

**А.В. КАЛИНИН**

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения  
Тольяттинский государственный университет

**ВЛИЯНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
В КОЛЛЕКТОРЕ ВОДООТВЕДЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ЭПЮРЫ**

*POLLUTANTS' CONCENTRATION INFLUENCE ON THE SHAPE  
OF AVERAGED TWO-PHASE FLOW VELOCITY DIAGRAM*

*В статье приводятся первоначальные результаты экспериментальных исследований изменения формы эпюры средней скорости потока на входе и выходе из устройства для предварительной очистки поверхностного стока от грубых примесей. Сравнение результатов лабораторных исследований с результатами измерений, выполненных в водохранилищах в пределах водосбора старого города в Париже, доказывает возможность изучения этого явления с помощью физической модели. Более обширные исследования в этой области могут улучшить существующие математические модели двухфазных потоков в системах водоотведения.*

**Key words:** *two-phase flow, pollutants' concentration, averaged velocity diagram, grit chamber.*

Поверхностные сточные воды с урбанизированных территорий содержат большое количество загрязняющих веществ в виде твердых частиц, находящихся во взвешенном состоянии [1]. Такие потоки называют двухфазными.

В случае если транспортирующая способность потока в данный момент времени меньше расхода твердого стока, то происходит осаждение частиц и их накопление на дне коллектора, в противном случае происходит отрыв частиц от дна трубы и их взвешивание, наблюдается эрозия слоя отложений.

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. При этом предполагается, что в коллекторе на определенное время, при минимальных расходах поверхностного стока, могут накапливаться загрязнения, которые затем с увеличением расхода и скорости течения воды взвешиваются потоком и перемещаются на нижележащие участки сети.

*Preliminary results of experimental studies on the phenomenon of changing the shape of the diagrams of averaged velocity at the inlet and outlet of the devices for pre-treatment of surface runoff from coarse impurities are given. The comparison of laboratory results with the results of measurements made in the reservoirs in the drainage area of the old city in Paris proves the possibility of studying this phenomenon using the physical model. More extensive research in this area can improve the existing mathematical model of the two-phase flows in water drainage systems.*

**Ключевые слова:** *двухфазный поток, концентрация примесей, усредненная диаграмма скорости, отсек для примесей.*

Скорость, при которой происходит самоочищение трубопроводов, называется «самоочищающей» - это минимальная расчетная средняя скорость потока, при которой происходит отрыв частиц, выпавших в осадок, от дна и их дальнейшее перемещение потоком. Под минимальной, в данном случае, понимают минимальную среднюю скорость потока, так как движение потока жидкости в водоотводящем коллекторе при наличии отложений на дне всегда неравномерное [2] (рис. 1).

Таким образом, дождевые сети водоотведения должны проектироваться с уклоном, обеспечивающим их периодическое самоочищение при определенном расходе.

Несмотря на то, что при проектировании и строительстве новых систем водоотведения эти нормы практически всегда выполняются, очень часто наблюдается заиливание сетей в результате выпадения осадка, что приводит к снижению пропускной способности трубопроводов, а иногда и к их полной закупорке, если не проводится их регулярная прочистка. В качестве такого отрицательного примера можно привести город Тольятти, в котором 26 июля

