

УДК 556.537

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СКОРОСТИ МАЛОГО ВОДОТОКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

В.А. Наумов

FEATURES OF THE CALCULATION SPEED OF THE SMALL WATERCOURSE ON THE RESULTS OF ENGINEERING SURVEYS

V.A. Naumov

Аннотация. По результатам инженерных изысканий на малой реке Светлой рассчитаны расходы воды и средние скорости. Они зависят от уклона водной поверхности и коэффициента шероховатости русла n . Найденная величина n отличается от обычно принимаемых табличных значений, но не противоречит ранее выдвинутой гипотезе о ее зависимости от числа Фруда. Для определения эмпирических коэффициентов такой зависимости необходимо продолжить исследования во время половодья и дождевых паводков.

Ключевые слова: река Светлая; результаты изысканий; поперечное сечение; средняя скорость; расход воды; коэффициента шероховатости русла.

Abstract. Water consumption and average speeds were calculated based on the results of engineering surveys on the small river Svetlaya. They depend on the slope of the water surface and the coefficient of roughness of the channel n . The found value n differs from the commonly accepted table values, but does not contradict the previously put forward hypothesis about its dependence on the Froude number. In order to determine the empirical coefficients of this dependence, it is necessary to continue studies during high water and rain floods.

Keywords: Svetlaya river; cross section; average speed; water flow; roughness coefficient.

Введение

В соответствии с нормативными документами обработка результатов инженерно-гидрологических изысканий для строительства при отсутствии систематических гидрометрических наблюдений включает расчет расходов воды и средних скоростей [1]. Средние скорости и расходы необходимы при моделировании распространения взвешенных примесей по водотокам [2-4] и при определении нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ [5, 6].

В инженерных приложениях течение водотока полагается равномерным, средняя скорость \bar{V} определяется по формуле Шези:

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

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

По действующим нормативным документам коэффициент Шези при средней глубине водотока до 5 м следует вычислять по формуле Н.Н. Павловского

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

где n – коэффициент шероховатости русла, величину которого нужно выбирать по описательным характеристикам расчетного участка, приведенным в таблицах [7]. В работах [8-10] было показано, что использование табличных значений n может привести к

значительным погрешностям расчета, особенно для малых рек. В [10] был предложен метод определения n по результатам измерений во время изысканий в бассейне малого водотока.

Цель данной статьи – с помощью метода [10] найти коэффициент шероховатости русла малого водотока по результатам измерений, выполненных во время изысканий при незначительных уклонах водной поверхности, и рассчитать среднюю скорость.

Исходные данные

В качестве исходных были использованы результаты измерений на реке Светлой, сделанные летом 2016 года во время полевых исследований в бассейне реки Преголи. Вид участка изысканий показан на рис. 1, схема – на рис. 2.



