

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ МИНИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕНИЯ В КОЛЛЕКТОРАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

А.В. Калинин

Кафедра водоснабжения и водоотведения
Архитектурно-строительный институт
Тольяттинский государственный университет
ул. Белорусская, 14, Тольятти, Россия, 445667

На основе выводов М.И. Алексеева о влиянии коэффициента гидравлического трения трубы на величину продольных и поперечных пульсаций мгновенных скоростей в жидкости получена формула для определения минимальных напряжений трения на стенке коллекторов общесплавной и ливневой канализации. Выполнен анализ гранулометрического состава осадка загрязнений в сетях водоотведения европейских городов, соответствия расчетных значений напряжений трения и коэффициентов гидравлического трения величинам, полученным в результате измерений в общесплавных коллекторах городов Париж и Нант. Определены максимальные диаметры частиц загрязнений, которые будут взвешиваться стоками при соблюдении норм, принятых для сетей водоотведения в странах Европы и США.

Ключевые слова: поверхностный сток, общесплавной коллектор, осадок грубодисперсных примесей, минимальные напряжения трения.

Обычно водоотводящая сеть проектируется как система самотечных трубопроводов, прокладываемых с максимальным использованием существующего уклона поверхности городских территорий при условии, что обеспечивается транспорт по трубопроводам всех загрязнений, поступающих с водосбора. Для обеспечения этого условия устанавливают минимальные предельные значения скорости движения потока в трубопроводах. В научной литературе приводятся две трактовки минимальных скоростей: 1) незаиливающая скорость; 2) самоочищающая скорость. Под незаиливающей скоростью понимается минимальная средняя скорость потока, при которой не происходит осаждения примесей на дно трубы; под самоочищающей скоростью — минимальная расчетная средняя скорость потока, при которой происходит отрыв частиц, выпавших в осадок, от дна трубы и их дальнейшее перемещение потоком [1]. Из этих определений следует, что самоочищающая скорость должна быть больше незаиливающей, так как в осадке на дне трубопровода возникают силы сцепления, для преодоления которых требуются большие скорости потока. Для того чтобы неподвижная частица начала перемещаться потоком жидкости, в данной точке необходимо создать минимальное сдвигающее усилие. Напряжение сдвига должно быть как минимум равно напряжению трения на стенке трубы τ_0 .

Основной причиной переноса твердых частиц из нижележащих слоев в верхние и транспортирования их во взвешенном состоянии являются вертикальные составляющие пульсационной скорости u'_z [2]. Скорость, при которой частицы

будут находиться во взвешенном состоянии, должна быть больше или равна величине гидравлической крупности частицы w_0 . Принимая во внимание закон распределения мгновенных скоростей u'_z относительно осредненных значений пульсаций $\overline{u'_z}$, М.И. Алексеев предложил зависимость для определения максимальных среднеквадратичных значений вертикальных пульсаций скорости:

$$\overline{u'_z} = 0,266w_0. \quad (1)$$

Обобщив опытные данные, полученные И.К. Никитиным, С.Б. Марковым и другими исследователями при изучении продольных и поперечных пульсаций мгновенной скорости в пограничном слое, М.И. Алексеев сделал вывод, что среднеквадратичные значения продольных пульсаций скорости зависят также от коэффициента гидравлического трения λ :

$$\overline{u'_x} = 0,225w_0\lambda^{-1/3}. \quad (2)$$

Если предположить, что минимальное напряжение трения на стенке трубы $\tau_{0\min}$ равны турбулентным касательным напряжениям Рейнольдса $\tau_{\text{турб}}$, то можно записать:

$$\tau_{0\min} = \rho \overline{u'_x} \overline{u'_z} = \rho 0,06w_0\lambda^{-1/3}, \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкости.

Полученная формула позволяет определить минимальное напряжение трения, при котором не будет наблюдаться осаждение частиц примесей на дно трубопровода, что соответствует незаиливающей скорости потока.

Коэффициент гидравлического трения λ в сетях водоотведения рекомендуется определять по формуле Н.Ф. Федорова:

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

где R_T — гидравлический диаметр; Re — число Рейнольдса; Δ_ϕ — эквивалентная абсолютная шероховатость по шкале Федорова; a_ϕ — безразмерный коэффициент, учитывающий характер распределения шероховатости на поверхности трубы и структуру потока жидкости.