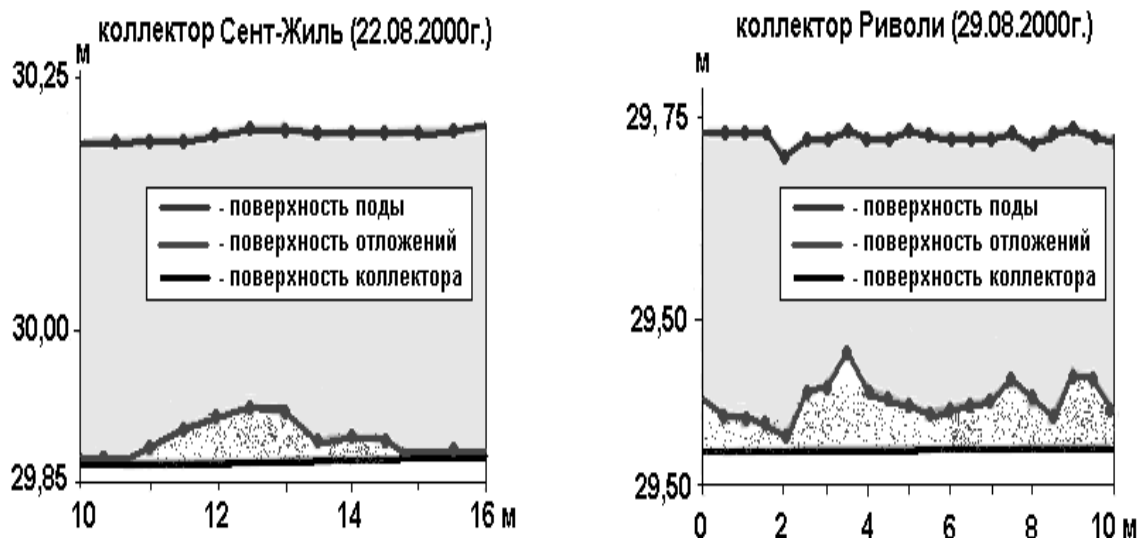


Рис. 1. Изменение рельефа свободной поверхности потока при наличии отложений загрязнений на дне коллектора

2004 г. в результате ливня выпало 47,7 мм осадков (78 % от месячной нормы), что привело к затоплению обширной территории. Вместе с тем поверхностный сток Тольятти не отличается высокой концентрацией загрязняющих веществ [3].

Регулярная очистка сетей водоотведения от отложений грубодисперсных примесей затруднена и требует выделения значительных средств. Например, в 1979 г. муниципалитет города Тулузы вынужден был затратить на очистку 930 км ливневой канализации 7700 тыс. французских франков (около 1174 тыс. евро) [4].

Для того чтобы уменьшить количество транспортируемых потоком грубодисперсных примесей и увеличить его транспортирующую способность, предлагаются различные устройства. В Европе большое распространение получили пескоулавливающие камеры, которые устраиваются в больших коллекторах (рис. 2). Они предназначены для улавливания загрязнений крупных фракций путем их осаждения в камере. После заполнения камеры осадок удаляется механическим или гидромеханическим путем. Исследования показали, что такие сооружения в первоначальный период их заполнения улавливают до 80 % транспортируемых потоком грубодисперсных примесей [5]. Устройство такой камеры вызывает дополнительное гидравлическое сопротивление в сети водоотведения, что должно быть учтено в расчетах. Формулы для расчета хорошо известны в гидравлике (Борда, Идельчик и др.) и часто используются в математических моделях.

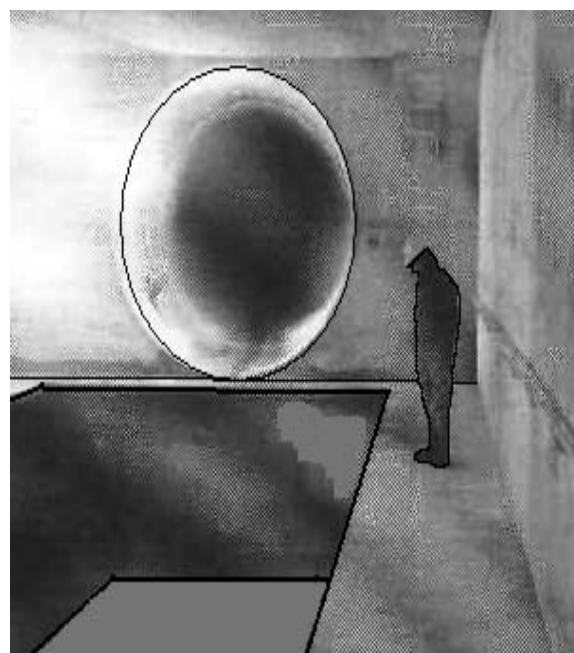


Рис. 2. Пескоулавливающая камера до начала эксплуатации

При использовании этих формул предполагается, что поток на входе и на выходе из сооружения равномерный, т. е. имеет одинаковую форму эпюры осредненных скоростей и, соответственно, одинаковую величину корректива кинетической энергии  $\alpha$ , который также называют коэффициентом Кориолиса.

Коэффициент Кориолиса в сетях водоотведения может быть определен по формуле [6]:

$$\alpha = \frac{\int u^{-3} dS}{u_{cp}^{-3} S} = \frac{(1+m)^3}{1+3m}. \quad (1)$$

Считается, что при движении жидкости в прямолинейных трубах коэффициент Кориолиса мало отличается от единицы ( $\alpha = 1,05 \dots 1,1$ ) и не учитывается в расчетах, однако в безнапорных потоках, при небольших значениях гидравлического радиуса и наличии отложений в виде дюнно-грядовых форм на дне, коэффициент Кориолиса, подсчитанный по формуле (1), может быть равным 1,3 и более [7].

