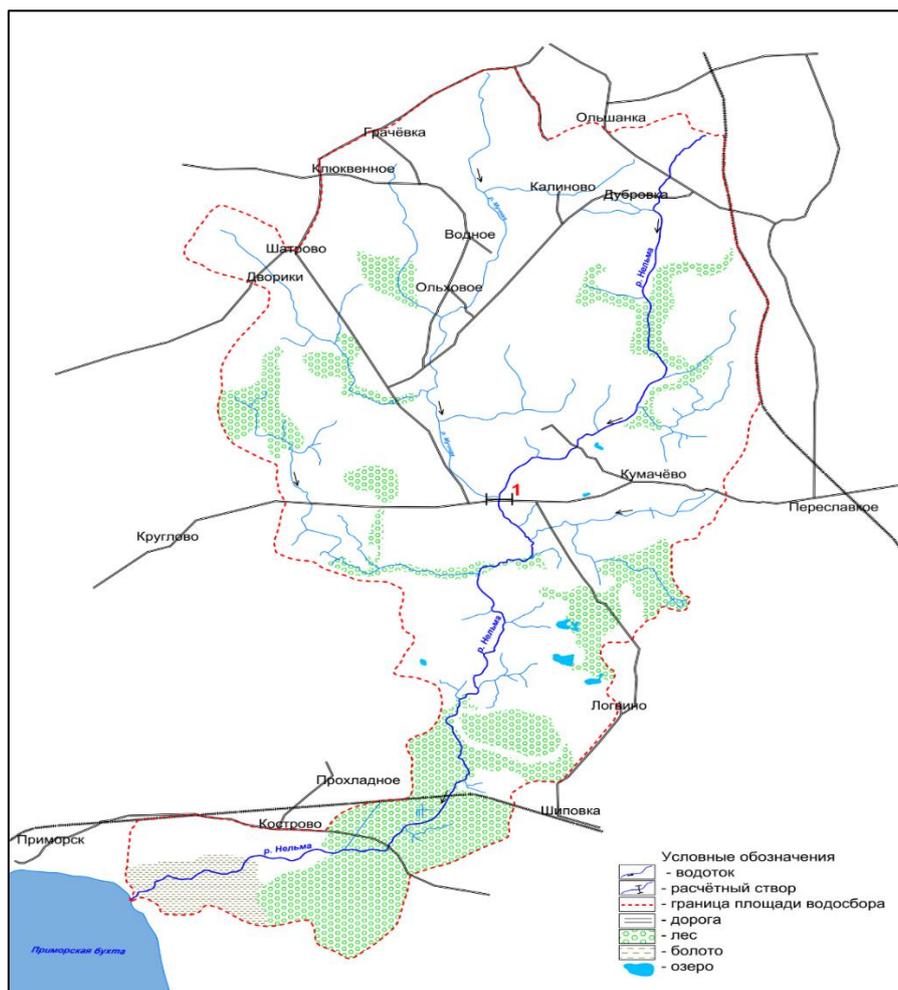


Рис. 6. Ситуационный план расположения расчетного створа

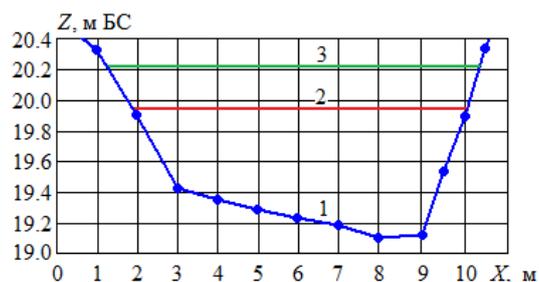


Рис. 7. Максимальные расчетные уровни в створе 1 р. Нельма:
 1 – поперечное сечение; 2 – рассчитанный уровень $P=1\%$ при $n = 0,034$;
 3 – рассчитанный уровень $P=1\%$ при $n = 0,065$

Заключение

Итак, мы установили, что эмпирический коэффициент n_0 для р. Нельма, рассчитанный по данным наблюдений, сопоставим с этим же значением для малого водотока (р. Красная), расположенного также на территории Калининградской области.

