

## АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ САМООЧИЩАЮЩЕЙ СКОРОСТИ В СЕТЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

А.В. Калинин

Тольяттинский государственный университет  
ул. Белорусская, 14, Тольятти, Россия, 445667

Рассмотрены аспекты определения минимальной самоочищающей скорости в сетях водоотведения поверхностного стока, механизм перемещения твердых частиц турбулентным потоком. Выполненный анализ применяемого в различных странах нормирования при строительстве водоотводящих сетей показал необходимость установления более четких критериев определения минимальной скорости движения стоков в коллекторах. Приведены результаты экспериментального исследования применения параметров Шилдса и Галилея в установлении границ между различными формами перемещения твердых частиц потоком жидкости.

**Ключевые слова:** поверхностный сток, грубодисперсные примеси, самоочищающая скорость.

Поверхностные сточные воды с урбанизированных территорий содержат большое количество загрязняющих веществ [1]. Концентрация загрязнений в стоках зависит от вида застройки и характера экономической деятельности населения территории водосбора, плотности населения, времени года и других факторов (табл. 1) [2].

Таблица 1

**Концентрация загрязнений в стоках**

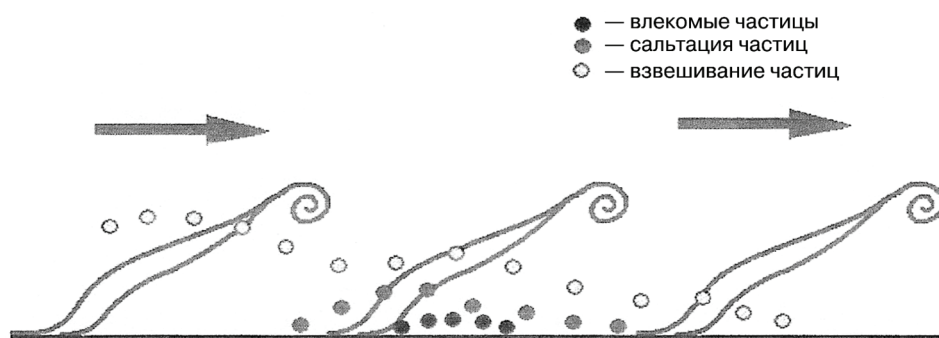
Характеристика водосборного бассейна	Дождевой сток, мг/л	Талый сток, мг/л
Жилые районы с административными, торговыми, медицинскими, учебными, и другими центрами: современная застройка; старая, не реконструированная застройка	400—600 700—1000	1300—1600 1500—1700
Территории, прилегающие к промышленным предприятиям	800—1200	2000—2500
Транспортные магистрали с интенсивным движением, промзоны	800—1400	2500—3000

По своей природе загрязнения делятся на три основные группы: минеральные; органические; биологические. Загрязнения также можно разделить на растворимые в воде (соли, щелочи) и нерастворимые (песок, глина).

Мельчайшие частицы нерастворимых загрязнений переносятся потоком воды во взвешенном состоянии (взвешенные частицы), создавая практически однородную смесь, плотность которой зависит от плотности частиц и их количества в единице объема воды. Крупные частицы перекатываются или скользят по дну коллектора (влекомые частицы), иногда совершая прыжки на небольшую высоту, не превышающую трех диаметров частицы. Отдельные частицы могут совершать прыжки на высоту, превышающую 10 диаметров, отрываясь от поверхности трубы на непродолжительное время. Такое движение частиц называется сальтацией. Мелкодисперсные примеси могут образовывать более крупные элементы за счет соединения битумными или жировыми прослойками. Деление примесей

по способу их перемещения в потоке жидкости на взвешенные и влекомые относительно, так как при малых скоростях движения воды частицы осаждаются и перемещаются потоком вдоль дна коллектора. С увеличением скорости жидкости они вновь переходят в верхние слои потока и движутся во взвешенном состоянии.