Мы считаем, что в случае гидравлического расчета устройств для улавливания грубодисперсных примесей (песка) необходимо учитывать изменение коэффициента Кориолиса на их входе и на выходе. Для доказательства этого предположения был проведен анализ распределения осредненных скоростей по глубине потока на входе и на выходе физической модели пескоулавливающей камеры.

Экспериментальные исследования были выполнены в лаборатории кафедры гидравлики и гидротехнических сооружений Российского университета дружбы народов [8]. Исследования проводились в лотках со стеклянными стенками и шероховатым дном. Размеры лотков:  $8,0 \times 0,25 \times 0,3$  м и  $25 \times 1,4 \times 0,5$  м. Перед началом эксперимента дно лотков покрывалось ровным слоем однородного песка диаметром 0,35 мм. Уклон лотка меньшего размера можно было менять, для того чтобы установить равномерный режим движения потока по всей его длине.

Равномерный режим в лотке большего размера достигался за счет тщательной планировки песчаного дна. После установления равномерного режима по всей длине лотка снималась секция, закрывавшая камеру, и проводились измерения продольной

осредненной скорости в створах перед камерой и после нее (рис. 3).

Концентрация песка в потоке воды изменялась от 127 до 240 мг/л. Створы, в которых измерялись осредненные скорости, выбирались таким образом, чтобы исключить влияние циркуляционных течений, возникающих в камере и за ней.

Измерения проводились микровертушкой. Всего было выполнено более 300 измерений. Глубина камеры не изменялась и была равна 8 см во всех экспериментах. Параметры потока приведены в табл. 1.

В результате осаждения песка в камере увеличивалась транспортирующая способность потока за ней, что приводило к взвешиванию частиц песка и его перемещению потоком вниз по течению. Через определенное время дно лотка за камерой освобождалось полностью от отложений частиц песка, а глубина потока несколько увеличивалась.

Для того чтобы сравнить полученные эпюры двухфазного потока с эпюрами однофазного потока, была проведена серия экспериментов на модели камеры при отсутствии частиц песка в потоке воды. Эпюры осредненных скоростей были приведены к безразмерному виду  $\bar{u}/\bar{u}_{cp} = f(h/h_{cp})$ , что позволило выполнить сравнение результатов, полученных для разных значений средних глубин  $h_{cp}$  и средних скоростей  $\bar{u}_{cp}$ .

Результаты измерений приведены на рис. 4. Анализируя полученные результаты, мы пришли к выводу, что эпюры двухфазного потока при наличии отложений песка на дне лотка имеют более пологую форму, чем эпюры однофазного и двухфазного потоков в случае отсутствия отложений.

