УДК 532.5

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЛАДКИХ ОТКРЫТЫХ КАНАЛОВ

Г.В. Волгин

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Аннотация. Одной из основных задач инженера при проектировании гидравлических сооружений является точный расчет потерь при движении потока жидкости, будь то напорный трубопровод или открытый канал. Современные технологии дают возможность получать строительные материалы, которые позволяют уменьшить сопротивление при движении жидкости. Таким образом происходит смещение режима движения жидкости из гидравлически шероховатого в область гидравлически гладкого сопротивления. В связи с этим возникает необходимость в совершенствовании методов расчета для коэффициента гидравлического сопротивления. В статье проведен анализ существующих методов расчета коэффициента гидравлического сопротивления. Обоснованы причины поиска современных методов расчета коэффициента гидравлического сопротивления. Получен массив данных на современном оборудовании, отвечающий поставленной задаче. Приведен анализ результатов экспериментов, показывающих влияние чисел Рейнольдса и Фруда, а также отношения ширины канала к глубине потока на коэффициент гидравлического сопротивления. Предложен уточненный метод расчета коэффициента гидравлического сопротивления гладких открытых каналов.

Ключевые слова: турбулентность, турбулентные потоки, открытый поток, коэффициент гидравлического сопротивления, гидравлически гладкие открытые каналы, степень бурности, число Фруда

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.94-98

REFINEMENT OF METHODS OF CALCULATION OF HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT FOR SMOOTH OPEN CHANNELS

G.V. Volgin

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract. One of the main tasks of an engineer in design of hydraulic structures is to perform an accurate calculation of losses in a moving flow of liquid, whether that be a head conduit or open channel. Modern technologies make it possible to obtain construction materials enabling to reduce resistance in motion of liquid. Thus, the shifting of motion mode from hydraulically rough into the sphere of hydraulically smooth resistance takes place. In this regard, there is a need for improvement of methods for hydraulic resistance coefficient calculation. The analysis of existing methods for calculating the hydraulic resistance coefficient was performed. Reasons for necessity of the search of modern methods for calculation of this parameter were grounded. The data array that meets the requirements of the task was received using the modern equipment. The analysis of experimental results illustrating the influence of Reynolds number and Froude number, and of ratio of the channel width to the flow depth on the hydraulic resistance coefficient was performed. The revised method of calculating the coefficient of hydraulic resistance of smooth open channels is proposed.

Key words: turbulence, turbulent flows, open flow, hydraulic resistance coefficient, hydraulically smooth open channels, degree of boisterousness, the Froude number

Основной целью расчета потерь напора на трение по длине потока при турбулентном движении жидкости является расчет коэффициента гидравлического сопротивления λ [1–8]. При этом дол-

жен учитываться ряд существенных деталей, таких как напорное или безнапорное движение, наличие гладких или шероховатых областей сопротивления. Большинство исследований посвящено изучению

поведения λ в напорных системах как в гладкой, так и в шероховатой областях сопротивления. В настоящее время для расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ широко используются формулы (1)–(3), которые были получены эмпирическим путем. Эти формулы дают погрешность в расчете λ при безнапорном движении потока и имеют ряд ограничений. Так формула П. Блазиуса (1) была выведена для напорного движения в круглых трубах. Она имеет ряд ограничений: применима для области гидравлически гладкого режима сопротивления и работает при числах Рейнольдса до 100 000:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления; Re — число Рейнольдса (2).

Число Рейнольдса Re является критерием турбулентности потока [9, 10]:

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{U4h}{\nu}, \quad (2)$$

где U — средняя скорость потока; D — диаметр; h — глубина потока; ν — кинематическая вязкость.

Более фундаментальные исследования в изучении коэффициента гидравлического сопротивления были проведены И.И. Никурадзе. Так же, как и П. Блазиус, он исследовал напорное движение в круглых трубах. В результате анализа опытных данных И.И. Никурадзе установил [11], что шероховатые трубы могут рассчитываться как гладкие, а коэффициент гидравлического сопротивления зависит от числа Рейнольдса. Так была получена зависимость (3) для расчета λ в области гидравлически гладких труб:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}. \quad (3)$$

А.Д. Альтшуль получил универсальную формулу для расчета коэффициента гидравлического сопротивления как функцию, зависящую от числа Рейнольдса и относительной шероховатости (4). Эта универсальная формула применима для гладких и шероховатых труб [2, 3]:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (4)$$