Формула Н.Ф. Федорова является одним из многочисленных вариантов широко известной в зарубежной литературе формулы Колебрука [3]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{2,5}{\text{Re}_D} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{\overline{\Delta}_r}{3,7}\right), \quad (5)$$

где $\overline{\Delta}_r$ — осредненная относительная шероховатость ($\overline{\Delta}_r = \frac{k}{4R_T}$, где k — коэффициент шероховатости, значения которого приводятся в справочниках [4]), Re_D — число Рейнольдса.

М.И. Алексеев, опираясь на исследования В.Н. Гончарова и В.И. Калицуна, считает, что при отсутствии сцепления между частицами размывающие скорости, при которых происходит отрыв частиц от дна, выше скоростей, при которых частицы выпадают в осадок, в 1,4 раза. Тогда напряжение трения на стенке, при котором происходит самоочищение трубопровода, можно определить по формуле

$$\tau_{0\max} = \rho 0,084 w_0^2 \lambda^{-1/3}. \quad (6)$$

Полученная формула может быть применена в случае, если не произошло самоуплотнения и консолидации осадка на дне.

Напряжение трения согласно формулам (3) и (6) зависит от крупности частиц осадка. Гранулометрический состав загрязнений, попадающих в водоотводящие сети с территории водоотведения, во многом зависит от особенностей водосборного бассейна, наличия тех или иных источников загрязнения, параметров дождей, выпадающих на данной территории. Установлено [5], что во время обычных дождей в канализацию с поверхностным стоком в основном попадают частицы диаметром $d < 0,2$ мм, во время сильных ливней — $d < 2$ мм. Частицы диаметром $d > 2$ мм могут оказаться в ливневой канализации при условии направленного воздействия на потоки воды или на частицы. Размер частиц, выпадающих в осадок в коллекторах и трубах, изменяется в широких пределах, что подтверждают данные о средневзвешенных диаметрах частиц осадка d_{50} в сетях общесплавной канализации в некоторых городах Европы (табл. 1) [5].

Таблица 1

**Средневзвешенные диаметры частиц осадка
в сетях общесплавной канализации в некоторых городах Европы (d_{50} , мм)**

Город	Марсель (Франция)		Брюссель (Бельгия)	Страсбург (Франция)	Бад-Мергентхайм (Германия)
	коллекторы	трубы	коллекторы	трубы	трубы
d_{50} , мм	2,0	2,4	0,2—0,5	0,06—2	0,6

В коллекторах общесплавной канализации Сэнт-Жиль, Вьей-дю-Тампль и Риволи, расположенных в квартале старой городской застройки Марэ г. Парижа и находящихся в непосредственной близости один от другого ($\approx 1,2$ км) (рис.), средневзвешенный диаметр частиц осадка, составляет соответственно 2,1 мм, 0,87 мм и 0,5 мм [6].

Гранулометрические кривые осадка в коллекторах Сэнт-Жиль и Риволи также показаны на рисунке. Площадь водосборного бассейна района составляет 41,9 га, на ней проживает около 12,4 тыс. жителей. В районе отсутствуют крупные предприятия, не ведется строительство, основная часть малых предприятий представляет услуги для населения и туристов: торговля, гостиницы, рестораны, офисы и др. Наличие крупных фракций в осадке (> 2 мм), вероятно, связано с проведенными до 1997 г. ремонтными работами в районе улицы Сэнт-Жиль.

