

УДК 628.29 (075.8)

UDC 628.29 (075.8)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОГО ОТВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ДРЕНАЖНЫХ ВОД С ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ**

**RESEARCH OF SYSTEM OF JOINT REMOVAL OF SUPERFICIAL AND DRAINAGE WATERS FROM CITY TERRITORIES**

Кордон Михаил Яковлевич  
к.т.н., профессор

Kordon Mikhail Yakovlevich  
Cand. Tech. Sci., professor

Фомичева Галина Ивановна  
доцент  
*Пензенский государственный университет, Пенза, Россия*

Fomicheva Galina Ivanovna  
Assistant professor  
*Penza State University, Penza, Russia*

В статье отражены основные положения предложенной системы отведения дренажно-ливневых вод. Установлена зависимость для расчета остаточных значений взвешенных частиц в потоке от скорости и времени движения стоков и определены оптимальные параметры резервуара-отстойника. Разработана методика прогнозирования качества воды в дренажно-ливневой системе с учетом разбавления ливневых и талых вод дренажными водами и процессов физико-химического и биохимического самоочищения. Определена эколого-экономическая эффективность системы

In the article substantive provisions of the offered system of drainage storm waters removal are reflected. Dependence for calculation of residual values of the weighed particles in a stream from speed and time of movement of drains is established and optimum parameters of the tank-sediment bowl are defined. The technique of forecasting of quality of water in drainage storm system with due regard for diluting both storm and thawed snow drainage waters and processes of physical and chemical and biochemical self-cleaning is developed. Eco-economic efficiency of system is defined

Ключевые слова: ПОВЕРХНОСТНЫЕ, ДРЕНАЖНО-ЛИВНЕВЫЕ ВОДЫ, ВЗВЕШЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ, РЕЗЕРВУАР-ОТСТОЙНИК, КАЧЕСТВО ВОДЫ

Keywords: SUPERFICIAL, DRAINAGE STORM WATERS, WEIGHED PARTICLES, TANK-SEDIMENT BOWL, QUALITY OF WATER

Отсутствие в городе Пензе системы ливнесточной сети в условиях подтопленных и заболоченных территорий ухудшает экологию города, осложняет строительство и эксплуатацию зданий, сооружений, систем инженерного оборудования, ведет к загрязнению природных водоемов и городских территорий. Анализ существующего опыта исследований, проектирования и эксплуатации ливнесточных систем позволяет предложить возможность комплексного решения проблемы отведения ливневых сточных вод с территорий городов и дренирования заболоченных и подтопленных территорий.

Система предназначена для сбора и отведения дренажно-талоливневых сточных вод и состоит из уличной дренажно-водоотводящей сети, коллектора и проточного отстойника. Участок исследования

расположен на территории района Арбеково (рисунок 1). Для него подобрана наиболее оптимальная схема дренажа, выполняющая функции дренажно-ливневого коллектора и дрен, работающих как дрены-осушители и отводящие тало-ливневые воды.