Рисунок 1 - Вид участка изысканий на реке Светлой

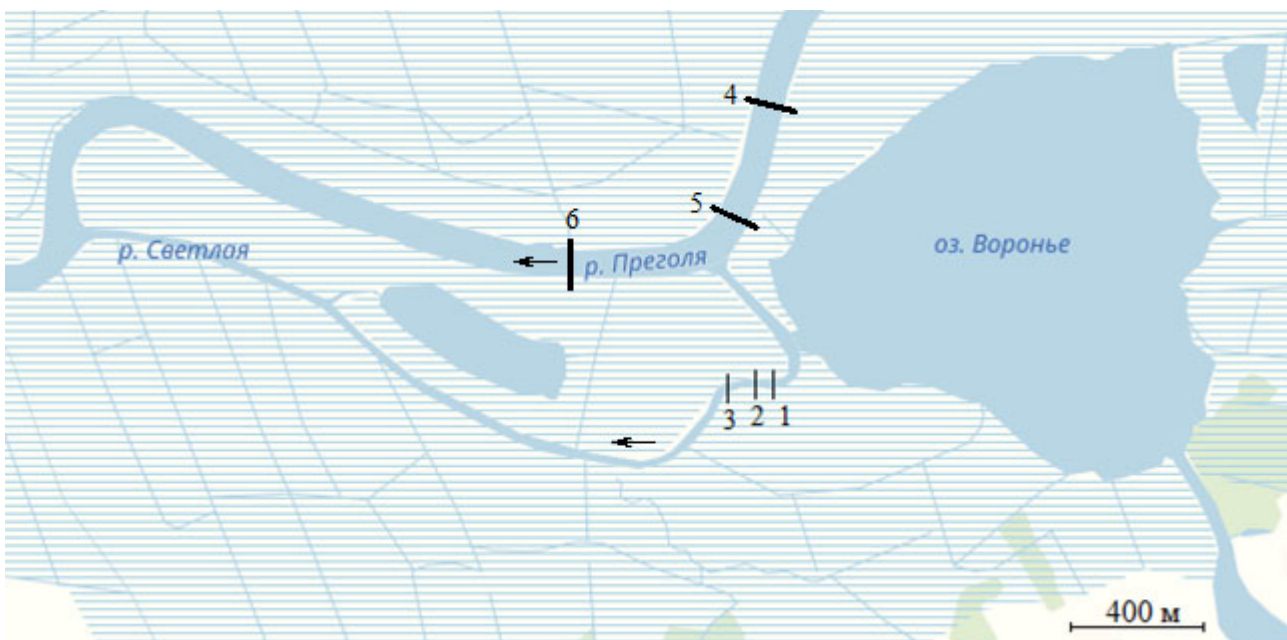


Рисунок 2 – Схема участка изысканий. Номера промерных створов:
1, 2, 3 – река Светлая; 4, 5, 6 – река Преголя

Второй промерный створ был расположен на 50 м ниже первого по течению, и еще на 70 м дальше – створ № 3. На рис. 3-5 представлены поперечные профили русла реки Светлой

в указанных створах. Река Светлая является короткой протокой реки Преголи. В связи с этим уклоны ее водной поверхности I столь же малы, как и у реки Преголи.

