

УДК 628.334.2.004.69

А.В. КАЛИНИН**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ В КОЛЛЕКТОРАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ**

CALCULATION OF FRICTION LOSSES COEFFICIENT IN COMBINED SEWER PIPS

Представлены результаты экспериментальных исследований по изучению изменения коэффициента гидравлического трения в зависимости от микрорельефа донных форм. Проведен сравнительный анализ расчета коэффициента гидравлического трения с данными, полученными по результатам измерений в действующих общесплавных коллекторах Франции. Дальнейшие исследования в данном направлении позволят улучшить имеющиеся математические модели движения стоков в сетях водоотведения.

Ключевые слова: ливневый сток, отложение загрязнений, коэффициент гидравлического трения.

Известно, что форма эпюры осредненных скоростей потока жидкости зависит от коэффициента гидравлического трения λ [1-5]. В литературе можно найти множество формул для определения λ . В отечественной справочной и регламентирующей литературе¹ для сетей водоотведения, работающих в переходной области сопротивления, рекомендуется применять формулу Н.Ф. Федорова:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_{\phi}}{3,42 \times 4R_r} + \frac{a_{\phi}}{\text{Re}} \right), \quad (1)$$

где R_r - гидравлический радиус; Re - число Рейнольдса; Δ_{ϕ} - эквивалентная абсолютная шероховатость Федорова; a_{ϕ} - безразмерный коэффициент, учитывающий характер распределения шероховатости на поверхности трубы и структуру потока жидкости.

А.Д. Альтшуль² для определения коэффициента гидравлического трения предложил более простую формулу, которая широко применяется в расчетах напорных потоков.

Формулы Н.Ф. Федорова и А.Д. Альтшуля являются вариантами широко известной в зарубежной литературе формулы Кольбука [4]:

A result of experimental studies of coefficient of hydraulic friction on depending on the form of bottom microrelief is submitted. The comparative analysis of calculation of friction losses coefficient with the results of measurements made in the combined sewer pips in France is given. Further research in this area will improve the existing mathematical models of water movement in the storm sewer networks.

Key words: storm water, pollutants deposit, friction losses coefficient.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{b}{\text{Re}} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{aR_h} \right), \quad (2)$$

где R_h - гидравлический радиус; k - коэффициент шероховатости; a и b - коэффициенты, зависящие от области сопротивления. Для открытых потоков в переходной области часто предлагается принимать $a = 3,7$, $b = 2,5$ [1].

Результаты многочисленных исследований каналов с размываемым руслом показывают, что коэффициент гидравлического трения зависит от характеристик образующихся в канале донных микроформ^{3,4,5}. Ряд исследователей, например В.С. Кнороз⁶, прямо указывают, что геометрические параметры образующихся донных микроформ влияют на величину коэффициента гидравлического трения:

$$\frac{C}{g} = 3,16 \left(\frac{L}{S} \right)^{1/2} \left(\frac{H}{S} \right)^{1/8}, \quad (3)$$

где C - коэффициент Шези, который определяется по формуле

³ Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 184 с.

⁴ Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 312 с.

⁵ Yalin M.S. Mechanics of sediment transport. Pergamon Press, Queens University. 1977. 298 p.

⁶ Кнороз В.С. Неразмывающие скорости для несвязных грунтов и факторы, их определяющие // Известия ВНИИГ. 1958. Т. 59. С. 62-81.

¹ СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М., 1986. 72 с.

² Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.

$$C = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}}; \quad (4)$$

L – длина донных микроформ; S – высота донных микроформ; H – глубина потока.

В начале формирования донного рельефа микроформы перемещаются по дну канала в виде гряд. Размеры гряд малы по сравнению с размерами русла (максимум несколько сантиметров), зависят от размеров и типа перемещаемых частиц, но не зависят от глубины потока. При увеличении скорости потока и диаметра частиц гряды трансформируются в крупные формы (дюны), высота и ширина которых соизмеримы с глубиной и шириной водотока. Крупные гряды и дюны в основном возникают в больших коллекторах. Они определяют облик рельефа дна коллектора, обуславливая изменения его глубины и ширины, влияют на изменение гидравлических характеристик потока.