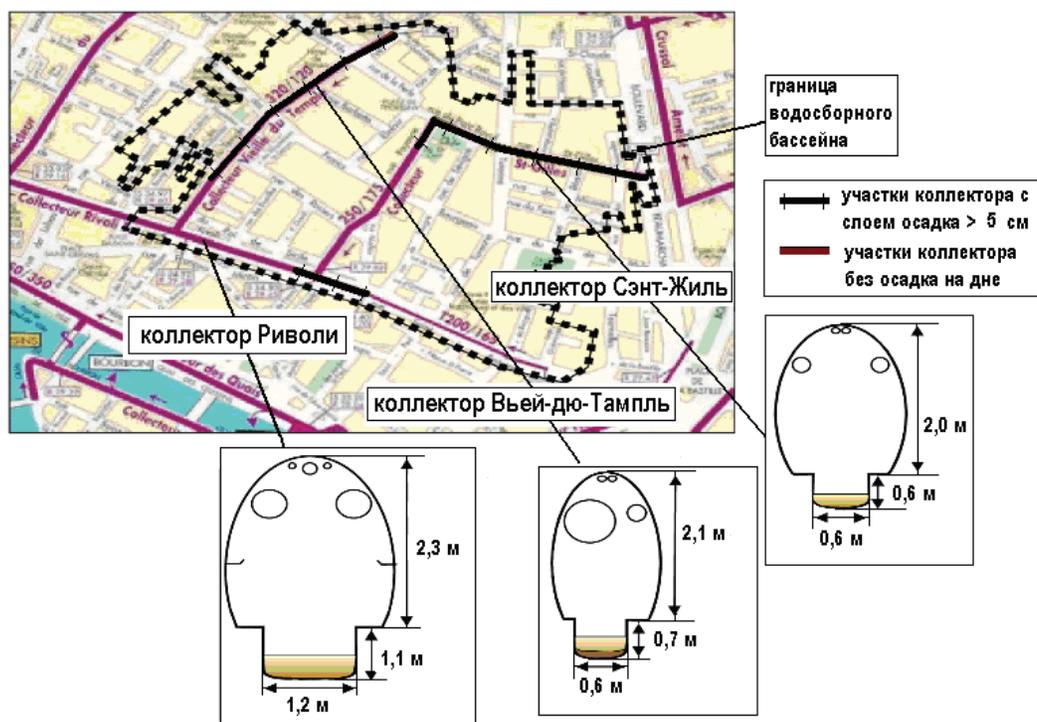


Рис. Расположение коллекторов в квартале Марэ

В России основное загрязнение ливневой канализации происходит в результате смыва в весенний период песка с проезжей части дорог, который входит в состав антигололедных смесей [7; 10]. Для их изготовления используется песок диаметром зерен от 0,2 до 5 мм, причем согласно нормам от 50 до 60% от общей массы смеси должны составлять фракции диаметром 2—3 мм. Мелкие фракции попадают в канализацию во время интенсивного таяния снега, более крупные скапливаются вдоль бордюров и затем удаляются механическим путем. Остатки прибордюрной грязи смываются в канализацию после полива улиц. М. И. Алексеев считает, что в России осадок, извлекаемый из сетей ливневой канализации, на 85—90% состоит из песка, размер зерен которого равен 1,0 мм.

Величина гидравлического коэффициента трения λ зависит от материала и состояния труб и числа Re . Мы выполнили расчет коэффициента λ по формулам (4) и (5) для коллекторов Сэнт-Жиль, Вьей-дю-Тампл, Риволи (г. Париж) и Кордон-Блэ (г. Нант) и сравнили результаты расчета с данными, полученными в ходе измерений в этих коллекторах (табл. 2).

Исследования в коллекторах г. Парижа были выполнены Высшей национальной инженерной школой *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris*. Мгновенные скорости и напряжения трения измерялись при помощи измерителя скорости Доплера ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*). На участках коллекторов, проходящих вдоль улиц Риволи и Вьей-дю-Тампл, на которых не было отложений загрязнений на дне, измерения были выполнены 3, 15 и 29 марта 2000 г.; на участках коллекторов улиц Сэнт-Жиль и Риволи, в которых имелся осадок, — 22 и 28 августа того же года.

Расчетные и измеренные значения коэффициента гидравлического трения λ для общесплавных коллекторов

Параметры		Коллекторы без осадка				Коллекторы с осадком	
		Риволи (3.03)	Риволи (15.03)	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 w_0 , см/с	0,37	0,37	0,37	2,1	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 a_ϕ	100	100	100	100	—	—
	Коэффициент шероховатости k , мм	1,5	1,5	1,5	2,1	15	60
	Коэффициент гидравлического трения λ	по (4)	0,035	0,039	0,035	0,025	—
по (5)		0,024	0,026	0,027	0,021	0,054	0,08

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.

