

Е.А. Пугачев

# ОЧИСТКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД МЕГАПОЛИСА



**Е.А. Пугачев**

**ОЧИСТКА ГОРОДСКИХ  
СТОЧНЫХ ВОД МЕГАПОЛИСА**



Издательство АСВ  
Москва  
2013

*Рецензенты:*

заместитель генерального директора ОАО «МосводоканалНИИпроект»,  
доктор технических наук, профессор *О.Г. Примин*;

заведующая кафедрой «Коммунальное и промышленное водопользование»  
ФГБОУ ВПО «Московская государственная академия коммунального  
хозяйства и строительства», доктор технических наук, профессор  
*И.И. Павлинова*

**Пугачев Е.А.**

Очистка городских сточных вод мегаполиса: Монография.  
– М.: Издательство АСВ, 2013. – 136 с.

ISBN 978-5-93093-928-6

В монографии содержатся сведения, связанные с изменением качества городских сточных вод и модернизацией очистных сооружений, обеспечивающих устойчивое и безопасное развитие социума в изменяющихся социальных и экономических условиях.

Излагаются вопросы рационального водопользования в бытовом и производственном секторах, способствующего сокращению удельного водопотребления и водоотведения и повышению концентрации загрязнений, а также особенности очистки высококонцентрированных сточных вод, описываются пути разработки маловодоемких оборотных водных технологий.

ISBN 978-5-93093-928-6

© Издательство АСВ, 2013  
© Пугачев Е.А., 2013

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>Глава 1. ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ</b> .....	6
1.1. Изменение состава стоков и требование к их очистке .....	6
1.2. Трансформация технологии механической очистки сточных вод .....	9
1.2.1. Процессы процеживания. Решетки .....	9
1.2.2. Песколовки .....	29
Горизонтальные песколовки .....	46
Вертикальные песколовки .....	49
Тангенциальные песколовки .....	49
Аэрируемые песколовки .....	50
1.2.3. Процессы первичного отстаивания. Отстойники ..	59
Первичные отстойники .....	64
<b>Глава 2. ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ</b> .....	73
2.1. Основные задачи модернизации .....	73
2.2. Опыт использования биологических методов удаления азота и фосфора на КСА и ЛбСА .....	74
2.3. Модернизация систем аэрации существующих аэротенков .....	78
2.4. Модернизация вторичных отстойников .....	80
2.5. Повышение дозы ила в аэротенках .....	89
Полупромышленные исследования полочных модулей .....	93
<b>Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКИ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД</b> .....	97
3.1. Основные технологические задачи .....	97
3.2. Изучение процессов биологической очистки высококонтцентрированных сточных вод .....	97
3.2.1. Многоступенчатые аэротенки для очистки	

неразбавленных шерстомойных вод.....	98
3.2.2. Технологический анализ и кинетика сооружений аэробной биологической очистки промышленных сточных вод.....	112
3.3. Интенсификация работы сооружений биологической очистки высококонцентрированных промстоков .....	127
3.4. Двухступенчатые метантенки анаэробной очистки высококонцентрированных шерстомойных сточных вод.....	129
3.5. Разработка замкнутой водной технологии.....	130
<b>Заключение</b> .....	133
<b>Литература</b> .....	134

## ВВЕДЕНИЕ

При разном качестве городских сточных вод достижение высокой эффективности их очистки обычно обеспечивается работой сооружений механического и биологического блоков. Блок сооружений механической очистки включает решетки, песколовки, первичные отстойники. Исследования МГСУ, МГП «Мосводоканал», ГУП «Институт МосводоканалНИИпроект», ФГУП «НИИ ВОДГЕО», ОАО НИИ КВОВ и т.д. показали сильное влияние действия сооружений механической очистки на эффективность работы всех последующих очистных сооружений и соответственно на качество очищенного стока.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на кафедре «Водоотведение и водная экология» при непосредственном участии автора, а также анализируется накопленный за последние 15–20 лет опыт проектирования, реконструкции и строительства систем водоотведения крупных городских комплексов, а также делается прогноз развития водоотводящих систем на перспективу.