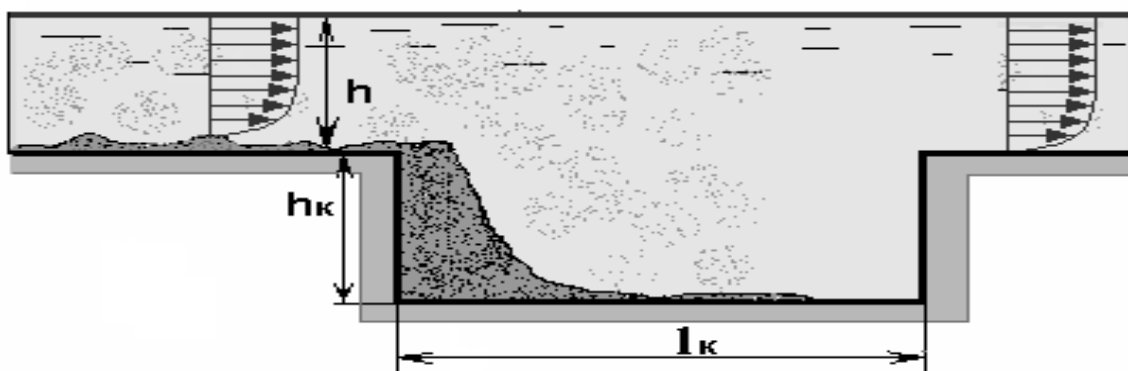


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Таблица 1

Параметры потока и дна лотков при проведении лабораторных исследований

Параметры потока	Однофазный поток			Двухфазный поток								
	Лоток с шероховатым дном (створы на входе в камеру и на выходе)			Дно лотка без отложений песка (створ за моделью камеры)			Песчаное дно лотка (створы на входе в камеру и на выходе)					
	№ серии экспериментов			№ серии экспериментов			№ серии экспериментов					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5	6
Средняя скорость, м/с	0,30 0,26	0,28 0,23	0,3 0,33	0,25	0,28	0,30	0,24	0,26	0,29	0,16	0,27 0,21	0,29
Глубина, м	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,08
Ширина, м	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,4	1,4	1,4
Число Re (10 <sup>3</sup> )	12 10,4	16,8 13,8	24 26,4	10	16,8	24	9,6	15,6	23,2	6,4	16,2 12,6	23,2

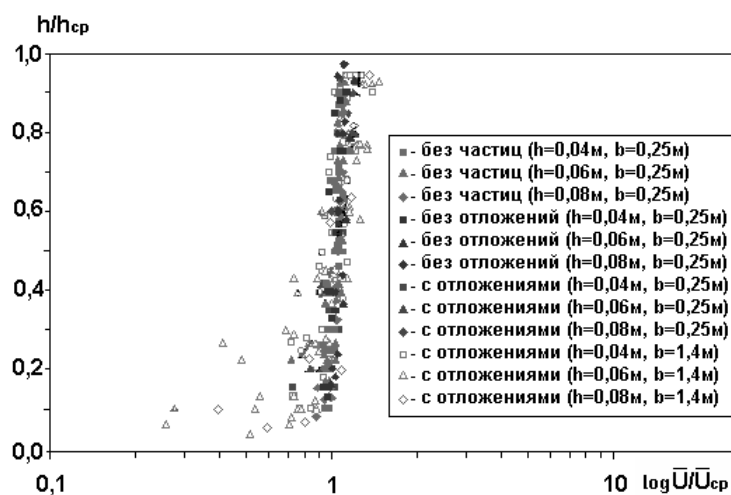


Рис. 4. Результаты измерения осредненных скоростей в лотках

Математический анализ результатов экспериментов в лотках с отложениями песка на дне (рис. 5) показал, что изменение осредненной скорости по глубине потока может быть выражено логарифмической зависимостью  $\frac{\bar{u}}{u_{cp}} = 0,212 \ln \left( \frac{h}{h_{cp}} \right) + 1,18$

(достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,66$ ). Большой разброс результатов измерений для лотка шириной  $b = 1,4$  м связан с тем, что в лотке образовались дюнно-рядовые формы отложений, что в значительной мере затруднило измерение скорости.

Анализ эпюр осредненных скоростей для однофазного потока и двухфазного при условии, когда

основная часть песка осаждается в камере, показал, что эти эпюры имеют практически одинаковую форму (рис. 6), а изменение относительной осредненной скорости по глубине потока может быть выражено функцией  $\frac{\bar{u}}{u_{cp}} = 0,07 \ln \left( \frac{h}{h_{cp}} \right) + 1,07$  ( $R^2 = 0,58$ ).

Полученный результат подтверждает известное утверждение, что при небольших концентрациях твердых частиц в потоке (менее 600 мг/л) влиянием концентрации загрязнений на форму эпюры осредненных скоростей стока можно пренебречь.

Для того чтобы установить, насколько эпюры скорости, полученные в лабораторных условиях, со-

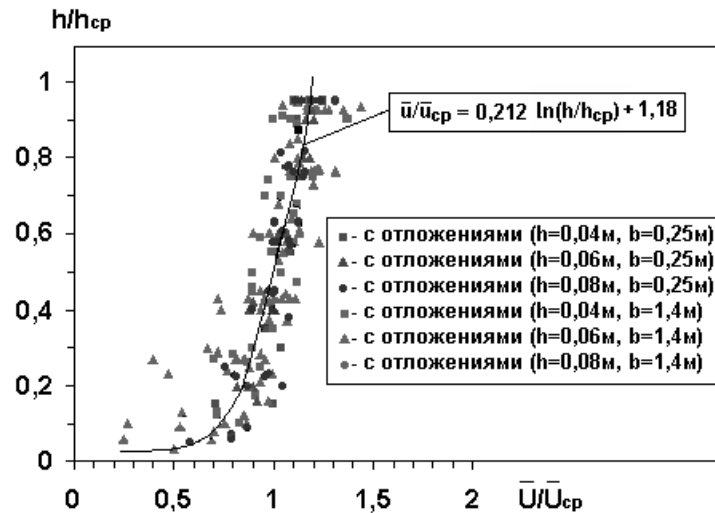


Рис. 5. Результаты измерений осредненных скоростей в лотках при наличии отложений песка на дне