Измерения напряжения трения в коллекторе общесплавной канализации Кордон-Блэ г. Нант (Франция) были проведены Национальным центром научных исследований Франции (CNRS) в 2006 г. [8]. В коллекторе никогда не наблюдалось отложений осадка.

Для участков коллекторов г. Парижа, не имеющих осадка на дне, измерением получены очень низкие значения λ . Вероятно, это связано с тем, что стенки этих коллекторов ниже банкетов покрыты слизью биологического происхождения, что в случае низких расходов значительно снижает гидравлическое сопротивление коллектора. Необходимо признать, что это предположение требует дальнейшего изучения.

Для других коллекторов превышение расчетных коэффициентов гидравлического трения над измеренными составляет в среднем 1,5 раза, причем значения λ , полученные по формуле (4), выше значений, полученных по формуле (5) в среднем на 35%. Мы не проводили расчет λ по формуле Н.Ф. Фёдорова для коллекторов, имеющих осадок на дне, так как не нашли в справочной литературе значения эквивалентной абсолютной шероховатости Δ_ϕ и коэффициента a_ϕ для таких трубопроводов.

М.И. Алексеев считает, что при назначении минимальных скоростей и уклонов водоотводящих трубопроводов необходимо ориентироваться на трубы наибольшей шероховатости, так как практически всегда возможно выпадение в осадок от 5 до 10% взвеси с большей гидравлической крупностью, что увеличивает пульсационные составляющие скорости.

С учетом этого предположения, величина напряжения трения τ_0 , рассчитанная по формуле (6) для песка с размером зерен 1,04 мм и средней высотой образований осадка 15 мм на дне коллектора, гидравлический радиус которого $R_{\Gamma} = 0,15$ м, составляет 2,53 н/м².

В связи с тем, что τ_0 зависит не только от величины средней скорости потока, но и от формы эпюры осредненных скоростей, многие исследователи считают, что более рациональным по сравнению с критериями минимальной незаиливающей или самоочищающей скорости является критерий касательного напряжения. В странах Европы и США приняты нормы, устанавливающие минимальные напряжения трения в водоотводящих сетях (табл. 3) [9].

Таблица 3

Минимальные напряжения трения и максимальные диаметры взвешенных частиц в водоотводящих сетях стран Европы и США

Страна	Система водоотведения	Степень заполнения трубы	Диаметр труб D , м	Напряжение трения τ_0 , н/м ²	Диаметр частиц, мм	
					d_1	d_2
США	Дождевая	0,5—1,0	—	3,0—4,0	1,27—1,63	1,25—1,6
Англия	Общесплавная и дождевая	0,5—1,0	—	6,2	2,2	2,2
Германия	Все типы	1,0	> 1,0	2,5	1,16	1,15
Норвегия	Дождевая	—	—	2,0	0,98	0,97
Швеция	Все типы	—	—	1,0—1,5	0,61—0,8	0,60—0,78

Для приведенных в табл. 3 величин напряжения трения с использованием формул (3) и (6) нами была определена гидравлическая крупность и диаметры частиц, которые будут находиться во взвешенном состоянии при условии, что в коллекторе будут соблюдаться условия, обеспечивающие минимальное напряжение трения на стенке в соответствии с нормами: d_1 — для коллекторов, не имеющих отложений на дне; d_2 — для коллекторов с осадком. Для определения средних значений коэффициентов гидравлического трения мы использовали данные табл. 2: для коллекторов без осадка на дне было принято среднее значение коэффициента гидравлического трения $\lambda = 0,017$; при наличии осадка — $\lambda_{\text{ср}} = 0,047$. Расчет показал, что для принятых коэффициентов гидравлического трения максимальные диаметры частиц, которые будут находиться во взвешенном состоянии в потоке жидкости, одинаковы для коллекторов без осадка и с осадком на дне (см. табл. 3).

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный М.И. Алексеевым метод определения продольных и поперечных пульсаций в зависимости от заданного размера взвешенных частиц и коэффициента гидравлического трения λ коллектора позволяет определить мини-

мальное напряжение трения на стенке τ_0 , при котором происходит взвешивание частиц в стоках.

