



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2018.1.7>

УДК 532.5

ББК 22.253

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ В МЕАНДРИРОВАННЫХ РУСЛАХ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹

Татьяна Андреевна Дьяконова

Старший преподаватель кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
dyakonova@volsu.ru, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Предложен способ расчета эффективного коэффициента Маннинга, который позволяет оценить сопротивление потоку жидкости в меандрированных речных руслах. Мы основываемся на численных нестационарных моделях динамики мелкой воды в неоднородном русле. Показано уменьшение средней скорости движения жидкости в меандрированном русле по сравнению с прямолинейным каналом. На основе построенной зависимости средней скорости в сечении русла от основного значения коэффициента Маннинга по Н.Б. Барышникову определен вклад в сопротивление потоку от меандрирования русла.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, модель Шези, меандрированное русло, численная модель, коэффициент шероховатости.

Введение

Динамика русловых течений существенно зависит от морфологии канала [1]. В гидродинамическом моделировании крупномасштабные характеристики рельефа учитываются в явном виде [2]. Для оценок пропускной способности русел в гидрологии часто используется модель Шези, в которой коэффициент сопротивления может определяться уравнением Маннинга [3]. Эта формула связывает скорость потока с поперечным сечением канала, учитывая свойства подстилающей поверхности. При данном подходе принято считать, что влияние параметров русла определяется коэффициентом шероховатости. Для расчета коэффициента Маннинга существует большое количество формул, справедливых для частных случаев, их вывод основан на натуральных наблюдениях и лабораторных экспериментах [11; 12].

Особый интерес для исследования представляет влияние извилистости русла на коэффициент Маннинга [7; 10]. В реальных условиях выбрать значения величины очень сложно. В данной работе представлен метод оценки шероховатости меандрированного русла, основанный на численном гидродинамическом моделировании.

Численная модель

В основе численной модели лежит система уравнений Сен-Венана, которая описывает динамику русловых течений в приближении теории мелкой воды и учитывает влияние рельефа, внешних и внутренних сил, а также работу источников [4; 6]. Для интегрирования системы уравнений используется CSPH-TVD метод [5] и подход распараллеливания на основе CUDA-технологии [9].

Рассчитать скорость руслового потока можно при помощи формулы Шези [3]

$$V_{av} = C (IR)^{1/2}, \quad (1)$$

где V – средняя скорость потока; C – коэффициент Шези; I – гидравлический уклон; R – гидравлический радиус. Для определения коэффициента C существуют различные формулы. Наиболее часто используют формулу Маннинга

$$C = R^{1/6}/n, \quad (2)$$

где n – коэффициент шероховатости по Маннингу [$c/m^{1/3}$], который является составной величиной и учитывает свойства подстилающей поверхности дна. Обозначим n_0 – основное значение коэффициента шероховатости в прямолинейном русле; n_m – эффективный коэффициент Маннинга в меандрированном канале. В численной модели параметр n используется при расчете силы придонного трения.

В качестве модели прямолинейного русла зададим функцию

$$b_0(x, y) = -b_{\max} \exp(y^2/L^2) - Ix \quad (3)$$

с базовым набором параметров $b_{\max} = 5$ м; $L = 500$ м и уклоном $I = 0,07$ м/км. Для меандрированного русла профиль дна зададим в виде

$$b(x, y) = -b_{\max} (\exp((y - y_{\max} \sin(kx))^2/L^2)) - Ix, \quad (4)$$

где k определяет пространственный масштаб меандрирования; y_{\max} – амплитуда меандра. Выберем значения $k = 2\pi/3 500$ (1/м); $y_{\max} = 1 200$ м, 2 400 м. При указанных параметрах отношения длин меандрированного русла к прямолинейному равно 1,75 и 2,95 соответственно. На входе расположим источник воды с суммарным расходом $Q = 1 500$ м³/с, время расчета $t = 3$ сут.

Результаты расчетов

Для оценки влияния извилистости русла на параметр n проведем расчеты на меандрированных руслах с $n_0 = 0$, а для прямолинейного канала величину n_0 будем варьировать. На рисунке 1 приведена структура стационарного потока на гладком прямолинейном рельефе для участка $5 000$ м $\leq x \leq 18 000$ м.

Распределение глубины и скорости для меандрированного русла с $y_{\max} = 1 200$ м изображено на рисунке 2. В этом случае мы можем наблюдать неустойчивость потока при малых значениях n . Этот эффект возникает и в прямолинейном канале [8].