Автор настоящего научного труда на основании выполненных им исследований отразил основные задачи модернизации водоочистных сооружений мегаполисов. Научная школа по интенсификации методов очистки сточных вод, созданная в стенах МГСУ почетным профессором и академиком РАН и РААСН С.В. Яковлевым в середине XX столетия, продолжает успешно развиваться и в новых исторических, политических, экономических и социальных условиях начала XXI столетия в МГСУ и других институтах водохозяйственной сферы.

Разработки выполняли ученики С.В. Яковлева доктор технических наук профессор Ласков Ю.М., кандидат технических наук профессор Калищун В.И., кандидат технических наук профессор Николаев В.Н., доктор технических наук, профессор Воронов Ю.В., автор настоящего труда и многие другие последователи, продолжают успешно разрабатывать и внедрять новые водные эффективные системы и технологии, что подтверждается прошедшими VI Яковлевскими чтениями, посвященными водоснабжению и водоотведению мегаполиса, в которых приняли участие крупные ученые, профессора, доценты, научные сотрудники, аспиранты и докторанты ведущих вузов Российской Федерации, сотрудники НИИ, научная общественность, руководители государственных и коммерческих организаций.

Работы, выполненные всеми последователями, равно как и настоящий труд, рассчитаны на научных, инженерно-технических работников, специалистов проектных и производственных организаций, работающих в данной сфере, а также студентов и аспирантов высших учебных заведений.

# Глава 1. ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

## 1.1. Изменение состава стоков и требования к их очистке

Радикальные экономические реформы, приведшие к закрытию и перепрофилированию тысяч убыточных и малорентабельных промышленных предприятий с устаревшими технологиями, вызвали сокращение сбросов промстоков в городские водоотводящие сети и ощутимо повлияли на изменение состава сточных вод на городских станциях аэрации. По данным МГП «Мосводоканал», содержание тяжелых металлов как одного из основных компонентов в промстоках, поступающих на Люберецкую и Курьяновскую станции аэрации, сократилось за последние годы в 5–10 раз. Действующая на станциях технология полной биологической очистки сточных вод позволяет изымать 75–80% от исходного содержания тяжелых металлов, что составило за 2003 г. 530 т. Тем не менее, величины ПДК тяжелых металлов для осадков 1-го класса не превышаются (табл. 1.1). Следует также отметить, что по осредненным данным содержание всех тяжелых металлов после выпусков Курьяновской (КСА) и Люберецкой (ЛБСА) станций аэрации меняется незначительно (в пределах точности определения (табл. 1.2)).

*Таблица 1.1*

**Содержание потенциально опасных элементов в осадках станций аэрации г. Москвы и их предельнодопустимое содержание при использовании в качестве удобрения в разных странах**

Элемент	Концентрация элементов в сброженном осадке, мг/кг	Среднее содержание в конечном компосте, мг/кг	Предельно допустимые концентрации элементов в осадках сточных вод, используемых в качестве удобрений, мг/кг	
			Россия, осадки 1-го класса	США, осадки класса А
Cd	6,43	5,4	15	20
Zn	710	660	1750	1400
Cu	301	223	750	750
Cr	285	266	500	1500
Ni	33,4	41	200	210
Pb	46,9	42,0	250	150
Hg	0,54	0,5	7,5	8
As	5,95	4,5	10	–

Кроме существенного снижения содержания тяжелых металлов, связанного с кардинальной перестройкой сферы промышленного производства, в городских сточных водах значительно возросло содержание песка, особенно его мелких фракций, крупностью менее 0,25 мм. Замерить количество песка в сточной воде прямым путем практически невозможно. Поэтому наиболее объективным косвенным методом оценки количества песка в сточных водах является содержание песка в осадке первичных отстойников. Опыт эксплуатации первичных отстойников КСА показал, что содержание песка в осадке может достигать 10%, что крайне отрицательно сказывается на работе метантенков и илопроводов и требует проведения работ по выделению песка из осадка перед его подачей в метантенки.