Французским инженером-гидравликом А. Шези в 1769 г. была опубликована формула для определения средней скорости потока при установившемся равномерном турбулентном движении жидкости в области квадратичного сопротивления:

$$U = C\sqrt{Ri}. \quad (5)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления связан с коэффициентом Шези следующей зависимостью [12–14]:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}. \quad (6)$$

Таким образом, получаем зависимость (7) связывающую коэффициент гидравлического сопротивления и гидравлические характеристики открытого потока (скорость U , гидравлический уклон i и гидравлический радиус R):

$$\lambda = \frac{8gRi}{U^2}. \quad (7)$$

Связь потерь энергии в трубах и каналах (при равномерном движении) на основе экспериментальных исследований как отечественных, так и зарубежных исследователей была установлена А.П. Зегжда в 1957 г. [15]. В его работах отмечается, что для турбулентной области при равномерном движении в гладком русле опыты дают «хорошее совпадение с зависимостью для напорного движения в гладких трубах, т.е. хорошо согласуются с кривой, отражающей формулу Никурадзе». Другими словами, на основе хорошей сходимости экспериментальных данных было доказано, что расчетные формулы (1) и (2) применимы для расчетов как напорных, так и для безнапорных потоков в гидравлически гладкой области сопротивления.

При безнапорном движении появляется еще один фактор, влияющий на поток: степень бурности. В открытом потоке степень бурности принято связывать с числом Фруда [1–8]. Таким образом, различают два принципиально разных вида движения: спокойный и бурный поток. Степень бурности определяется при сравнении числа Фруда (Fr) для рассматриваемого потока с критическим числом Фруда. Явление перехода из бурного потока в спокойный принято оценивать с помощью анализа числа Фруда: так при $Fr < F_{кр}$ — поток спокойный, при $Fr > F_{кр}$ — поток бурный.

Число Фруда согласно определению представляет собой безразмерный комплекс:

$$Fr = \frac{U^2}{gh} = \text{---}. \quad (8)$$

Критерий бурности потока (8), в свою очередь, связан с энергетическим минимумом [7], зависящим от глубины и скорости потока при заданном расходе. При напорном движении жидкость в трубе может регулировать свое течение лишь скоростью, плотностью и давлением, а понятия ламинарного и турбулентного потоков более прозрачно. Ламинарный и турбулентный потоки отличаются друг от друга визуально или по наличию перемешивания (перемещению масс по вертикали) или по присутствию в потоке вихревых образований [12–15]. При безнапорном потоке вводятся понятия «спокойного» и «бурного» потока. Поскольку давление и плотность

безнапорного потока достаточно стабильны, а свое течение поток, помимо скорости, регулирует изменением живого сечения потока (площади), которое при достаточно прочных стенках русла возможно лишь за счет изменения уровня поверхности (глубины потока).

Другое название числа Фруда — параметр кинетичности (Пк). Параметр кинетичности показывает, что в потоке, который является бурным при росте глубины энергия потока увеличивается, а в спокойном наоборот — снижается (9):

$$= Fr = \frac{U^2}{gh} = \frac{Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3}. \quad (9)$$

Критерии Фруда (7) и Рейнольдса (2) взаимосвязаны по определению. Также в основе перемешивания могут лежать и энергетические причины. Однако эта взаимосвязь не так однозначна и зависит от множества факторов. Многие исследователи выдвигали различные гипотезы о дополнительных критериях, влияющих на поток [16–20]. Одним из них является отношение ширины канала к глубине потока (B/h). Таким образом, для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в открытом канале требуется учесть влияния чисел Рейнольдса и Фруда, а также отношение ширины канала к глубине потока. Однако эти гипотезы не нашли экспериментального подтверждения.

В настоящее время, используя современное высокоточное оборудование можно установить степень влияния этих факторов. Так, для установления связи $\lambda = f\left(Fr, Re, \frac{B}{h}\right)$ было проведено исследо-

вание в гидравлически гладком канале в лаборатории кафедры гидравлики и использования водных ресурсов в 2014–2016 гг. При проведении экспериментов учитывались рекомендации предыдущих исследований [21, 22]. На персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения устанавливались расход и уклон. При выполнении экспериментов уклон дна изменялся в 9 раз. Для каждого уклона подбирались условия, при которых можно получить максимальный диапазон чисел Фруда и чисел Рейнольдса. Было проведено 154 эксперимента на 10 уклонах, в которых числа Рейнольдса изменялись в диапазоне от 23 000 до 308 000, числа Фруда от 0,5 до 6, отношение ширины канала к глубине потока (B/h) от 2 до 20.