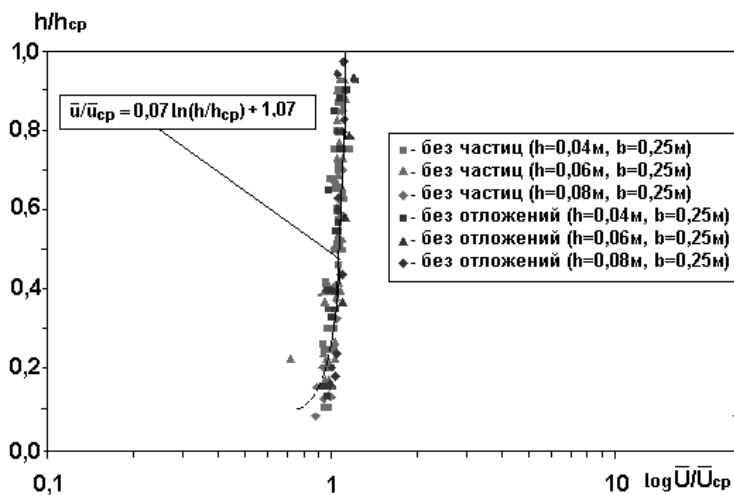


Рис. 6. Изменение относительной осредненной скорости однофазного и двухфазного потоков в лотке при отсутствии отложений песка на дне

ответствуют эпюрам, полученным в ходе измерений в реальных условиях системы водоотведения, мы выполнили анализ изменения осредненных скоростей по глубине коллекторов общесплавной канализации в районе старой застройки г. Парижа. Измерения были проведены студентами Высшей инженерной школы Ecole des Ponts Paris Tech в 2000 г. [2]. Параметры двухфазного потока в коллекторах приведены в табл. 2. Результаты измерений были использованы для построения безразмерной эпюры осредненных скоростей (рис. 7).

Анализ полученных данных показал, что в реальных условиях протекания двухфазной жид-

кости в общесплавных коллекторах при минимальном уровне сточных вод эпюра скорости изменяется по глубине по следующим логарифмическим

зависимостям: 
$$\frac{\bar{u}}{u_{cp}} = 0,434 \ln\left(\frac{h}{h_{cp}}\right) + 1,446, \quad \text{при}$$

$$(h/h_{cp}) < 0,25 \quad (R^2 = 0,48) \quad \text{и} \quad \frac{\bar{u}}{u_{cp}} = 0,085 \ln\left(\frac{h}{h_{cp}}\right) + 1,09,$$

при  $(h/h_{cp}) > 0,25 \quad (R^2 = 0,6)$ .

Сравнение полученных эпюр осредненных скоростей для коллекторов общесплавной канали-

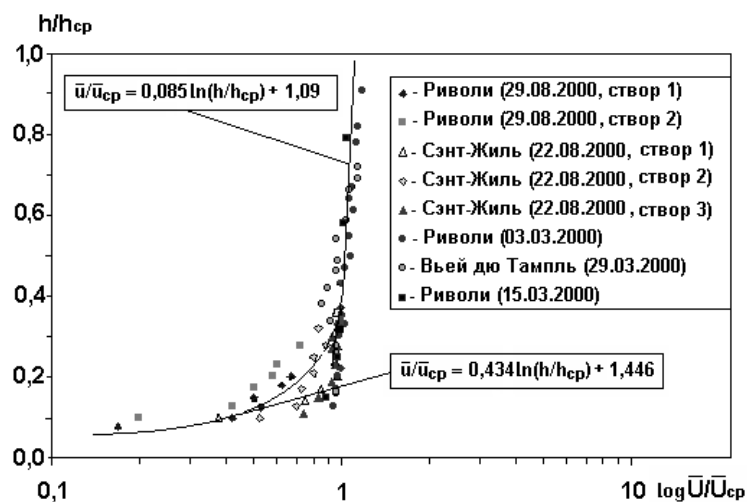


Рис. 7. Результаты измерения осредненных скоростей в коллекторах общесплавной канализации Парижа