Также весьма показательна характеризует фактическое содержание песка в городских стоках работа песколовок на снегосплавных камерах (СПК) г. Москвы. В ходе эксплуатации СПК установлено, что песколовки 25-ти СПК, рассчитанные на 10–30 минут пребывания стоков, за зимний период (декабрь–март) 2002–2003 гг. задерживали около 73 тыс. т. песка и мусора, причем значительная часть песка представлена мелкими фракциями крупностью 0,05–0,1 мм.

Полученные данные свидетельствуют о том, что частицы песка попадают в городские коллекторы при инфильтрации части грунтового стока, особенно в периоды зимних оттепелей и весеннего таяния снега. Вполне естественно, что песколовки городских станций аэрации, рассчитанные на 1,0–1,5 мин пребывания стоков, не в состоянии уловить такой песок и его выносит в первичные отстойники. Эта проблема требует своего решения, несмотря на достигаемую высокую степень очистки воды на станциях аэрации по большинству контролируемых показателей.

Действительно, выпуски очищенных вод КСА и ЛбСА практически не оказывают существенного влияния на величину следующих показателей качества р. Москвы:

- взвешенные вещества;
- БПК<sub>5</sub>;
- ХПК;
- нефтепродукты;
- фенолы.

Величина показателей качества воды по ХПК, фенолам и нефтепродуктам в большей мере изменяется между выпусками КСА и ЛбСА за счет вторичного загрязнения воды донными отложениями предыдущих десятилетий и несанкционированных сбросов по водо-



стокам, нежели в результате поступления очищенных городских сточных вод с этих станций (см. табл. 1.2).

В то же время сбросы очищенных сточных вод станций аэрации оказывают существенное влияние на содержание биогенных элементов в реке Москве, увеличивающееся в 2–3 раза после выпусков и превышающее величины ПДК (см. табл. 1.2). Последнее вполне закономерно, так как реализованные на КСА и ЛбСА схемы полной биологической очистки и не предусматривали удаление азота и фосфора. Следовательно, вопрос трансформации существующих технологических схем в сторону реализации на станциях аэрации биологических методов удаления азота и фосфора является крайне актуальным.

Одновременно следует отметить, что достигаемое при полной биологической очистке снижение величин БПК<sub>5</sub> и концентрации взвешенных веществ в очищенной воде до 8–12 мг/л является вполне достаточным даже для р. Москвы, где соотношение речной и сточной воды 1:1. Процессы самоочищения активно идут в р. Москве после выпуска КСА и в р. Пехорка после выпуска ЛбСА, поэтому величина БПК<sub>5</sub> в р. Москве ниже ЛбСА становится ниже ПДК. С учетом вышеизложенного становится очевидной технологическая бесполезность доочистки воды на скорых песчаных фильтрах, которую никогда и не применяли в Европе. Более того, выносимые из вторичных отстойников иловые частицы активно участвуют в процессах самоочищения водоемов и при наличии в них запасов растворенного кислорода обеспечивают доочистку воды в естественных условиях.

Вместе с тем, как видно из табл. 1.2, выпуски очищенной воды с КСА и ЛбСА оказывают существенное влияние на величину ХПК и содержание биогенных элементов в р. Москве, что требует соответствующей трансформации технологии биологической очистки городских сточных вод.

## **1.2. Трансформация технологии механической очистки сточных вод**

### **1.2.1. Процессы процеживания. Решетки**

Эффект работы канализационных решеток и каналов, в которых они устанавливаются, во многом зависит от правильного их гидравлического расчета. Одним из вопросов гидравлического расчета решеток является вопрос об определении потерь напора.