2. Вычисленные по формулам Н.Ф. Фёдорова и Колебрука значения коэффициента гидравлического трения λ превышают значения λ , полученные измерением в действующих коллекторах.

3. Величина коэффициента гидравлического трения λ в общесплавных коллекторах может быть значительно меньше расчетной из-за образования на стенках слизи биологического происхождения.

4. Напряжение трения τ_0 возрастает в несколько раз при выпадении осадка на дно коллектора.

5. Принятые в странах Европы (за исключением Швеции) и США нормы, устанавливающие минимальные напряжения трения в водоотводящих сетях, позволяют создать условия для перемещения стоками минеральных частиц диаметром около 1 мм. Нормы, принятые в Англии, обеспечивают транспорт стоками всех частиц, попадающих в канализацию после выпадения дождя любой интенсивности.

6. Если расчетом предусматривается, что в водоотводящую сеть будут попадать частицы, диаметр которых превышает максимальный расчетный, то в трубах будет образовываться осадок. В этом случае коллекторы необходимо рассчитывать на их самоочищение при прохождении расчетных расходов. Так как расчетные расходы в сетях отведения поверхностного стока наблюдаются через довольно длительные интервалы времени, при определении напряжения трения на размыв необходимо учитывать эффект самоуплотнения и консолидации отложений осадка за время его нахождения в коллекторе.

7. В случае невозможности создания условий для самоочищения коллекторов при расчетных расходах, необходимо предусмотреть мероприятия для их механической очистки или устройство в сети специальных сооружений, способствующих накапливанию минеральных примесей в определенной точке коллектора и их последующему механическому удалению (пескоулавливающие камеры) [11].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. — М.: АСВ, 2002.
- [2] Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В., Курганов А.М. Гидравлический расчет сетей водоотведения. Ч. 1. — СПб., 1997.
- [3] Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. — Л.: Энергоиздат, 1982.
- [4] Bourdeau Y. Cours de mécanique des fluides et d'hydraulique générale. — Lyon: INSA-LYON, 2003.
- [5] Gromaire-Mertz M.C. La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire. Caractéristiques et origines Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'Environnement, ENPC, France. 1998. — 507 p.
- [6] Oms C. Localisation, nature et dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée. — Paris, 2003.
- [7] Калинин А.В. Физико-химический состав поверхностного стока городов Тольятти и Самары // Водоснабжение и санитарная техника. — 2011. — № 4.

- [8] *Bonakdari H.* Contrainte de cisaillement et vitesse d'autocurage dans des collecteurs ovoïdes à banquettes // XXIVèmes Rencontre Universitaires de Génie Civil. — Paris, 2006.
- [9] *Chocat B. et al.* Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. — Paris: Tec&Doc Ed, 1997 — 1124 p.
- [10] *Алексеев М.И., Курганов А.М.* Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. — М.: АСВ; СПбГАСУ, 2000.
- [11] *Калинин А.В.* Пескоулавливающая камера усовершенствованной конструкции // Водоснабжение и санитарная техника. — 2010. — № 7.

REGARDING THE CALCULATION OF THE MINIMUM FRICTION STRESS IN COMBINED SEWER PIPS

A.V. Kalinin

Department of Water and Wastewater
Architectural and Civil Engineering Institute
Togliatti State University
Belarusian str., 14, Togliatti, Russia, 445667

Based on the M.I. Alekseyev's conclusions about the influence of the friction losses coefficient on the longitudinal and cross pulsations momentary rate in the fluid, was derived a formula for minimum friction stress definition on the walls of the combined sewer and drainage pips. The analysis of sediment grain-size composition of pollutants in combined sewer systems of European cities is given. Performed an analysis of correspondence between calculated friction stress values and friction losses coefficient values, that were obtained from measurements in combined sewer systems of Paris and Nantes. Maximum diameters of the particles of pollution which will be weighed by runoffs in compliance with the rules accepted for disposal networks in Europe and the U.S are determined.

Key words: storm sewer runoff, combined sewer pip, sediment of the particulate pollutants, minimum friction stress.