Основным фактором, влияющим на процесс отрыва частиц от дна коллектора и поддержания их во взвешенном состоянии, является турбулентность. Доказано [3], что независимо от способа перемещения частиц их движение начинается при прохождении очередной турбулентной структуры, называемой вихревой заколкой (hairpin vortex). Попадая в зону вертикальных выбросов (ejection) у основания ножек вихревой заковки, частица испытывает силовое воздействие, которое может только переместить частицу вдоль дна (волочение) или заставить сделать небольшой прыжок (сальтация) (рис. 1). В этом случае полученный частицей вертикальный импульс не позволяет ей, следуя движению турбулентной структуры, достичь зоны максимальных турбулентных напряжений. Если частица достигает этой зоны, то она длительное время находится в поле действия выброса, а после выхода из этой зоны она может быть подхвачена другой турбулентной структурой и т.д.



**Рис. 1.** Формы перемещения твердых частиц турбулентными структурами

Количество твердых частиц, транспортируемых потоком в единицу времени через данное сечение трубы, обычно называется расходом твердого стока. Транспортирующая способность потока — предельный расход твердых частиц, который способен переносить поток при данной скорости течения в рассматриваемом сечении коллектора. Транспортирующая способность потока чаще всего не соответствует расходу твердого стока, так как определяется гидравлическими характеристиками потока на данном участке, а расход твердого стока зависит от количества загрязнений, поступающих с вышележащего участка, и их физическими характеристиками (гранулометрический состав, плотность, форма). В случае если транспортирующая способность потока в данный момент времени меньше расхода твердого стока, происходит осаждение частиц и их накопление на дне коллектора, в противном случае наблюдается отрыв частиц от дна трубы и их взвешивание, эрозия слоя отложений. Необходимо отметить, что прежде всего происходит отложение примесей минерального происхождения, обладающих большой плотностью, и эрозия загрязнений органического происхождения, которые имеют меньшую плотность.

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

Для того чтобы неподвижная частица начала перемещаться потоком жидкости, необходимо, чтобы в данной точке потоком было создано минимальное сдвигающее усилие. Напряжение сдвига должно быть как минимум равно напряжению трения на стенке трубы  $\tau_0$ , которое можно определить из основного уравнения установившегося равномерного движения жидкости:

$$\frac{\tau_0}{\gamma} = RJ, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельный вес;  $R$  — гидравлический радиус;  $J$  — уклон свободной поверхности.

Зная минимальное напряжение трения  $\tau_0$ , при котором происходит отрыв и перемещение частиц, можно установить величину самоочищающей скорости и минимальный уклон трубы, обеспечивающий транспорт всех поступающих с водосбора загрязнений. В развитых странах приняты строительные нормы, устанавливающие минимальные значения самоочищающей скорости или минимального напряжения трения (табл. 2) [5]. Необходимо отметить, что, за исключением Германии, нормативные значения минимальных уклонов практически не применяются.

Таблица 2

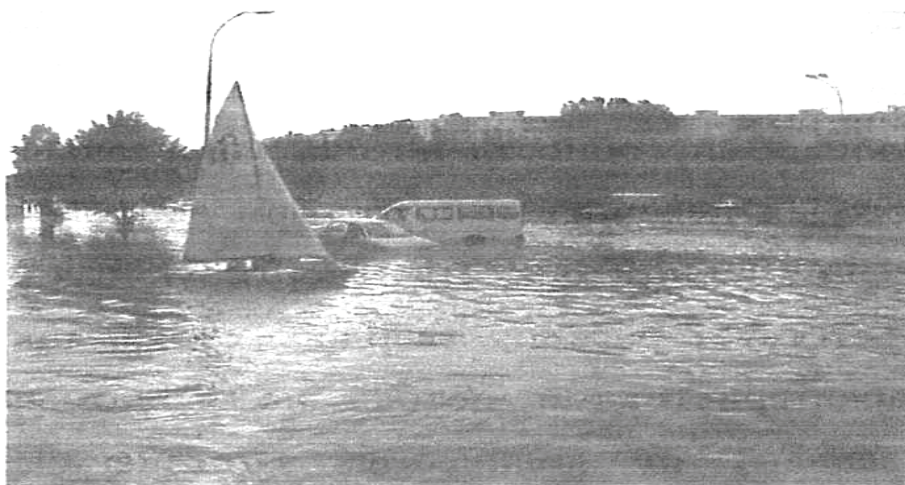
**Минимальные значения самоочищающей скорости**