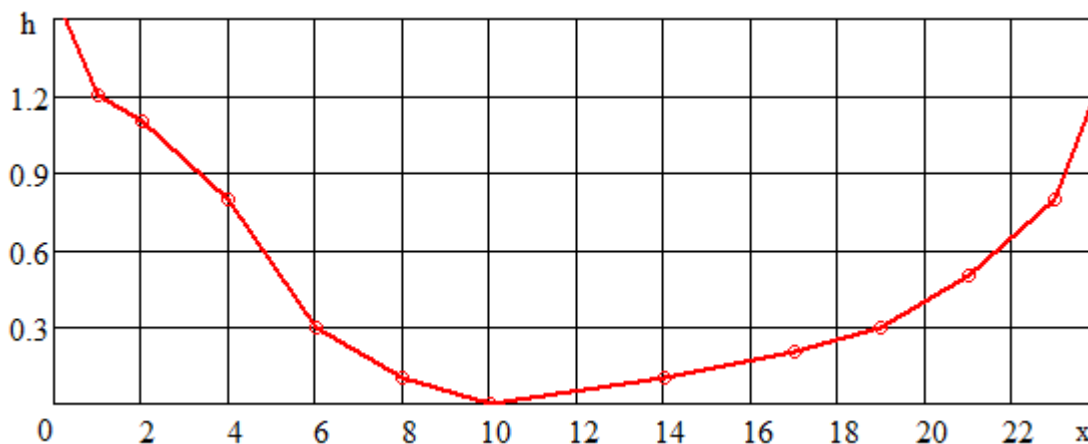


Рисунок 3 – Река Светлая, профиль русла в створе № 1,

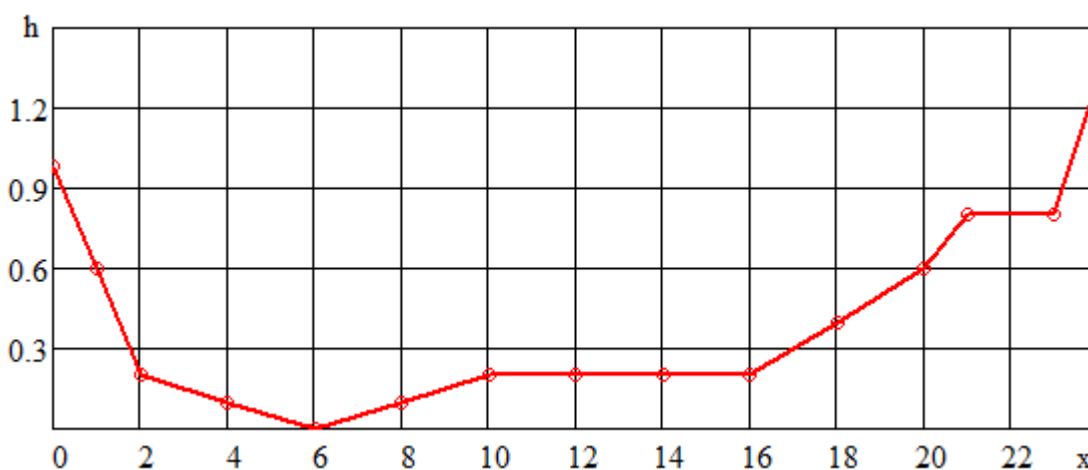


Рисунок 4 – Река Светлая, профиль русла в створе № 2

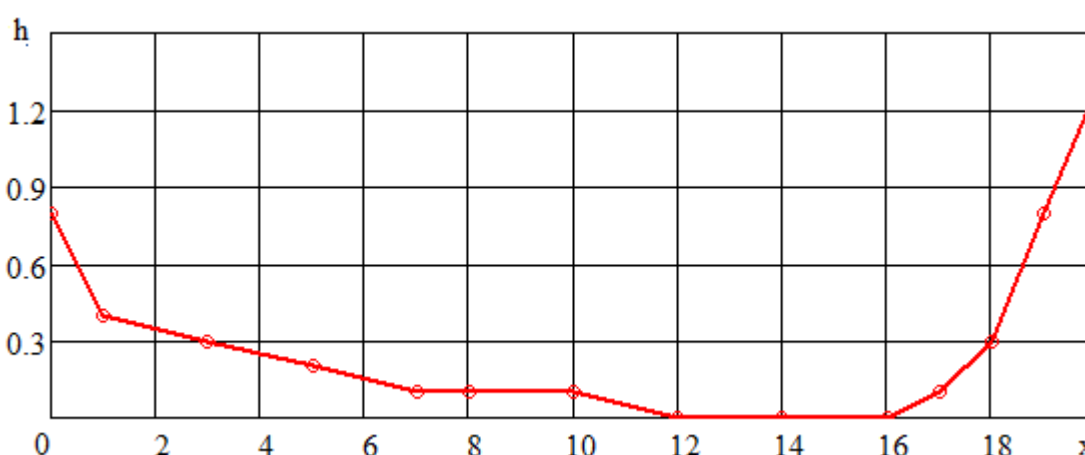


Рисунок 5 – Река Светлая, профиль русла в створе № 3

Измерения локальных скоростей в реке Светлой были выполнены гидрометрической вертушкой на вертикалях при глубинах 20%, 50% и 80 %. Результаты, полученные в створе № 2, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения и расчета скоростей в створе № 2

Расстояние от уреза воды, X , м		0	2	6	10	14	18	24
Глубина, H , м		0,72	1,5	1,7	1,5	1,5	1,3	0,4
Скорость, измеренная на заданной глубине, V , м/с	0,2 H	0	-	0,109	0,118	0,111	-	0
	0,5 H	0	0,097	-	-	-	0,072	0
	0,8 H	0	-	0,085	0,096	0,091	-	0
Расчитанная скорость на вертикали, м/с	Наибольшая	0	0,108	0,113	0,122	0,115	0,080	0
	Средняя	0	0,093	0,098	0,106	0,099	0,069	0

«-» – измерение не проводилось

Площадь живого сечения и смоченный периметр

Площадь живого сечения ω и смоченный периметр χ в створе № 2 найдем по формулам [11] (N – количество промерных интервалов):

$$\omega = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^N (H_i - H_{i-1}) \cdot (X_i - X_{i-1}) = 32,6 \text{ м}^2. \quad (3)$$

$$\chi = H_0 + H_N + \sum_{i=1}^N \sqrt{(H_i - H_{i-1})^2 + (X_i - X_{i-1})^2} = 25,4 \text{ м}. \quad (4)$$

Гидравлический радиус в створе № 2 во время выполнения промеров: $R = \omega / \chi = 1,28 \text{ м}$.