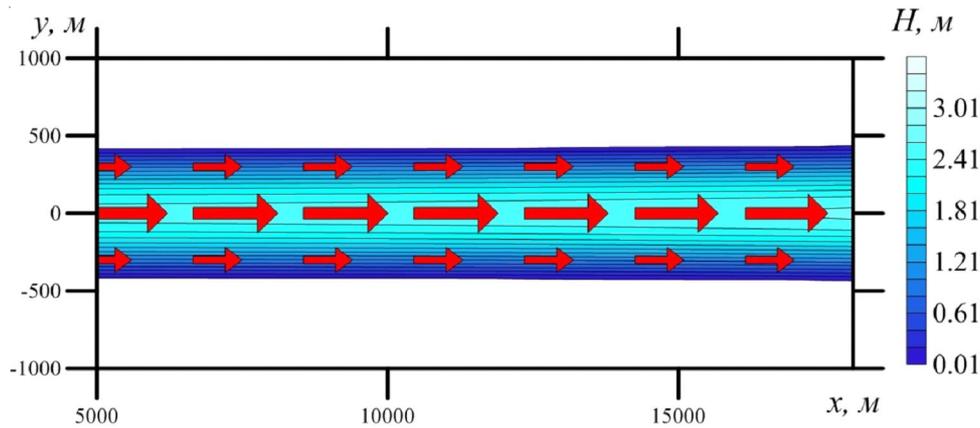


Рис. 1. Распределения глубины и поля скоростей потока в прямолинейном русле при $n_0 = 0,02$

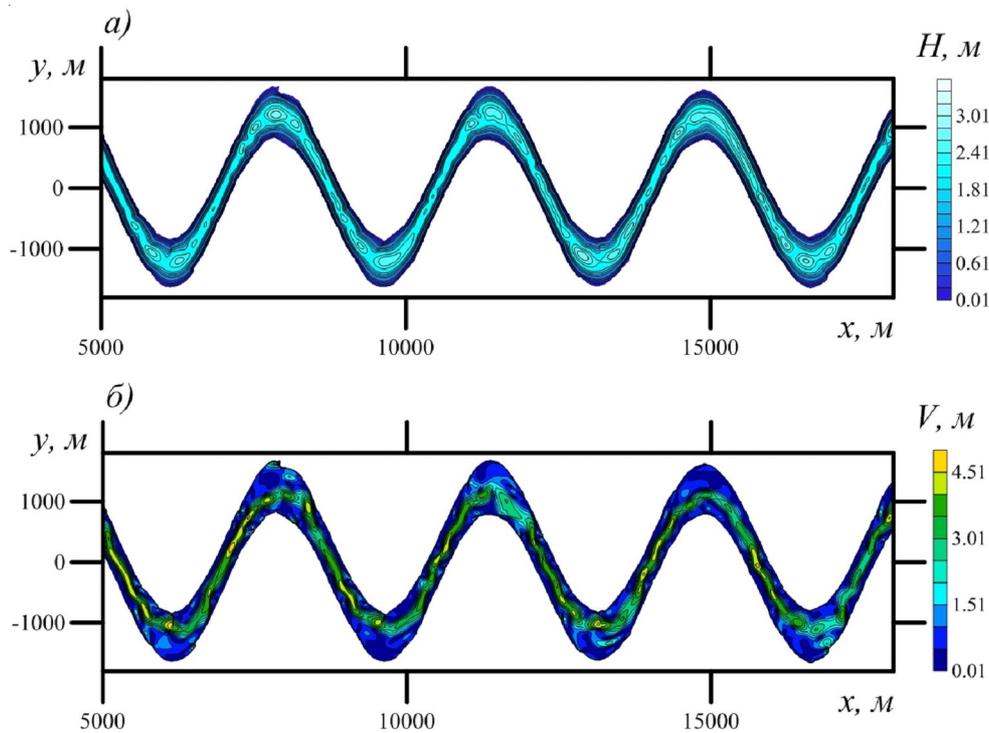


Рис. 2: а – распределение глубины меандрированного участка; б – распределение модуля скорости

Определим среднюю скорость потока в сечении канала через интегральный расход воды Q

$$\langle V \rangle = Q/S, \quad (5)$$

где S – площадь сечения.

На основе серии расчетов, проведенных на рельефе $b_0(x, y)$ со значениями $n_0 = 0,01 \div 0,05$, получим зависимость $\langle V \rangle$ от n_0 (см. рис. 3). По построенной аппроксимации можно определить значение n_m . Для меандрированного канала с амплитудой $y_{\max} = 1\,200$ м имеем $n_m = 0,0175$ (см. рис. 3, точка А), в случае $y_{\max} = 2\,400$ м коэффициент $n_m = 0,048$ (см. рис. 3, точка В). Как видим, при увеличении амплитуды меандра в два раза значение эффективного коэффициента Маннинга увеличивается в 2,7 раза и зависимость не является степенной.