Потери напора, вызываемые решетками, определяются по формуле:

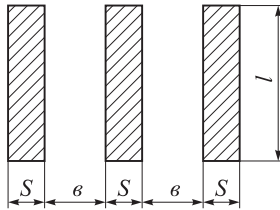
$$h_{\text{пот}} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (1.1)$$

где  $v$  – средняя скорость перед решеткой;  
 $g$  – ускорение силы тяжести;  
 $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления решетки.

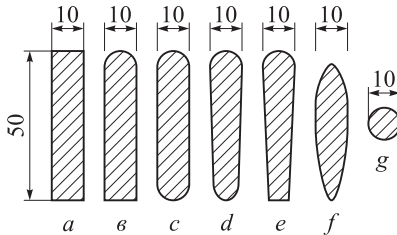
Коэффициент местного сопротивления решетки обычно рекомендуется определять по формуле Киршмера [1]:

$$\zeta = \beta \left( \frac{s}{b} \right)^3 \sin \alpha, \quad (1.2)$$

где  $s$  – толщина стержней;  
 $b$  – ширина прозоров между стержнями (рис. 1.1);  
 $\beta$  – коэффициент, зависящий от формы стержней, значение которого может приниматься по табл. 1.3 и рис 1.2;  
 $\alpha$  – угол наклона решетки к горизонту.



**Рис. 1.1.** Поперечное сечение по стержням решетки



**Рис. 1.2.** Профили стержневой решетки

Для расчета решеток может быть использована формула А.Р. Березинского [1]:

$$\zeta = k \left( \frac{s}{s+b} \right)^{1,6} \left[ 2,3 \left( \frac{l}{b} \right) + 8 + 2,4 \left( \frac{b}{l} \right) \right] \sin \alpha, \quad (1.3)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от формы стержней, значение которого может приниматься по табл.1.3 и рис 1.2;  
 $l$  – ширина стержней (рис. 1.1).

Таблица 1.3

Значение коэффициентов  $\beta$  в формуле (1.2) и  $k$  в формуле (1.3)

Форма стержня	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$
$\beta$	2,42	1,83	1,67	1,035	0,92	0,76	1,79
$k$	<u>0,500</u>	0,37	<u>0,32</u>	0,21	<u>0,18</u>	0,15	0,36

Формула (1.3) учитывает зависимость коэффициента  $\zeta$  от степени стеснения потока решеткой  $\left(\frac{s}{s+b}\right)$  и относительной ширины

стержней  $\frac{l}{b}$ . Из опытов значения  $k$  были получены лишь для трех видов стержней (эти значения в табл.1.3 подчеркнуты). В.Б. Дульнев [1], основываясь на закономерной связи между значением  $\beta$  в формуле (1.2) и значением  $k$  в формуле (1.3) для исследованных стержней  $\left(\frac{k}{\beta} = 0,2\right)$ , определил значения  $k$  и для других видов стержней.

Полученные таким образом величины  $k$  приведены также в табл. 1.3.

Формулы (1.2) и (1.3) не учитывают влияния на потери напора элементов жесткости и каркаса (рам) решеток и загрязнений. Поэтому применение этих формул для расчета канализационных решеток без соответствующих коррективов не может дать достаточно удовлетворительных результатов.

При устройстве решеток с механической очисткой канал, в котором устанавливается решетка, с боков стесняется (сужается) рамой и кожухом (ограждением) цепей, перемещающих грабли. При этом поток перед входом в решетку сужается с ширины  $B_k$  до  $B$  (рис. 1.3), а за решеткой вновь расширяется.