Страна	Нормативный документ	Система водоотведения	Расход	Степень заполнения трубы	Диаметр труб, м	Напряжение трения, н/м <sup>2</sup>	Минимальная скорость, м/с
Россия	СНиП 2.04.03-85	Бытовая и дождевая	—	0,6—0,8	0,15 — > 1,5	—	0,7—1,5
Франция	Техническая инструкция, 1977	Общесплавная и дождевая	0,1 расхода при полном заполнении трубы	—	—	—	> 0,6
			0,01 расхода при полном заполнении трубы	—	—	—	> 0,3

Окончание

Страна	Нормативный документ	Система водоотведения	Расход	Степень заполнения трубы	Диаметр труб, м	Напряжение трения, н/м <sup>2</sup>	Минимальная скорость, м/с
Евросоюз	EN-752-4	Общесплавная	—	—	—	—	> 0,7
США	ASCE, 1981 Yao	дождевая	—	0,5—1,0	—	3,0—4,0	0,9
Англия	BSI, 1986, Maguire	Общесплавная и дождевая	—	1,0	—	—	1,0
				0,5—1,0			6,2
Германия	Bielecki, 1982 Bischoff, 1976	Все типы	—	1,0	> 1,0	2,5	1,5
				0,2	—	—	0,5
Норвегия	Lindholm, 1984	Дождевая	—	—	—	2,0	—
Швеция	Scandiaconsult, 1974	Все типы	—	—	—	1,0—1,5	—

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 2004 г. в результате ливня выпало 47,7 мм осадков (78% от месячной нормы), что привело к затоплению обширной территории (рис. 2).



**Рис. 2.** Улицы г. Тольятти после ливня (2004 г.)

Вместе с тем поверхностный сток Тольятти не отличается высокой концентрацией загрязняющих веществ, что показали исследования, проведенные с 2006 по 2008 г. департаментом жилищно-коммунального хозяйства мэрии городского округа на выходе главного ливневого коллектора с территории жилой застройки Автозаводского района [6].

Регулярная очистка сетей водоотведения от отложений грубодисперсных примесей представляет определенные трудности и требует выделения значительных средств. Например, в 1979 г. муниципалитет г. Тулузы вынужден был затратить на очистку 930 км ливневой канализации 7700 тыс. французских франков ( $\approx 1174$  тыс. евро). В таблице 3 представлено среднее количество песка и других грубодисперсных примесей, которое муниципальные службы французских городов в течение года извлекают из коллекторов общесплавной канализации [7].

Таблица 3

**Среднее количество песка и других грубодисперсных примесей**

Город	Численность населения, тыс. человек	Площадь территории, тыс. га	Объем грубодисперсных примесей, тыс. т
Бордо	400	35	9 500
Гавр	200	4	2 280
Лион	1 200	50	19 380
Марсель	960	60	17 510
Нанси	260	16	5 138
Париж	2 500	10	28 500

Проведенные в последнее время многочисленные исследования сетей водоотведения городов различных стран показали, что назрела необходимость уточнения действующих норм и формул для определения количества твердых частиц, перемещаемых потоком воды в сетях водоотведения. Эти формулы можно разделить на два больших класса:

- для расчета расхода влекомых и сальтирующих частиц;
- для расчета взвешенных частиц.