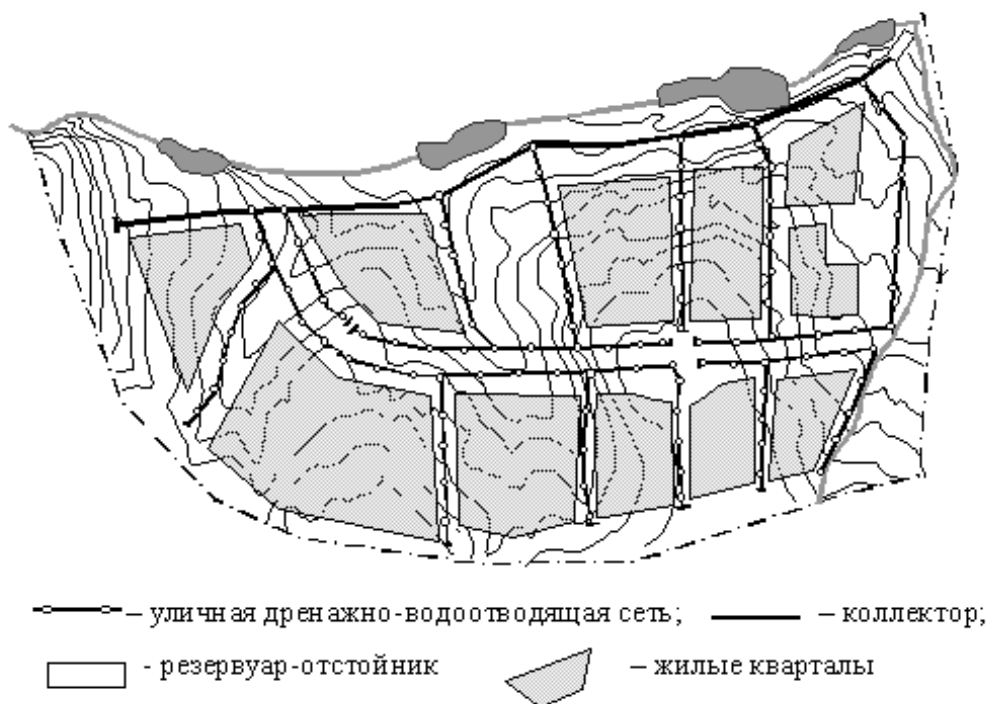


Рис. 1. Бассейн канализования

Проведен анализ климатических параметров, факторов влияния (морфологических, геолого-литологических, гидрогеологических и техногенных) и качественная оценка экологического состояния поверхностного и подземного стока в пределах города Пензы.

В течение года осадки распределяются неравномерно: наибольшее их количество выпадает в теплый период, максимум отмечается в июле (66 мм), минимум – в апреле (34 мм).

Состав поверхностных сточных вод на территории города Пензы весьма разнообразен, причем диапазон изменения концентраций и загрязнений, превышающих ПДК в стоках, очень большой (табл. 1).

Расчет дренажно-ливневой системы проводился по зависимостям С.Ф.Аверьянова, А.В.Романова. М.В.Молокова и В.Н.Шифрина. В результате расчета определялись удельный и полный дебиты ( $Q_{op}=1,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ) несовершенного берегового дренажа и системы однолинейных уличных дрен; максимальный расход ливневого стока ( $Q_{max \text{ ливн}}= 3,48 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при периоде однократного превышения  $p=1$  год, максимальный расход талых вод ( $Q_{тал}=1,6 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Таблица 1 - Объемы и состав поверхностных и дренажных сточных вод на территории города Пензы

Показатели, мг/л	Ливневой сток $Q_{л \text{ max}} = 3483-1621$ л/с	Талый сток $Q_{т} = 1619$ л/с	Дренажный сток $Q_{д} = 1326$ л/с	ПДК, мг/л
Взвешенные в-ва	50-1544	1500-3000	0-20	20
БПК <sub>5</sub>	5,2-316	50-170	–	6
Нефтепродукты	0,125-47,5	0,5-1,7	–	0,3
Азот аммонийный	3,8-11,2	5,0 – 15,0	–	2
Фенолы	0,004-0,047	–	–	0,001

Прогноз изменения концентрации консервативных веществ проведен с учетом поступления сточных вод в проточный отстойник (рис. 2).