С течением времени происходит изменение геометрических размеров донных форм, что влияет на изменение коэффициента гидравлического трения λ , причем режим гидравлического сопротивления может изменяться от гидравлически гладких русел к переходному, а затем к квадратичному режиму и обратно^{7,8}.

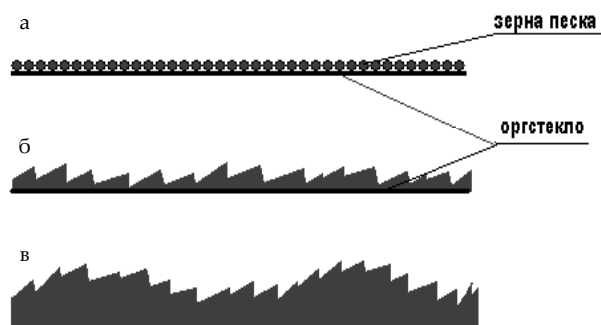


Рис. 1. Вид дна лотка с искусственной зернистой шероховатостью (а), грядовым рельефом (б), дюнно-грядовым рельефом (в)

По результатам экспериментальных исследований в лаборатории гидравлики Российского университета дружбы народов⁹ нами были получены графики изменения коэффициента гидравлического трения при увеличении числа Рейнольдса для раз-

личной шероховатости дна лотков k_s : искусственная зернистая однородная шероховатость (рис. 1а, $k_s = 0,3$ мм), песчаные гряды (рис. 1б, $k_s = 6$ мм), дюнно-грядовый рельеф (рис. 1в, $k_s = 15$ мм).

Величина коэффициента λ определялась по методу Коулса:

$$\lambda = \frac{8 \tau_{cp}}{\rho v_{cp}^2}, \quad (5)$$

где v_{cp} – средняя скорость; $\tau_{cp} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n}{n}$ – среднее напряжение трения в данном сечении лотка; τ_1, τ_2, τ_n – напряжения трения в отдельных точках сечения, подсчитанные по формуле

$$\tau = \rho u_*^2, \quad (6)$$

где u_* – динамическая скорость, которая определялась по формуле В. Графа¹⁰:

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + B_s, \quad (7)$$

где $u(z)$ – осредненная скорость в точке на расстоянии z от дна канала; k – постоянная Кармана ($k = 0,41$); B_s – константа, зависящая от числа Рейнольдса пристеночного слоя $Re_e^* = \frac{u_* k_s}{\nu}$ (в случае развитого турбулентного движения, когда $Re_e^* \geq 70$, можно принять $B_s = 8,5$, в переходной области при $7,1 \leq Re_e^* \leq 14,1$ $B_s = 9,6$).

Из графиков на рис. 2 следует, что величина коэффициента гидравлического трения в значительной степени зависит от формы донных образований, формируемых потоком жидкости, что полностью соответствует выводам, сделанным В.С. Кнорозом и Ю.В. Брянской.

Таким образом, в сетях отведения поверхностного стока и общесплавных сетях расход воды изменяется в связи с неравномерным выпадением дождевых осадков на территории водосбора, что приводит к постоянному изменению формы донных отложений на дне труб и коллекторов. Соответственно их коэффициент гидравлического трения будет также постоянно изменяться.

Нами было проведено сравнение величин коэффициента λ , полученных в лабораторных лотках, со значениями λ , вычисленными по результатам измерений, выполненных в действующих коллекторах

⁷ Брянская Ю.В., Маркова И.М., Остякова А.В. Гидравлика водных и взвешенных потоков в жестких и деформируемых границах. М.: Издательство АСВ, 2009. 264 с.