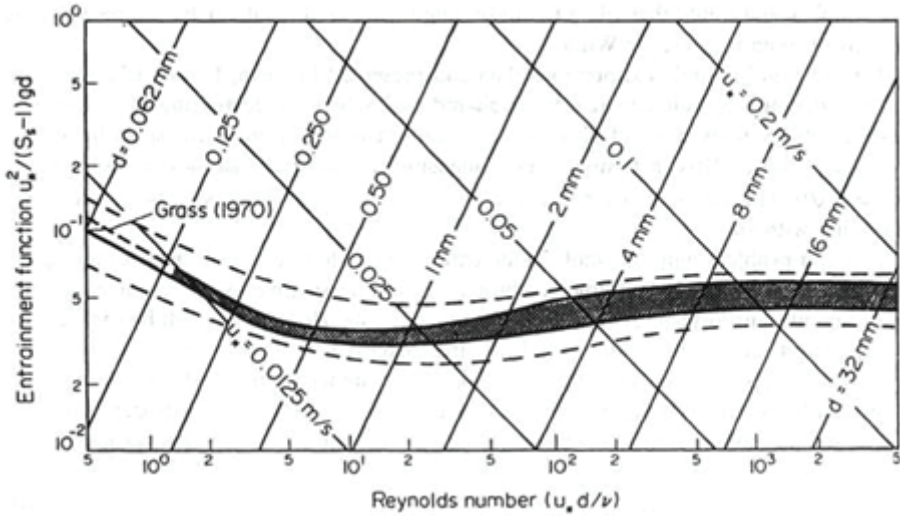
К первому классу формул относятся часто применяемые в математических моделях формулы Мейера—Петера и Мюллера [8], Багнольда [9] и Ванони [10]. В основе этих формул лежит понятие критического напряжения трения на стенке трубы в интерпретации Шилдса [11], который впервые предложил безразмерный параметр для определения начала движения несвязных твердых частиц:

$$\theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d}, \quad (2)$$

где:  $\tau = \rho u_*^2$  — напряжение трения на дне трубы,  $u_* = \sqrt{Rig}$  — динамическая скорость;  $R$  — гидравлический радиус;  $i$  — уклон свободной поверхности;  $\rho_s$  — плотность частицы;  $\rho$  — плотность воды;  $d$  — средний диаметр частиц.

Безразмерный параметр Шилдса фактически является отношением гидравлических параметров потока к гидравлическим характеристикам частицы.

Родкиви [12] обобщил результаты многочисленных экспериментальных исследований, целью которых являлось изучение влияния различных факторов на условия начала движения частиц. Результаты он представил в виде графика (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость параметра Шилдса от числа Рейнольдса частицы по Родкиви [12]

Необходимо отметить, что разброс экспериментальных данных связан с тем, что параметр Шилдса не учитывает многие факторы, в том числе и такие, как форма поверхности дна. Также недостатком математических моделей, использующих данный параметр, является предположение, что напряжение трения остается постоянным по всему слою перемещающихся частиц и что все частицы начинают движение одновременно.

Взвешивание частиц в турбулентном потоке жидкости происходит при больших значениях параметра Шилдса [13]. Для определения количества перемещаемых потоком взвешенных частиц применяются такие параметры, как концентрация частиц и гидравлическая крупность. Чаще всего в математических моделях применяются формулы, предложенные Ван Рийном [14], Роузом [15], Великановым [16] и др., но расчет по этим формулам дает различный конечный результат, так как для определения порога взвешивания принимаются разные критерии.

В коллекторах водоотведения, также как и в руслах рек и каналов, твердые частицы (песок) перемещаются по дну водотока в виде малых или больших гряд или дюн. Грядами называют повышение донного рельефа вытянутой треугольной формы. Размеры мелких гряд (по ширине и по высоте) малы по сравнению с размерами русла. Гряды увеличивают шероховатость русла, но одновременно они увеличивают транспортирующую способность потока за счет возрастания пульсаций скорости в придонной области. Размеры гряд зависят от размеров и типа перемещаемых частиц, но не зависят от глубины потока. При увеличении скорости потока и диаметра частиц мелкие гряды трансформируются в крупные донные образования, высота и ширина которых соизмеримы с глубиной и шириной водотока (крупные гряды или дюны). Крупные гряды в основном возникают в больших коллекторах. Они определяют облик рельефа дна коллектора, обуславливая изменения его глубины и ширины, влияют на изменение гидравлических характеристик потока. Изучению движения донных форм в руслах рек и в водоотво-

дящих сетях посвящены многочисленные исследования, но пока не предложены критерии, позволяющие определить границу, когда начинается или заканчивается образование тех или иных донных форм.