Таблица 2

Параметры потока и состояние коллекторов в районе старой застройки Парижа

Параметры потока	Коллекторы без отложений на дне			Коллекторы с отложениями	
	Риволи (03.03.2000)	Риволи (15.03.2000)	Вьей дю Тампль (29.03.2000)	Сэнт-Жиль (22.08.2000) (3 створа)	Риволи (29.08.2000) (2 створа)
Средняя скорость, м/с	0,34	0,26	0,89	0,4	0,3
Глубина, м	0,30	0,24	0,20	0,29	0,39
Ширина, м	1,2	1,2	0,6	0,6	1,2
Число Re	68000	44600	96000	59000	70900

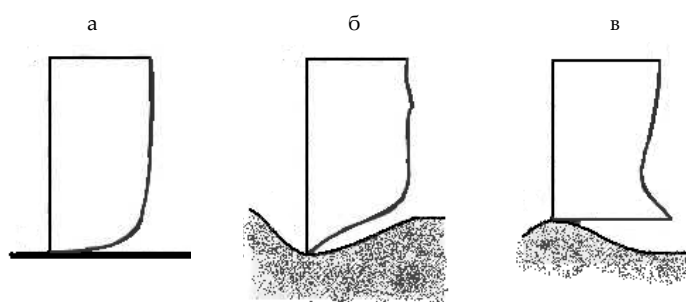


Рис. 8. Эпюры скорости при турбулентном режиме движения жидкости: а - шероховатая ровная поверхность; б - во впадине; в - на вершине гряды

зации, имеющих отложения загрязнений на дне, с зависимостями, полученными в лабораторных условиях, показало, что при  $(h/h_{cp}) < 0,25$  в коллекторе общесплавной канализации эпюра скоростей имеет более пологий характер, чем в лабораторном лотке. Вероятно, это связано с большим размером отложе-

ний на дне коллектора. Довольно большой разброс данных результатов измерений при малых глубинах потока  $(h/h_{cp} < 0,25)$  в коллекторе при наличии отложений связан со сложным рельефом дна и местным изменением эпюры скорости. Известно, что такие отложения вызывают значительное изменение

профиля эпюры осредненной скорости (рис. 8) [9]. В случае отсутствия отложений на дне при  $h/h_{cp} > 0,25$  эпюры скорости и для коллектора, и для лотка изменяются по очень близким зависимостям.

Для установления более четких зависимостей изменения формы эпюры осредненных скоростей и корректива кинетической энергии от размеров и формы отложений на дне коллектора необходимо проведение более обширных экспериментальных исследований.

Выводы:

1. Предварительные экспериментальные исследования показали, что эпюры осредненных скоростей потоков с разным количеством отложений на дне коллектора имеют разную форму и аппроксимируются разными логарифмическими зависимостями.

2. При гидравлическом расчете устройств предварительной очистки поверхностных стоков от грубодисперсных примесей необходимо учитывать изменение величины корректива кинетической энергии из-за наличия отложений загрязнений на входе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, М.И. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий [Текст] / М.И. Алексеев, А.М. Курганов. – М.: АСВ; СПбГАСУ, 2000.

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

3. Калинин, А.В. Физико-химические характеристики поверхностного стока Тольятти [Текст] / А.В. Калинин // 9-я Международная научно-техническая конференция «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России». – Пенза, 2011. – С. 42-46.

4. Chocat, B. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement [Text] / B. Chocat, et all. – Paris: Tec&Doc Ed, 1997.

5. Калинин, А.В. Пескоулавливающая камера усовершенствованной конструкции [Текст] / А.В. Калинин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 7. – С. 64-69.

6. Алексеев, М.И. Гидравлический расчет сетей водоотведения [Текст] / М.И. Алексеев, Ф.В. Кармазинов, А.М. Курганов. – СПб.: СПбГАСУ, 1997.

7. Чугаев, Р.Р. Гидравлика [Текст] / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982.

8. Калинин, А.В. Влияние русловой выемки на гидравлический режим реки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Калинин. – М.: РУДН, 1987.

9. Roch, M. Hydrologie de surface. ORSTOM [Text] / M. Roch // Gauthier-Villars. – Paris, 1963.

© Калинин А.В., 2012