⁸ Hersen P., Douady S. et Andreotti B. Relevant length scale of barchan dunes. Phys. Rev.Lett., 89(264301), 2002.

⁹ Калинин А.В. Влияние русловой выемки на гидравлический режим реки: дис. ... канд. техн. наук. М: РУДН, 1987.

¹⁰ Graf W.H., Altinacac M.S. Hydraulique fluviale. Tome 2. Ecoulement non permanent et phénomènes de transport. Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Vol. 16. 1996.

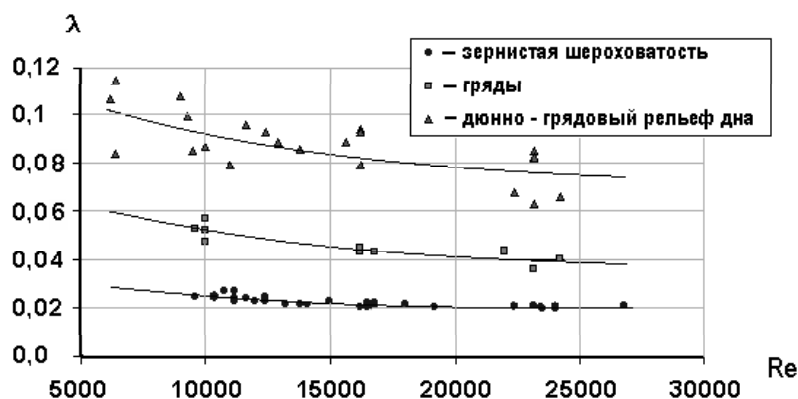


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента λ от числа Re при различной шероховатости дна лотка

Таблица 1

Расчетные и измеренные значения коэффициента гидравлического трения λ для общесплавных коллекторов

Параметры		Коллекторы без осадка				Коллекторы с осадком	
		Риволи (3.03. 2000)	Риволи (15.03. 2000)	Вьей-дю-Тампль	Кордон-Блэ	Сэнт-Жиль (3 створа)	Риволи (2 створа)
Измерения	Средняя скорость, м/с	0,34	0,26	0,89	0,71	0,4	0,3
	Средняя глубина, м	0,30	0,24	0,20	0,90	0,29	0,39
	Ширина, м	1,2	1,2	0,6	1,70	0,6	1,2
	Гидравлический радиус R_r , м	0,2	0,17	0,12	0,44	0,147	0,236
	Число Re	68000	44600	96000	312000	59000	70900
	Гидравлическая крупность осадка w_{0r} см/с					15,7	5,4
	Коэффициент гидравлического трения λ	0,008	0,008	0,005	0,017	0,017-0,038	0,053-0,078
	Напряжение трения τ_0 , н/м ²	0,3	0,17	1,32	1,1	0,9-2,0	1,6-2,2
Расчет	Абсолютная шероховатость Δ_{ϕ} , мм	2,0	2,0	2,0	2,0	-	-
	Коэффициент α_{ϕ}	100	100	100	100	-	-
	Коэффициент шероховатости k , мм	1,5	1,5	1,5	2,1	15	60
	Коэффициент гидравлического трения λ	по (1)	0,035	0,039	0,035	0,025	-
по (2)		0,024	0,026	0,027	0,021	0,054	0,08

французских городов: Париж (Сэнт-Жиль, Вьей-дю-Тампль, Риволи), Нант (Кордон-Блэ)¹¹ (см. табл. 1). На участках коллекторов, проходящих вдоль улиц Риволи и Вьей-дю-Тампль, на которых не было отложений загрязнений на дне, измерения проводились 3, 15 и 29 марта 2000 г., на участках коллекторов улиц Сэнт-Жиль и Риволи, в которых имелись отложения осадка, - 22 и 28 августа того же года. Высота слоя осадка на дне исследуемого участка коллектора

Сэнт-Жиль изменялась от 1 до 6 см, а на участке коллектора Риволи - от 2 до 11 см. В коллекторе Кордон-Блэ (г. Нант) никогда не наблюдалось отложений¹².