Проведенные нами вычисления для возможных в практике размеров решеток показали, что потери напора, возникающие от указанных сужения и расширения, незначительны и ими можно пренебречь. Однако для удобства расчетов целесообразно определять потери напора в решетках в долях от скоростного напора в канале, а не перед решеткой, как это следует из формулы (1.1), т.е. по формуле

$$h_{\text{пот}} = \zeta_k \frac{v_k^2}{2g}, \quad (1.4)$$

где  $v_k$  – скорость в канале перед решеткой;

$\zeta_k$  – коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости  $v_k$ .

Учитывая, что

$$q = \omega_k v_k = \omega v, \quad (1.5)$$

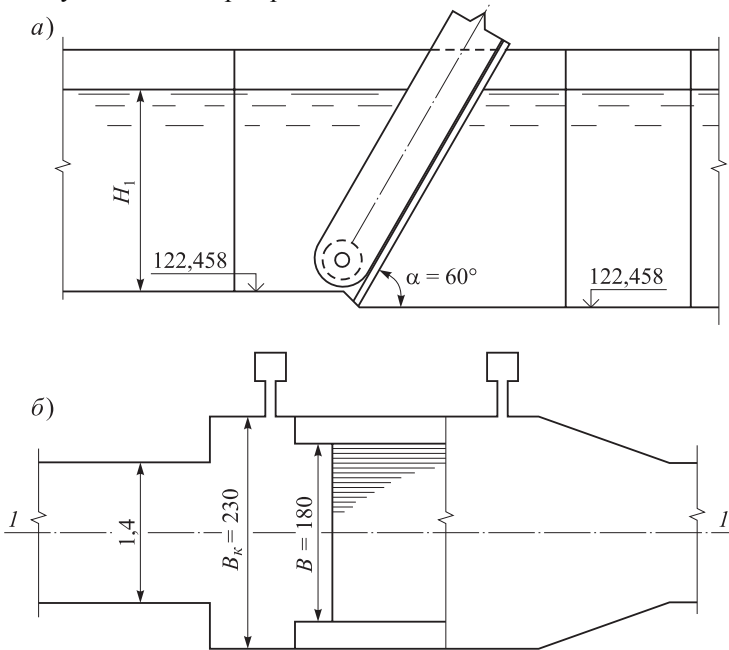
где  $\omega_k$  – площадь живого сечения канала;  
 $\omega$  – площадь сечения всей решетки;

или

$$B_k H_1 v_k = B H v, \quad (1.6)$$

$$v^2 = \left( \frac{B_k}{B} \right)^2 v_k^2, \quad (1.7)$$

где  $B_k$  – ширина канала;  
 $B$  – ширина решетки;  
 $H_1$  – глубина воды перед решеткой.



**Рис. 1.3.** Схема канала и решетки с механической очисткой:  
 а – разрез по 1-1; б – план

Подставляя значение  $v^2$  из (1.7) в (1.1), получим

$$h_{\text{пот}} = \zeta \left( \frac{B_k}{B} \right)^2 \frac{v_k^2}{2g}, \quad (1.8)$$

а сравнивая (1.4) и (1.8), получаем

$$\zeta_k = \zeta \left( \frac{B_k}{B} \right)^2. \quad (1.9)$$

В формулах (1.8) и (1.9) значение коэффициента  $\zeta$  может определяться по формулам (1.2) или (1.3).

Определение потерь напора в решетках с учетом загрязнений представляет весьма сложную задачу. Между тем канализационные решетки даже при непрерывной очистке загрязнены, поэтому в них вызываются значительно большие сопротивления, чем при течении чистой воды, соответственно рекомендуется потери напора, вычисленные по формуле (1.4) увеличивать в три раза, то есть считать

$$h_{\text{пот}} = \zeta_{\text{к}} \frac{v_{\text{к}}^2}{2g} p, \quad (1.10)$$

где  $p$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора при течении сточной жидкости по сравнению с потерями напора, возникающими при течении чистой воды ( $p = 3$ ).

При проектировании Курьяновской станции аэрации (г. Москва) было принято  $p = 2$ .