Автором данной статьи были проведены экспериментальные исследования по изучению движения твердых частиц в различных формах по дну канала прямоугольной формы. Исследования проводились на кафедре гидравлики и гидротехнических сооружений Российского университета дружбы народов на лабораторном зеркальном (8,0×0,25×0,3 м) и русловом (25×1,4×0,5 м) лотках. Глубина потока в экспериментах составляла 4, 6, 8, 12, 14 и 16 см, скорость на оси лотка изменялась от 7,1 до 30,2 см/с. В качестве твердых частиц использовался однородный песок диаметром 0,35 мм. Всего было выполнено 20 опытов. Известно, что форма движения частиц по дну канала зависит от трех групп параметров: 1) параметров, зависящих от характеристик самих частиц (форма, плотность, размер, концентрация); 2) параметров, связанных с характеристиками потока жидкости (расход, средняя скорость, турбулентность, вязкость, плотность, уклон свободной поверхности); 3) параметров самой экспериментальной установки (размеры, наклон, способы измерения и обработки данных). При проведении экспериментов основное внимание уделялось второй группе параметров.

Визуальные наблюдения показали, что при небольших скоростях движения воды наблюдается спорадическое движение отдельных частиц, которые перемещались вдоль плоского песчаного дна до тех пор, пока не находили промежутков между другими частицами, т. е. обретали более стабильное положение. Через определенный период времени все движущиеся частицы приобретали положение, соответствующее большему равновесию, и твердый расход становился равным нулю. На этом процесс реформирования дна заканчивался.

Если скорость потока увеличивалась, то движение твердых фракций возобновлялось, становилось более интенсивным. При достижении определенной величины средней скорости твердый расход становился постоянным и не прекращался. Мы пришли к выводу, что начало движения отдельных частиц не означает появления постоянного твердого расхода. Соответственно, существует два критических значения числа Шилдса: при первом значении начинается движение отдельных частиц, при втором значении можно говорить о минимальном, но постоянном твердом расходе. Нам представляется более важным изучение второго значения критерия Шилдса, так как в этом случае на результаты исследования не влияет такая случайная характеристика, как взаиморасположение частиц на дне трубы.

С увеличением расхода жидкости происходит отрыв от дна не отдельных частиц, а их групп. Частицы двигались вдоль дна, останавливаясь на короткое время и образуя небольшие возвышения, которые затем реформировались в небольшие гряды. Образование небольших песчаных гряд происходило по всей длине лотка. Размер гряд увеличивался при увеличении расхода и концентрации частиц. В зеркальном лотке гряды располагались почти параллельно одна другой. В русловом лотке при тех же глубинах, но при увеличении твердого расхода

наблюдалось возникновение более крупных грядовых форм, похожих на небольшие дюны неправильной формы, соединенных между собой грядовыми формами, и расположенных хаотично по площади лотка.

В ходе экспериментов была сделана попытка найти критерий, позволяющий установить границу образования различных донных форм. Было предложено использовать два критерия: критерий Шилдса и критерий Галилея. Числом Галилея в механике жидкости и газа называется безразмерная величина, являющаяся отношением силы тяжести к силам, поддерживающим частицу во взвешенном состоянии:

$$Ga = \frac{d^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2}, \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости.

Полученные результаты экспериментального исследования вполне соответствуют результатам, полученным Мюйерон-Арнульд в 2002 г. [17] (рис. 4).