Принимая во внимание то обстоятельство, что движение потока в лабораторных лотках проходило при меньших числах Re , чем в действующих коллекторах, можно сделать вывод, что полученные в лаборатории значения коэффициента λ вполне соответствуют значениям коэффициентов гидравлического

¹¹ Gromaire M.-C., Garnaud S., Ahyerre M., Chebbo G. Quality of street cleaning waters: comparison with dry and wet weather flow in Paris // Urban Water. Vol. 2. 2000. Pp. 39-46.

¹² Bonakdari H. Contrainte de cisaillement et vitesse d'autocurage dans des collecteurs ovoïdes à banquettes // XXIVèmes Rencontre Universitaires de Génie Civil. Paris, 2006. 1-8 p.

трения для коллекторов с осадком на дне: Кордон-Блэ, Сэнт-Жиль и Риволи. Значительно меньшие значения λ в коллекторах Риволи (измерения 3 и 15 марта 2000 г.) и Вьей-дю-Тампль, чем величины λ , полученные в лабораторных условиях, вероятно, можно объяснить тем, что в этих коллекторах наблюдалось скопление слизи биологического происхождения на стенках, что, возможно, уменьшает гидравлическое сопротивление коллектора. Необходимо признать, что это явление требует дальнейшего изучения.

Нами также был выполнен расчет коэффициентов λ по формулам Н.Ф. Федорова и Кольбука для этих коллекторов. Полученное по формуле Н.Ф. Федорова значение коэффициента λ для коллектора Кордон-Блэ в 1,5 раза превышает измеренное значение. Расчет λ по формуле Н.Ф. Федорова для коллекторов с осадком на дне не проводился, так как мы не нашли в справочной литературе значения эквивалентной абсолютной шероховатости Δ_s и коэффициента a_{ϕ} для таких трубопроводов. Значения λ , полученные по формуле Н.Ф. Федорова, выше значений, рассчитанных по формуле Кольбука в среднем на 35 %. Величина коэффициента гидравлического трения, рассчитанная по формуле Кольбука, оказалась приблизительно на 40 % больше реальных значений λ .

Выводы. 1. Предлагаемые в справочной литературе эмпирические формулы для расчета коэффициента гидравлического трения не в полной мере учитывают все особенности взаимодействия потока с деформируемым под его воздействием дном коллектора, имеющего отложения примесей.

2. При построении математических моделей движения стоков в сетях водоотведения с применением коэффициентов гидравлического трения или Шези необходимо учитывать их изменчивость во времени в связи с изменением микрорельефа образовавшихся в коллекторе донных отложений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.
2. Альтишувль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
3. Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В., Курганов А.М. Гидравлический расчет сетей водоотведения. Ч. 1. СПб. 1997. 128 с.
4. Chocat B. EURYDICE 92. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris: Tec&Doc (Ed), 1997. 1124 p.
5. Bigillon T., C. Frey, C. Ducottet, M. Ancey, M. Jodeau and J.L. Reboud. Two-dimensional motion of a set of particles in a free surface flow with image processing. Experiments in Fluids. 2006. № 41(1). P. 1-11.

© Калинин А.В., 2014

Об авторе:

КАЛИНИН Анатолий Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения

Тольяттинский государственный университет
445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. (8482) 53-92-28

E-mail: prodcom@tetsu.ru

KALININ Anatoly

PhD in Engineering Science, Associate Professor of Water Supply and Wastewater Chair

Tolyatti State University
443001, Russia, Tolyatti, Belorusskaya str., 14,
tel. (8482) 53-92-28

E-mail: prodcom@tetsu.ru

Для цитирования: Калинин А.В. Определение величины коэффициента гидравлического трения в коллекторах водоотведения // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2014. Вып. № 1 (14). С. 58-61.