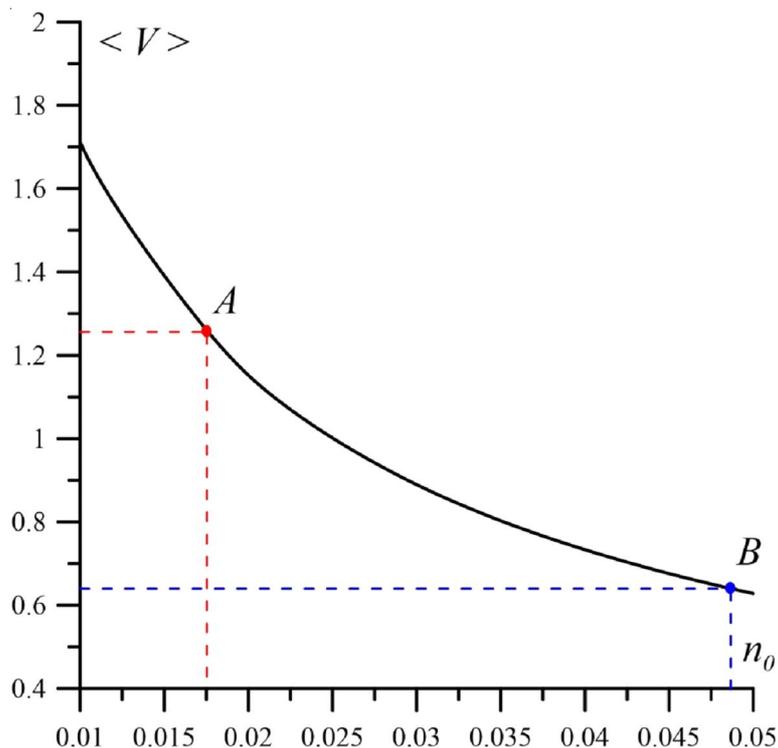


Рис. 3. Результат аппроксимирующей зависимости средней скорости в сечении русла $\langle V \rangle$ (м/с) от коэффициента Маннинга в прямолинейном канале

Заключение

Для определения вклада в сопротивление потоку от меандрированного русла в работе предложен метод определения эффективного коэффициента Маннинга n_m . Наш подход основан на сравнении результатов численного гидродинамического моделирования в меандрированном и прямом руслах. С усилением степени извилистости русла имеем уменьшение средней скорости движения жидкости в сечении канала. Варьируя основное значение коэффициента Маннинга n_0 в прямом канале на основе численных гидродинамических моделей, мы оценили вклад в сопротивление потоку от меандрирования русла.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и образования РФ (проект № 2.852.2017/4.6) и частично при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научных проектов № 16-07-01037, а также «Пакета социальной поддержки на 2017 год молодых ученых ВолГУ». Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидравлические сопротивления и скоростные поля потоков в руслах сложных форм сечения / Н. Б. Барышников, М. С. Дрегваль, Д. И. Исаев, И. С. Гаврилов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 46. – С. 10–20.
2. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности / А. А. Воронин, М. В. Елисеева, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012. – № 3. – С. 54–62.

3. Коэффициенты шероховатости пойм / Н. Б. Барышников, Е. С. Субботина, Е. М. Скоморохова, Е. А. Поташко // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2012. – № 23. – С. 13–20.
4. Математическая модель динамики поверхностных вод / Т. А. Дьяконова, А. В. Писарев, А. В. Хоперсков, С. С. Храпов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2014. – № 1. – С. 35–44.
5. Писарев, А. В. Численная схема на основе комбинированного подхода SPH-TVD: проблема моделирования сдвиговых течений / А. В. Писарев, С. С. Храпов, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2011. – № 2. – С. 138–141.
6. Agafonnikova, E. O. Computer simulation of the Volga river hydrological regime: problem of water-retaining dam optimal location / E. O. Agafonnikova, A. Yu. Klikunova, A. V. Khoperskov // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. – 2017. – Vol. 10, № 3. – P. 148–155.
7. Dash, S. S. Sinuosity dependency on stage discharge in meandering channels / S. S. Dash, K. K. Khatua // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2016. – Vol. 142, № 9. – P. 04016030.
8. Dyakonova, T. Bottom friction models for shallow water equations: Manning's roughness coefficient and small-scale bottom heterogeneity / T. Dyakonova, A. Khoperskov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 973, № 012032. – P. 1–10.
9. Dyakonova, T. Numerical model of shallow water: the use of NVIDIA CUDA graphics processors / T. Dyakonova, A. Khoperskov, S. Khrapov // Russian Supercomputing Days. – Springer, Cham, 2016. – P. 132–145.
10. Groot, S. The Regge River: from canalized to meandering / S. Groot, B. de Graaff, C. Oosterhoff, J. Medenblik // Notes. – 2008. – P. 1983–1990.
11. Habibi, M. An experimental investigation to calculate flow resistance in a steep river / M. Habibi, M. R. Namaee, M. Saneie // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2014. – Vol. 18, № 4. – P. 1176–1184.
12. Lee, J. S. Composite flow resistance / J. S. Lee, P. Y. Julien // Journal of flood engineering. – 2017. – Vol. 8 (2). – P. 55–75.