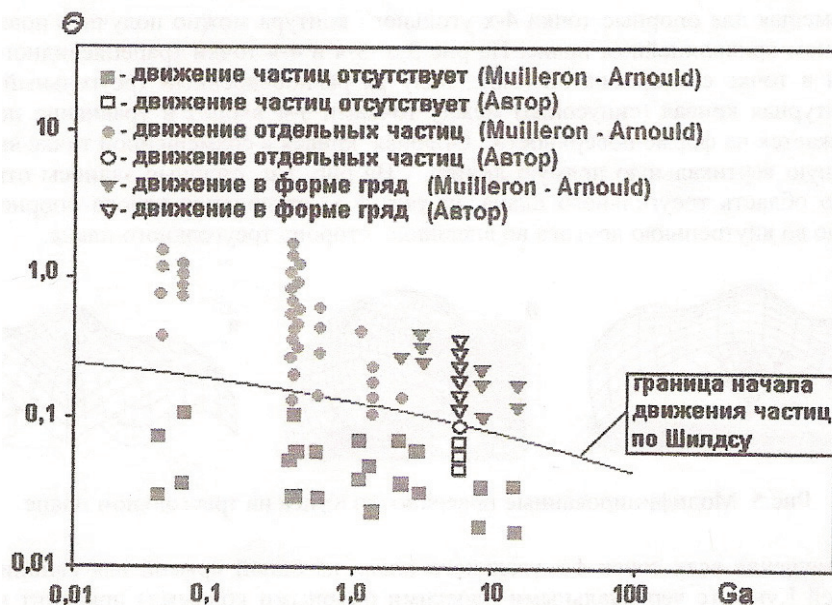


Рис. 4. Зависимость параметра Шилдса от числа Галилея

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что параметры Шилдса и Галилея могут служить критериями, позволяющими установить границу между областью, когда частицы не перемещаются по дну трубы, и областью, когда наблюдается минимальный постоянный твердый расход. Вместе с тем пока еще сложно делать выводы о возможности использования этих параметров для установления границы перехода одних форм транспорта твердых частиц в другие. Это связано с недостаточным количеством имеющихся экспериментальных данных. Продолжение экспериментальных исследований в этом направлении позволит решить эту задачу, построить более точную модель движения несвязных грубодисперсных примесей в сетях водоотведения поверхностного стока.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гриднева М. А. Совершенствование отведения и очистки поверхностных сточных вод урбанизированных территорий: Дисс. ... канд. техн. наук. — Самара, 2004.
- [2] Алексеев М.И., Курганов А.М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. — М.: АСВ; СПбГАСУ, 2000.
- [3] Le Louvetel-Poill J., Bigillo F., Champagne J.Y. Influence de la turbulence sur le transport de sédiments / 18 Congrès Français de Mécanique 2007, Août 27—31, Grenoble, France — pp. 1—6.
- [4] Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. — М.: АСВ, 2002.
- [5] Chocat B. et all. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. — Paris: Tec&Doc Ed, 1997. — 1124 p.
- [6] Буй М.С. Отведение поверхностного стока с территории Автозаводского района г. о. Тольятти: Выпускная дипломная работа. — Тольятти, 2009.
- [7] Sanchez Y. Curage des ouvrages visitables des réseaux d'assainissement. Synthèse des principales méthodes appliquées en France / TSM — L'Eau, 2/87, 1987. — pp. 91—97.
- [8] Meyer-Peter E., Muller R. Formulas for bed-load transport / In 2<sup>nd</sup> meeting international association, 1948. — pp. 36—64.
- [9] Bagnold R.A. The nature of saltation onde “bed-load” transport in water / Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical Sciences, 332, 1973. — pp. 473—504.
- [10] Vanoni V.A. Sediment transportation mechanics: Initiation of motion / Journal of Hydraulic Engineering, 92, 1966. — pp. 291—312.
- [11] Shields A. Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement. US Dept of Agr., Soil Conservation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif. 1936.
- [12] Raudkivi A.J. Loose Boundary Hydraulics. A.A. Balkema, 1<sup>st</sup> edition, 1998.
- [13] Nino Y., Lopez F. and M., Garcia H. Threshold for particle entrainment into suspension // Sedimentology 50 (2), 2003 — pp. 247—263.
- [14] Van Rijn L.C. Sediment transport, Part 2: suspended load transport // Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 110 (11), 1984. — pp. 1613—1641.
- [15] Rouse H. Modern conception of the mechanics of turbulence // Transaction ASCE 102, 1937. — pp. 463—505.
- [16] Велкканов М.А. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1949.
- [17] Muilleron-Arnould H. Instabilités d'un milieu granulaire cisailé par un fluide. Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier — Toulouse 3, 2002.

## ASPECTS OF FINDING THE MINIMUM VELOCITY OF SELF-PURIFICATION IN STORM SEWER NETWORKS

A.V. Kalinin

Togliatti State University  
Belarusian str., 14, Togliatti, Russia, 445667

Aspects of finding the minimum rate of self-purification in storm sewer networks are considered. The mechanism of solid particles movement caused by turbulence flow is considered. Performed analysis of storm sewer networks building regulation in different countries has shown, that it is necessary to set clearer criterions for determination of runoff water minimum velocity in pipes. Results of the experimental research of using Shields and Galilee parameters for finding limits between different forms of solid particles movement caused by fluid flow are presented.

**Key words:** runoff water, solids, velocity of self-purification.