Для выяснения степени влияния загрязнений на гидравлическое сопротивление решеток было проведено исследование двух решеток № 1 и № 7 Курьяновской станции аэрации (КСА) г. Москвы.

Исследованные решетки состоят из прямоугольных стержней толщиной  $s = 10$  мм и шириной  $l = 70$  мм, наклоненных в рабочем положении под углом  $\alpha = 60^\circ$  к горизонту. Ширина прозоров между стержнями  $b = 16$  мм. Очистка каждой решетки производится четырьмя механическими граблями, перемещаемыми двумя бесконечными цепями, опоясывающими звездочки (блоки), верхние из которых ведущие. Общая ширина решетки  $B = 1,8$  м. Ширина каналов, в которых установлены решетки,  $B_{\text{к}} = 2,3$  м. Схемы решетки и канала представлены на рис. 1.3.

Исследование решеток сводилось к определению потерь напора при данном расходе и нормальной работе граблей по очистке решеток от загрязнений.

Перед проведением опытов производилась нивелировка дна канала до и после решетки и условных нулей шпигтенмасштабов, служивших для определения отметок уровней воды также до и после решетки. Абсолютные отметки уровней воды вычислялись как разности отметок условных нулей шпигтенмасштабов и отсчетов по шпигтенмасштабам (превышений условных нулей шпигтенмасштабов над уровнями воды).

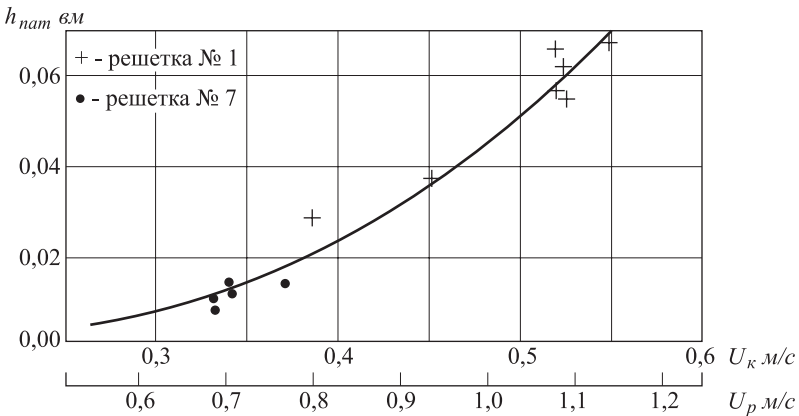
Следует отметить, что указанное определение уровней воды производилось не непосредственно в канале, а в специальных отдельных колодцах, соединенных с потоком канала несколько выше его дна (см. рис. 1.3). Эти колодцы были выполнены во время строи-

тельства и, по-видимому, предназначались для перевода решеток на периодическую автоматическую их очистку. Это позволило значительно снизить ошибки в определении отметок уровней воды, обусловленные пульсацией.

Из полученных результатов измерений вычислялись глубины, живые сечения потоков и разность отметок уровней воды до и после решеток.

Во время опытов на отводящем канале производилось измерение расходов. Это делалось с помощью гидрометрических вертушек [1].

На основании проведенных измерений обычным способом находились потери напора в решетках. Результаты обработки опытных данных представлены на графике рис. 1.4 в зависимостях  $h_{пот} = f(v_k)$  и  $h_{пот} = f(v_p)$ . Кроме того, из опытных данных в соответствии с уравнением (1.4) были вычислены значения коэффициентов местного сопротивления  $\tau_k$  решеток.