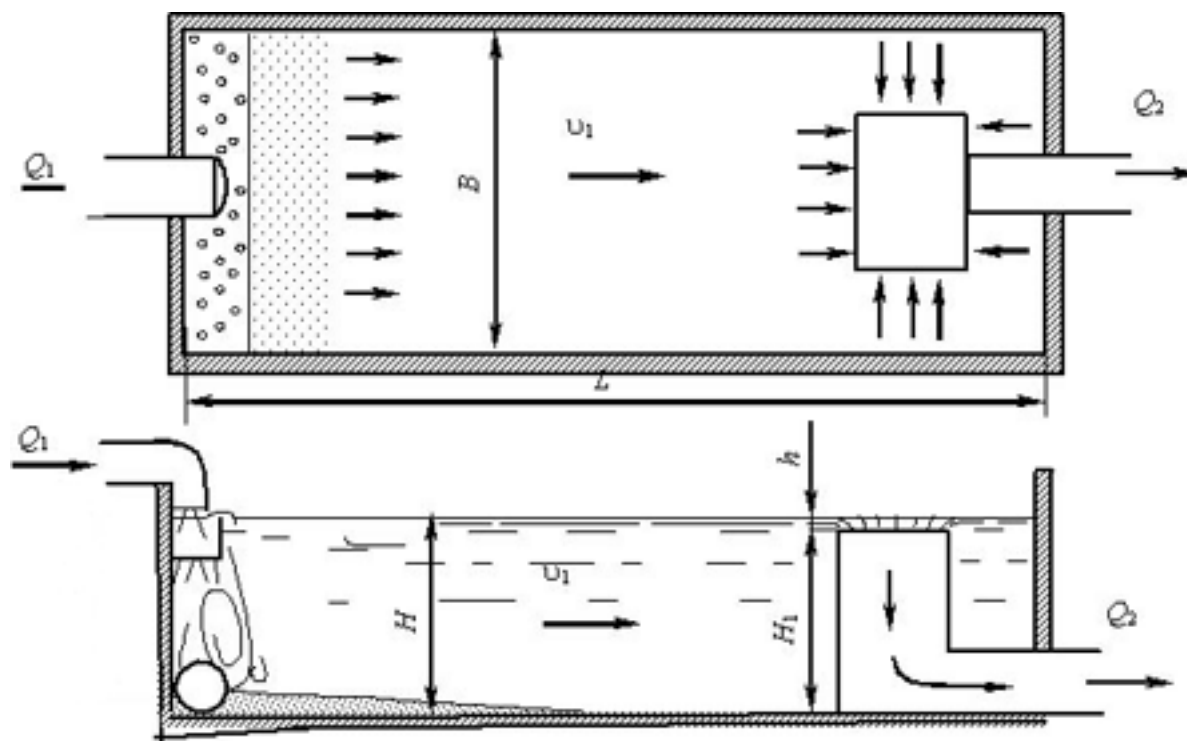


Рис. 2. Расчетная схема проточного резервуара

Прогноз качества воды должен учитывать: разбавление ливневых и талых вод дренажными водами; деструкцию неконсервативных веществ образование новых промежуточных и конечных продуктов; взаимодействие веществ; сорбционные и десорбционные процессы; влияние турбулентной составляющей скорости потока на процесс седиментации взвешенных частиц; температуру воды. Параметры проточного отстойника зависят от содержания взвешенных частиц в стоке и определяются шириной  $B$ , глубиной  $H$ , длиной резервуара  $L$  и заглублением водосливного колодца  $h$ .

Задача оптимального выбора параметров резервуара состоит в обеспечении максимальной экологической безопасности поверхностных водоемов при минимальных размерах. Оптимальные размеры

определялись путем последовательного задания функций определяющих значений на основе метода неопределенных множителей Лагранжа с отысканием условного экстремума.

Глубина резервуара по рекомендации СНИП 2.04.03-85 принята  $H = 4$  м. Тогда оптимальная рабочая скорость  $v = 0,084$  м/с при максимальном расходе ливневых вод и ширина резервуара  $B = 12,5$  м, соответствующей этой скорости; оптимальное значение периметра водосливного колодца  $P = 26$  м и соответствующее значение осветленного слоя  $h = 0,12$  м.

Выбор длины проточного отстойника зависит от времени и характера седиментации взвешенных веществ в поверхностном слое по длине потока дренажно-ливневого стока в пределах отстойника.

Результаты экспериментальных исследований позволили получить расчетную зависимость остаточных значений взвешенных частиц с учетом влияния турбулентной составляющей различной скорости потока и несовершенства гидравлических условий работы проточного отстойника. Результаты обработки экспериментальных данных осаждения взвешенных частиц при кинетических условиях представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные характеристики взвешенных частиц.

$d_{cp}$ , мкм	7,5	17,5	37,5	75	>100	сумма
$u$ , м/с	0,00005	0,00036	0,0013	0,0042	0,0156	-
$C$ , мг/л	10,37	7,74	9,31	56,84	909,44	993,7

В результате обработки проведенного анализа результатов эксперимента установлена закономерность изменения взвешенных веществ в слое глубиной 0,12 м:

$$C_{ост} = C_0 \left(1 / e^{0,25}\right)^{t/5}, \quad (1)$$

где  $C_{ост}$  – остаточная концентрация взвешенных веществ в сосуде по истечении времени  $\tau$  (мг/л);  $C_0$  – первоначальная концентрация взвешенных веществ.

Полученные результаты эффективности осветления показывают, что после 20 минут седиментации взвешенных частиц эффективность практически мало отличается по глубине потока в поверхностном слое  $h=0,12$  м. При этом концентрация взвешенных частиц в этом слое уменьшается почти в 3 раза в основном за счет более крупных фракций. Наличие мелких частиц в сточных водах не превышает предельно допустимую концентрацию.

При  $v>0$  на процесс осаждения взвешенных веществ оказывает воздействие турбулентная составляющая скорости и ряд других случайных факторов, основными из которых является разбавление вод, находящихся в отстойнике, дренажными водами, поступающими в период отсутствия дождя и разбавление осветленных вод дренажно-ливневыми стоками во время дождя. Коэффициент разбавления во время дождя в отстойнике с осветленными стоками составляет 3,85-1,35.

Осветление дренажно-ливневых стоков при определенных значениях скорости потока и гидравлической крупности взвешенных частиц резко падает. Данные скорости можно принять как предельные. При выборе оптимальных размеров проточного отстойника следует исходить из условия  $v_{пред} \leq 0,084$  м/с.