По данным наблюдений за уровнями воды на водотоках Калининградской области, нами установлено, что уклон водной поверхности I может заметно изменяться в течение года и в беспойменных руслах он выше в половодье, чем в межень.

Вид полученных нами зависимостей (Fr для n и Re для I) характерен для беспойменного русла. Как мы убедились, индекс детерминации не слишком высок в обоих случаях, поэтому требуется дальнейшее исследование влияния других факторов по большему объему статистического материала.

Использование справочного коэффициента шероховатости n дает завышенные значения максимального уровня воды, поэтому при сопоставимых характеристиках русла определение максимальных расчетных уровней следует проводить с применением эмпирического коэффициента n_0 , который соответствует среднему значению коэффициента шероховатости русла в период половодья.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел // Журнал университета водных коммуникаций. 2010. № 2. С. 90–93.
2. Гидрологический ежегодник 1965 г. Т. 1. Бассейн Балтийского моря / под ред. Д.И. Абрайтене. Л.: Гидрометеиздат, 1967. Вып. 5, 6. 241 с.
3. Калинин А.В. Зависимость коэффициента Шези от числа Фруда // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2019. Т. 5, № 3. С. 38–56.
4. Калинин А.В. Коэффициент шероховатости речных песчаных русел // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. Т. 6, № 2. С. 31–42.
5. Кочкарева А.С., Ахмедова Н.Р. Определение коэффициентов шероховатости при выполнении гидрологических исследований // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2021. Т. 7, № 1. С. 17–22.
6. 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.
7. Наумов В.А. Эмпирическая зависимость коэффициента шероховатости русла реки Красной от чисел Фруда // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. Т. 4, № 3. С. 89–98.
8. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2004.
9. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М., 2013.

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/74-80>

Akhmedova N., Naumov V.

NATALIA R. AKHMEDOVA, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor (corresponding author), isfendi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3483-3580>

VLADIMIR A. NAUMOV, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, van-old@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad, Russia

Influence of the channel roughness factor change on the maximal design levels of a small watercourse in a given river cross (Nelma river example)

Abstract: The watercourse resistance to the flow is usually expressed by a roughness coefficient, and significantly affects on the main hydraulic characteristics of a water object at its flow capacity evaluation. Any small watercourse has own features with sufficiently quick response to changes occurring over the entire catchment area, therefore it requires a separate study. In this article. The authors try to calculate the value of the roughness factor in high water according to observations of the Nelma river. It was found that the reference roughness factor leads to overestimated value of the maximal water level. The roughness factor is decreased with rise of Froude number according to calculations. The obtained results can be used in the development and correction of methods for determining the main design hydrological characteristics of watercourses determined for the safe use of the adjacent territories.

Keywords: watercourse, river, roughness, riverbed, factor, design level, resistance

For citation: Akhmedova N., Naumov V. Influence of the channel roughness factor change on the maximal design levels of a small watercourse in a given river cross (Nelma river example). FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021;(49):74-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/74-80>

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Baryshnikov N., Pagan A. Flow resistance of river channel. *Journal of the University of Water Communications*. 2010;2:90–93.
2. *Hydrological Yearbook 1965. Vol 1. Baltic Sea basin*. Editor D.I. Abraitene. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1967. 241 p.
3. Kalinin A. Dependence of the Shezi coefficient from Froud number. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2019;5(3):38–56.
4. Kalinin A. Roughness coefficient of sand riverbeds. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2020;6(2):31–42
5. Kochkareva A., Akhmedova N. Determination of roughness coefficients when performing hydrological research. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2021;7(1):17-22.
6. Naumov V. Analysis of the variability of the river bed roughness coefficient according to measurements given in hydrological yearbooks. *Bulletin of the Scientific and Methodological Council on environmental management and water use*. 2019;(14):50–55.
7. Naumov V. Empirical dependence of the roughness coefficient of the red river bed from Froude numbers. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2018;4(3):89–98.
8. SP 33-101-2003. Determination of design hydrological performance. Moscow, 2004.
9. SP 47.13330.2012. Engineering survey for construction. Basic principles. Moscow, 2013.