Данные, полученные в результате эксперимента, отражены на рис. в виде зависимости λ_s/λ_b от $\left[Fr\left(\frac{h}{B}\right)\right]^{1/4}$, где λ_b и λ_s — коэффициенты гидравлического сопротивления, рассчитанные по формулам (1) и (7), соответственно. Таким образом, была получена универсальная зависимость (11), учитывающая влияние Fr , h/B и Re на величину коэффициента гидравлического сопротивления.

Из рисунка видно, что λ_s стремится к λ_b при параметре $\left[Fr\left(\frac{h}{B}\right)\right]^{1/4} < 0,75$. Отклонение от линии, соответствующей формуле Блазиуса, которое наблюдается при $\left[Fr\left(\frac{h}{B}\right)\right]^{1/4} > 0,75$, можно объяснить увеличением чисел Фруда и влиянием пространственности течения.

Получение зависимости коэффициента гидравлического сопротивления λ от Fr , Re и h/B

В результате анализа экспериментальных данных, представленных на рисунке, был получен безразмерный комплекс (11), отражающий влияние указанных параметров:

$$\lambda = 0,3164 \left(\frac{Fr}{Re} \right)^{1/4} \left(\frac{h}{B} \right)^{1/4}. \quad (11)$$

Полученную зависимость (11) можно рекомендовать для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в открытых гидравлически гладких каналах. Формула учитывает не только влияние числа Рейнольдса, а также числа Фруда и отношения ширины канала к глубине потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтишуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика : основы механики жидкости. М. : Стройиздат, 1965. 274 с.
2. Альтишуль А.Д. Гидравлические сопротивления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Недра, 1982. 224 с.
3. Альтишуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике / под ред. А.Д. Альтишуля. М. : Стройиздат, 1976. 255 с.
4. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1972. 312 с.
5. Барышников Н.Б. Гидромеханический анализ турбулентного руслового потока. Ленинград : ЛПИ, 1985. 83 с.
6. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел. СПб. : РГГМУ, 2003. 146 с.
7. Великанов М.А. Русловой процесс : основы теории. М. : Физматгиз, 1958. 395 с.
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1975. 559 с.
9. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений / под ред. В.С. Кнорова. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Энергия, 1967. 235 с.
10. Лятхер В.М. Турбулентность в гидросооружениях. М. : Энергия, 1968. 408 с.
11. Никурадзе И.И. Закономерности турбулентного движения жидкостей в гладких трубах // Проблемы турбулентности : сб. пер. ст. / под ред. М.А. Великанова, Н.Т. Швейковского. М. ; Ленинград : ОНТИ, 1936. С. 75–150.
12. Сабанеев А.А. Универсальная формула для коэффициента Шези // Известия ВНИИГ. 1947. Т. 32. С. 27–44.
13. Латышенков А.М., Лобачев В.Г. Гидравлика. 2-е изд., испр. и доп. М. : Госстройиздат, 1956. 408 с.
14. Френкель Н.З. Гидравлика. М. ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1947. 460 с.
15. Зегжда А.П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Ленинград : Госстройиздат, 1957. 278 с.
16. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. М. : Стройиздат, 1979. 344 с.
17. Тепакс Лео. Равномерное турбулентное движение в трубах и каналах. Таллин : Валгус, 1975. 255 с.
18. Гончаров В.Н. Равномерный турбулентный поток. М. ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1951. 147 с.
19. Абальянц С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 240 с.
20. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов / пер. с англ. И.В. Филимоновой ; под ред. А.И. Богомолова. М. : Стройиздат, 1969. 464 с.
21. Волгин Г.В. Влияние длины реализации пульсаций скорости на точность расчета турбулентных касательных напряжений // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 93–99.
22. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб. : Нестор-история, 2011. 543 с.

Поступила в редакцию в сентябре 2016 г.

Об авторе: **Волгин Георгий Валентинович** — заведующий научно-исследовательской лабораторией «Гидравлика и гидромеханика» Научно-образовательного центра «Гидротехника», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, volgin-gv@mail.ru.