Расчет среднего расхода и скорости

Зависимость локальной скорости V от глубины может быть определена с помощью известной формулы [11]

$$V = V_m \cdot \eta^{1/m}, \quad (5)$$

где V_m – скорость на поверхности водотока; η – относительная глубина, отсчитываемая от дна; m – эмпирический показатель степени.

Методом наименьших квадратов был подобран показатель степени $m = 6,4$. Заметим, что Г.В. Железняков [11] рекомендует при развитом турбулентном движении потока принимать близкое значение $m = 6$. Тогда формула (3) позволяет рассчитать скорости на поверхности водотока и средние на вертикали по результатам измерений (см. табл. 1).

Расход воды в створе № 2:

$$Q = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^N (V_i + V_{i-1}) \cdot \omega_i = 2,63 \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6)$$

Средняя скорость, рассчитанная по расходу $\bar{V} = Q / \omega = 0,081 \text{ м} / \text{с}$.

Влияние уклона и коэффициента шероховатости русла

Зависимость средней скорости от уклона водной поверхности (%) и коэффициента шероховатости русла может быть записана следующим образом:

$$\bar{V}(n, I) = C(n) \cdot \sqrt{R \cdot I \cdot 10^{-3}}, \quad (7)$$

Полагая гидравлический радиус в створе № 2 известным (1,28 м), построим графики для средней скорости и расхода (рис. 6 и 7).

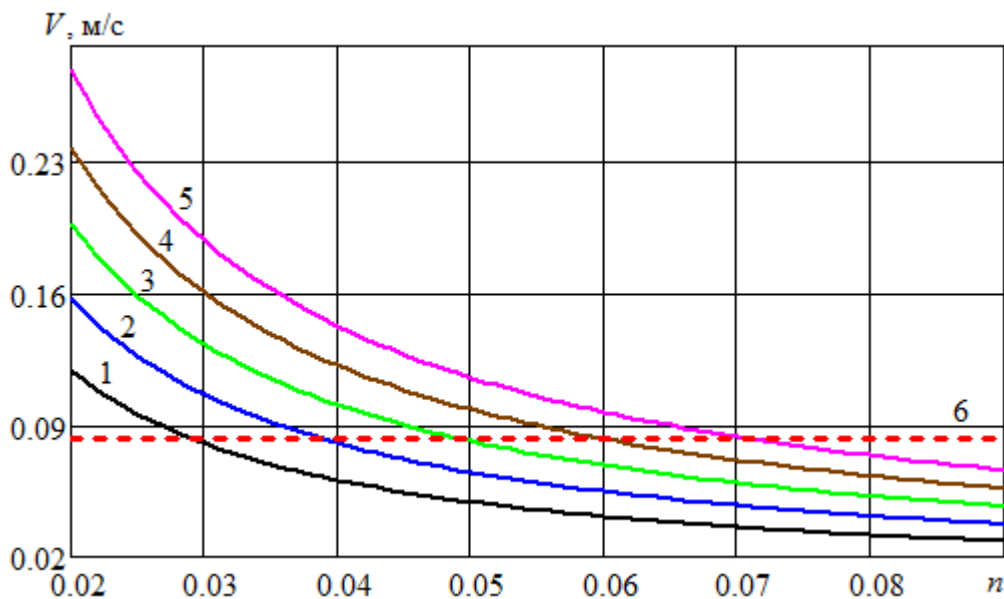


Рисунок 6 – Рассчитанные средние скорости при различных уклонах в створе № 2.
1 – $I = 0,004\%$; 2 – $0,007\%$; 3 – $0,011\%$; 4 – $0,016\%$; 5 – $I = 0,022\%$; 6 – $\bar{V} = 0,081 \text{ м/с}$