REFERENCES

1. Baryshnikov N.B., Dregval M.S., Isaev D.I., Gavrilov I.S. Gidravlicheskie soprotivleniya i skorostnye polya potokov v ruslakh slozhnykh form secheniya [Hydraulic Resistances and Velocity Fields of Flows in Riverbeds with Complicated Cross-Sections]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2017, no. 46, pp. 10-20.
2. Voronin A.A., Eliseeva M.V., Pisarev A.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Imitatsionnye modeli dinamiki poverkhnostnykh vod s ispolzovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya: vliyanie relyefa mestnosti [Simulation Models of Surface Water Dynamics Using Remote Sensing Data]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 54-62.
3. Baryshnikov N.B., Subbotina E.S., Skomorohova E.M., Potashko E.A. Koeffitsienty sherokhovatosti пойм [Roughness Coefficients of Floodplains]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2012, no. 23, pp. 13-20.
4. Dyakonova T.A., Pisarev A.V., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Matematicheskaya model dinamiki poverkhnostnykh vod [The Mathematical Model of Surface Water Dynamics]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2014, no. 1, pp. 35-44.
5. Pisarev A.V., Khrapov S.S., Khoperskov A.V. Chislennaya skhema na osnove kombinirovannogo podkhoda SPH-TVD: problema modelirovaniya sdvigovykh techeniy [The Numerical Scheme Based on a Combined SPH-TVD Approach: Simulation of Shear Flows]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2011, no. 2, pp. 138-141.
6. Agafonnikova E.O., Klikunova A.Yu., Khoperskov A.V. Computer simulation of the Volga river hydrological regime: problem of water-retaining dam optimal location. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 148-155.
7. Dash S.S., Khatua K.K. Sinuosity dependency on stage discharge in meandering channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2016, vol. 142, no. 9, pp. 04016030.
8. 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, vol. 973, no. 012032, pp. 1-10.

9. Dyakonova T., Khoperskov A., Khrapov S. Numerical model of shallow water: the use of NVIDIA CUDA graphics processors. *Russian Supercomputing Days*. Springer, Cham, 2016, pp. 132-145.
10. Groot S., de Graaff B., Oosterhoff C., Medenblik J. The Regge River: from canalized to meandering. *Notes*, 2008, pp. 1983-1990.
11. Habibi M., Namaee M.R., Saneie M. An experimental investigation to calculate flow resistance in a steep river. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 1176-1184.
12. Lee J.S., Julien P.Y. Composite flow resistance. *Journal of flood engineering*, 2017, vol. 8 (2), pp. 55-75.

THE METHOD OF ESTIMATION OF THE EFFECTIVE ROUGHNESS COEFFICIENT IN THE MEANDERING CHANNELS BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Tatyana Andreevna Dyakonova

Senior Lecturer, Department of Information Systems and Computer Simulation,
Volgograd State University
dyakonova@volsu.ru, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. We propose the method for calculating the Manning effective coefficient that allows estimating the resistance to water flows in meandering river channels. The method is based on the numerical non-stationary models of the dynamics of shallow water in the irregular channel. We show the decrease in the average velocity of the fluid in the meandering channel in comparison with the straight-channel. On the basis of the N.B. Baryshnikov's constructed dependence of the average velocity in the channel cross-section from the main value of the Manning coefficient, we determine the contribution to the flow resistance from meandering of the channel. The numerical model utilizes the Saint-Venant equations, which describe the dynamics of flows in the theory of shallow water and considers the irregular of the relief, external and internal forces, and the work of sources. For integrating the system of equations, we use the CSPH-TVD method and parallel technologies CUDA.

With an increase in the degree of sinuosity of the channel, we have a decrease in the average velocity of the fluid in the section of the channel. Varying the main value of the Manning coefficient n_0 in the straight-channel, we estimated the contribution to the flow resistance from the meandering of the channel and obtained the values of the effective Manning coefficient of the channel for various sets of parameters.

Key words: hydrodynamic simulation, Chezy model, meandering channel, numerical model, roughness coefficient.