Для цитирования: Волгин Г.В. Уточнение методов расчета коэффициента гидравлического сопротивления гладких открытых каналов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 94–98. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.94-98

REFERENCES

1. Al'tshul' A.D., Kiselev P.G. *Gidravlika i aerodinamika : Osnovy mekhaniki zhidkosti* [Hydraulics and Aerodynamics : The Fundamentals of Fluid Mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965, 274 p. (In Russian)
2. Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic Resistances]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Nedra Publ., 1982, 224 p. (In Russian)
3. Al'tshul' A.D. editor. *Primery raschetov po gidravlike* [Examples of Calculations on Hydraulics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, 255 p. (In Russian)
4. Kiselev P.G. editor. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook on Hydraulic Calculations]. 4th edition, revised and enlarged. Moscow, Energiya Publ., 1972, 312 p. (In Russian)

5. Baryshnikov N.B. *Gidromekhanicheskiy analiz turbulentnogo ruslovogo potoka* [Hydromechanical Analysis of Turbulent Stream Flow]. Saint-Petersburg, LPI Publ., 1985, 83 p. (In Russian)
6. Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel* [Hydraulic Resistances of River Beds]. Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2003, 146 p. (In Russian)
7. Velikanov M.A. *Ruslovoy process : osnovy teorii* [River Bed Evolution : Foundations of the Theory]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1958, 395 p. (In Russian)
8. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook on Hydraulic Resistances]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 559 p. (In Russian)
9. Levi I.I. *Modelirovanie gidravlicheskikh yavleniy* [Modeling of Hydraulic Phenomena]. 2nd edition, revised and enlarged. Saint-Petersburg, Energiya Publ., 1967, 235 p. (In Russian)
10. Lyatkher V.M. *Turbulentnost' v gidrosooruzheniyakh* [Turbulence in Hydraulic Structures]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 408 p. (In Russian)
11. Nikuradze I.I. *Zakonomernosti turbulentnogo dvizheniya zhidkostey v gladkikh trubakh* [Regularities of Turbulent Motion of Fluids in Smooth Pipes]. *Problemy turbulentnosti : sbornik perevodnykh statey* [Issues of Turbulence : Collection of Translated Articles]. Moscow, Saint-Petersburg, ONTI Publ., 1936, pp. 75–150. (In Russian)
12. Sabaneev A.A. *Universal'naya formula dlya koefitsienta Shezi* [Universal Formula for Chezy's Velocity Factor]. *Izvestiya VNIIG* [Proceedings of VNIIG]. 1947, vol. 32, pp. 27–44. (In Russian)
13. Latyshenkov A.M., Lobachev V.G. *Gidravlika* [Hydraulics]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956, 408 p. (In Russian)
14. Frenkel' N.Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Saint-Petersburg, Gosenergoizdat Publ., 1947, 460 p. (In Russian)
15. Zegzhda A.P. *Gidravlicheskie poteri na trenie v kanalakh i truboprovodakh* [Friction Hydraulic Loss in Channels and Pipelines]. Saint-Petersburg, Gosstroyizdat Publ., 1957, 278 p. (In Russian)
16. Bogomolov A.I., Borovkov V.S., Mayranovskiy F.G. *Vysokoskorostnye potoki so svobodnoy poverkhnost'yu* [Free-Surface High-Speed Flows]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 344 p. (In Russian)
17. Tepaks Leo. *Ravnomernoe turbulentnoe dvizhenie v trubakh i kanalakh* [Uniform Turbulent Motion in Pipes and Channels]. Tallin, Valgus Publ., 1975, 255 p. (In Russian)
18. Goncharov V.N. *Ravnomernyy turbulentnyy potok* [Uniform Turbulent Flow]. Moscow, Saint-Petersburg, Gosenergoizdat Publ., 1951, 147 p. (In Russian)
19. Abal'yants S.Kh. *Ustoychivye i perekhodnye rezhimy v iskusstvennykh ruslakh* [Stable and Transient Modes in Artificial Channels]. Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1981, 240 p. (In Russian)
20. Chow V.T. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 1959, 680 p.
21. Volgin G.V. *Vliyaniye dliny realizatsii pul'satsiy skorosti na tochnost' rascheta turbulentnykh kasatel'nykh napryazheniy* [Influence of the Length of Realization of Velocity Fluctuations on the Accuracy of Calculation of Turbulent Shear Stresses]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 9, pp. 93–99 (In Russian)
22. Klaven A.B., Kopalani Z.D. *Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa* [Experimental Studies and Hydraulic Modeling of River Flows and River Bed Evolution]. Saint-Petersburg, Nestor-istoriya Publ., 2011, 543 p. (In Russian)

About the author: **Volgin Georgiy Valentinovich** — Head of “Hydraulics and Hydromechanics” Scientific & Research Laboratory, Head of “Water Engineering” Research Education Center, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; volgin-gv@mail.ru.

For citation: Volgin G.V. *Utochnenie metodov rascheta koefitsienta gidravlicheskogo soprotivleniya gladkikh ot-krytykh kanalov* [Refinement of Methods of Calculation of Hydraulic Resistance Coefficient for Smooth Open Channels]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 1 (100), pp. 94–98. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.94-98