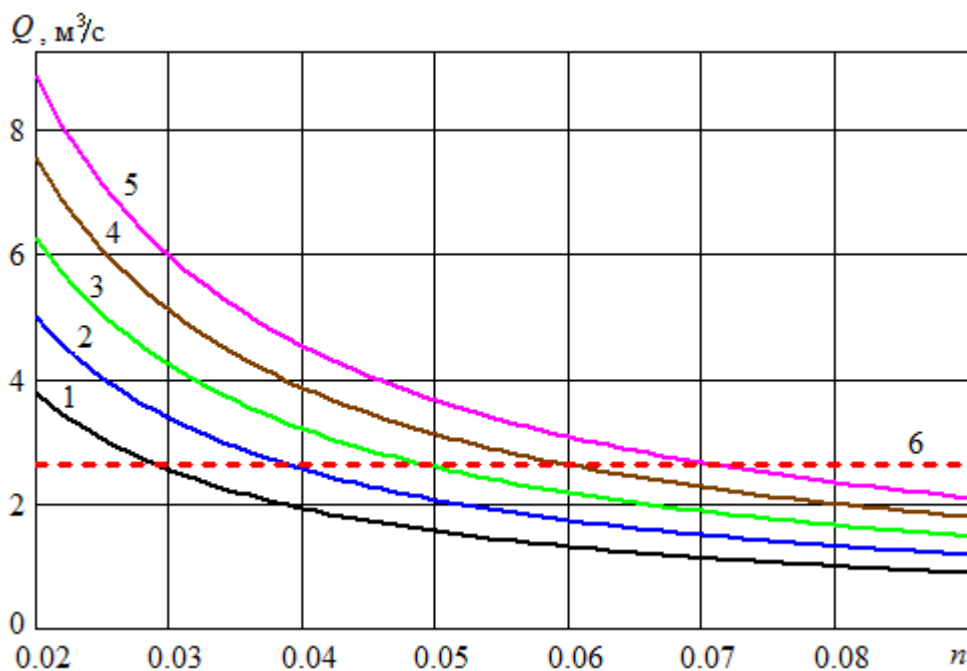


Рисунок 7 – Рассчитанные расходы воды в створе № 2.
Обозначения, как на рис. 5

Во время полевых исследований на участке изысканий был найден средний уклон водной поверхности $I = 0,011 \%$. На рис. 6 при указанном значении I построена линия 3, которая пересекает штриховую прямую $\bar{V} = 0,081 \text{ м/с}$ в точке $n = 0,05$. Такая же величина n получается и по рис. 7, но она отличается от значений, приведенных в таблице [7].

Полевые исследования проводились в летнюю межень. В работах [12, 13] показано, что коэффициент шероховатости русла в одном и том же створе малого водотока изменяется: наименьшее значение наблюдается во время половодья, а в межень – заметно увеличивается. Так в [13] было установлено, что на малой реке Красной с увеличением числа Фруда (Fr)

$n \rightarrow n_0 = 0,034$. В межень коэффициент шероховатости русла реки Красной возрастает до 0,064.

Число Фруда в исследованном створе реки Светлой мало:

$$Fr = \frac{\bar{V}^2}{g \cdot R} = \frac{0,081^2}{9,8 \cdot 1,28} = 5,2 \cdot 10^{-4}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения.

Следует ожидать, что с увеличением числа Фруда коэффициент шероховатости русла реки Светлой будет уменьшаться. Но для расчета эмпирических коэффициентов зависимости (9), предложенной в [13], необходимо продолжить исследования во время половодья и дождевых паводков.

$$n = n_0 + \alpha_1 \cdot \exp(-\beta_1 \cdot Fr), \quad (9)$$

Заключение

По результатам полевых исследований во время инженерных изысканий на малой реке Светлой рассчитаны значения расхода воды и средней скорости. Показано, как на них влияет изменение коэффициента шероховатости русла n . Найденная величина n отличается от обычно принимаемого, табличного значения, но не противоречит ранее выдвинутой гипотезе о ее зависимости от числа Фруда. Для определения эмпирических коэффициентов такой зависимости необходимо продолжить исследования во время половодья и дождевых паводков.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания НИОКР 2018 года по теме: «Разработка базы данных, алгоритма и методики расчета гидрологических характеристик малых рек рыбохозяйственного значения при отсутствии систематических наблюдений».