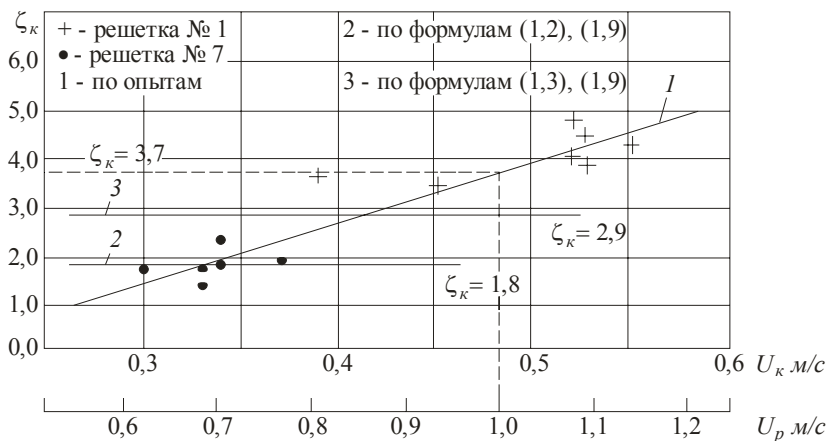


**Рис. 1.4.** Результаты опытных данных потерь напора в решетках КСА

Полученные результаты вычислений представлены на графике рис 1.5 в зависимости  $\zeta_k = f(v_k)$  и  $\zeta_k = f(v_p)$ .

Как следует из графика, коэффициент  $\zeta_k$  зависит от средней скорости течения в канале или, что то же самое, от средней скорости в прозорах решетки. При этом с увеличением указанных скоростей коэффициент  $\zeta_k$  возрастает. Этот результат на первый взгляд кажется странным. Подобной зависимости, например, не отражают формулы (1.2) и (1.3).

Все опыты, проведенные при протекании чистой воды через решетки, свидетельствуют о том, что коэффициент местного сопротивления решетки не зависит от средней скорости течения.



**Рис. 1.5.** Зависимость коэффициента  $\zeta_{\kappa}$  от скорости  $v_p$  в прозорах решетки (по опытным данным)

Полученный результат можно, однако, легко объяснить различной степенью загрязнения решеток. Увеличение скоростей  $v_{\kappa}$  или  $v_p$  равносильно соответственному увеличению нагрузки по расходу на единицу площади решеток, а это, в свою очередь, приводит и к увеличению количества задерживаемых загрязнений, так как концентрация загрязнений сточных вод практически постоянна. В то же время скорость очистки решеток (скорость перемещения граблей) неизменна.

Поэтому в каждый данный момент времени количество находящихся на решетке загрязнений зависит от скоростей  $v_{\kappa}$  и  $v_p$ . Это в свою очередь, влияет на величину потерь напора.

Значительный разброс опытных точек на графике рис. 1.5, по-видимому, объясняется различной степенью загрязнения решеток при данной скорости.

На графике рис. 1.5 нанесены также результаты вычислений коэффициентов  $\zeta_{\kappa}$  по формулам (1.2), (1.9) и (1.3), (1.9).

Значение коэффициента  $\zeta_{\kappa}$ , вычисленное по формулам (1.2), (1.9), соответствует наименьшим значениям  $\zeta_{\kappa}$ , полученным из опытов. Этого следовало ожидать, так как формула (1.2) не учитывает загрязнений. Из рассмотренного сравнения вытекает и другой вывод: при скорости воды в канале меньше 0,34 м/с и в прозорах решетки меньше 0,7 м/с влияние загрязнений на потерях напора в решетках с механической очисткой практически не сказывается.

Значение коэффициента  $\zeta_{\kappa}$ , вычисленное по формулам (1.3), (1.9), заметно превышает некоторые значения  $\zeta_{\kappa}$ , полученные из опытов.

Научное издание

Евгений Алексеевич Пугачев

# ОЧИСТКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД МЕГАПОЛИСА

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*  
Компьютерная верстка: *Д.А. Матвеев*  
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Подписано к печати 20.01.13.  
Формат 60x90/16. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Бумага офсетная.  
Усл. 8,5 п. л. Заказ № . Тираж 500 экз.

ООО «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26,  
отдел реализации к. 511, тел., факс: (499)183-56-83;  
e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>