ЛИТЕРАТУРА

1. Свод правил СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Утвержден приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству от 10 декабря 2012 г., № 83/ГС.
2. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Великанова М.Н. Расчет распространения загрязнения в р. Товарная // Вода: химия и экология. 2011. № 8. С. 89-94.
3. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Моделирование распространения взвешенных органических примесей в водотоках // Вода: химия и экология. 2017. № 3. С. 3-8.
4. Наумов В.А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водотоке // Известия КГТУ, 2017. № 44. С. 46-58.
5. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. Утверждена приказом Минприроды России от 17.12.2007 № 333.
6. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Маркова Л.В., Смирнова Л.В. Результаты натурных исследований малых водотоков на мелиорированных землях региона // Вода: химия, экология. 2013. № 7. С. 18-26.
7. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России № 218 от 26 декабря 2003 г.
8. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел: учебное пособие. СПб: Изд-во РГГМУ, 2003. 147 с.

9. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел // Журнал университета водных коммуникаций. 2010. № 2. С. 90-93.
10. Наумов В.А., Сулейманов С.Н. Определение шероховатости русла при расчете нормативов допустимых сбросов веществ в малые водотоки // Известия КГТУ. 2018. № 48. С. 29-38.
11. Железняков Г.В. Пропускная способность русел, каналов и рек. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 311 с.
12. Наумов В.А. Коэффициент шероховатости русла реки Писсы // Вестник науки и образования Северо-Запада России: электронный журнал. 2017. Т. 3, № 3. С. 1-7. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2017/09/2017-N3-Naumov.pdf>.
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. С. 89-98. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Naumov.pdf>.

REFERENCES

1. *Svod pravil SP 47.13330.2012. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva* [Set of rules SP 47.13330.2012. Engineering surveys for construction]. Utverzhen prikazom Federal'nogo agentstva po stroitel'stvu i zhilishchno-kommunal'nomu hozyajstvu, 10.12.2012, No. 83/GS.
2. Velikanov N.L., Naumov V.A., Velikanova M.N. *Raschet rasprostraneniya zagryazneniya v r. Tovarnaja* [Calculation of distribution of pollution in Commodity R.] *Voda: himiya i jekologiya*. 2011. No 8, pp. 89-94.
3. 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.
4. 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.
5. *Metodika razrabotki normativov dopustimyh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnye ob'ekty dlya vodopol'zovatelej* [Methods of development of standards of permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users] Utverzhdena prikazom Minprirody Rossii, 17.12.2007, No. 333.
6. Velikanov N.L., Naumov V.A., Markova L.V., Smirnova L.V. *Rezul'taty naturnykh issledovaniy malyh vodotokov na meliorirovannykh zemljah regiona* [Results of field studies of small waterways on reclaimed land in the region] *Voda: himiya, jekologiya*. 2013. No 7, pp. 18-26.
7. *Svod pravil SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik* [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.
8. Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnyh rusel: uchebnoe posobie* [Hydraulic resistance of river channels: a tutorial] Sankt-Peterburg: RGGMU Publ., 2003. 147 p.
9. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. *Gidravlichesкое soprotivlenie rechnyh rusel* [Hydraulic resistance of river channels]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij* 2010. No 2, pp. 90-93.
10. Naumov V.A., Sulejmanov S.N. *Opredelenie sherohovatosti rusla pri raschete normativov dopustimyh sbrosov veshchestv v malye vodotoki* [Determination of the roughness of the channel in the calculation of standards for permissible discharges of substances in small streams] *Izvestiya KGTU*. 2018. No. 48, pp. 29-38.



11. Zheleznyakov G.V. *Propusknaya sposobnost' rusel, kanalov i rek* [Capacity of channels, channels and rivers] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 311 p.
12. Naumov V.A. *Koefficient sherohovatosti rusla reki Pissy* [Roughness coefficient of the Pissa river bed]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii: jelektronnyj zhurnal*. 2017. V. 3, No 3, pp. 1-7. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2017/09/2017-N3-Naumov.pdf>.
13. Naumov V.A. *Empiricheskaya zavisimost' koehfficienta sherohovatosti rusla reki Krasnoj ot chisel Fruda* [Empirical dependence of the coefficient of roughness of the channel of the red river from the Froude numbers]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii: ehlektronnyj zhurnal*. 2018. V. 4, No. 3, pp. 89-98. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Naumov.pdf>.

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