Зависимость для определения остаточной концентрации взвешенных веществ в слое дренажно-ливневых стоков равном 0,12 м в проточном отстойнике имеет вид:

$$C_{ост} = r_c C_0 \left( k_c \frac{Re^m}{e^{0.25}} \right)^{0,2tb / k_w}, \quad (2)$$

где  $r_c$  – коэффициент изменения концентрации взвешенных веществ при разбавлении в отстойнике

$$r_c = 1/n' \quad (3)$$

$C_0$  – концентрация взвешенных веществ при  $\tau=0$  и  $d \geq 75$  мкм, мг/л;  
 $\beta$  – коэффициент, учитывающий температуру стоков.  $\beta=1$  при  $t=20^\circ\text{C}$ ,  
 $\beta=0,98$  при  $t=15^\circ\text{C}$ ,  $\beta=0,84$  при  $t=5-8^\circ\text{C}$ ;  $k_c$ - коэффициент, учитывающий  
 изменение концентрации взвешенных частиц в заданном интервале  
 времени седиментации, определяется опытным путем;  $n'$  - коэффициент  
 разбавление вод, находящихся в отстойнике, дренажными водами,  
 поступающими в период отсутствия дождя

$$k_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i - C_{i+1}}{C_{i+1}}, \quad (4)$$

где  $C_i$  – концентрация взвешенных веществ в  $i$ -ом интервале;

$Re$ – критерий Рейнольдса в поверхностном слое  $h$  м.

При определении значения  $m$  принимается предельное значение  
 критерия Рейнольдса при скорости  $v=0,084$  м/с

$$k_c \text{Re}^m / e^{0,25} = 0,818 \quad (5)$$

$k_\omega$  - коэффициент, учитывающий вертикальную составляющую  
 скорости потока, которая направлена вертикально вверх

$$k_\omega = \frac{u}{u - s_w} \quad (6)$$

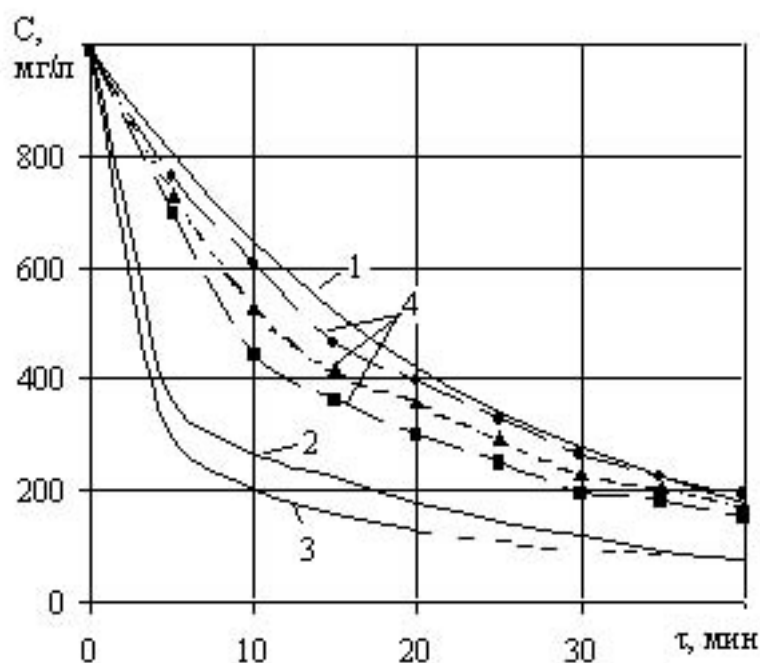
$\sigma_\omega$ - дисперсия вертикальной составляющей скорости  $\omega$

$$s_w = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \quad (7)$$

$u_i$ - гидравлическая крупность  $i$ -ой частицы взвеси, м/с;  $\bar{u}$  - среднее  
 значение гидравлических частиц взвеси, м/с;  $n$  – количество фракций  
 взвешенных веществ;

Стоки с предельной скоростью  $v_{\text{пред}} = 0,084$  м/с за 40 мин должны  
 пройти расстояние равное 198,6 м, за 20 мин – 99,3 м. При этом  
 осредненный коэффициент разбавления соответственно увеличивается.

Прогнозируемый процесс осаждения взвешенных веществ для предельной скорости показан на рисунке 3.



1 -  $\tau=40$  мин, без разбавления; 2 -  $\tau=40$  мин с разбавлением;  
 3 -  $\tau=20$  мин, с разбавлением; 4 - опытные данные при  $v=0,084$  м/с:  
 --●--  $h=0,12$  м; --■--  $h=0,01$  м; --▲-- среднее значение;

Рис. 3. Прогноз осаждения взвешенных веществ в стоках со скоростью движения  $v=0,084$  м/с.

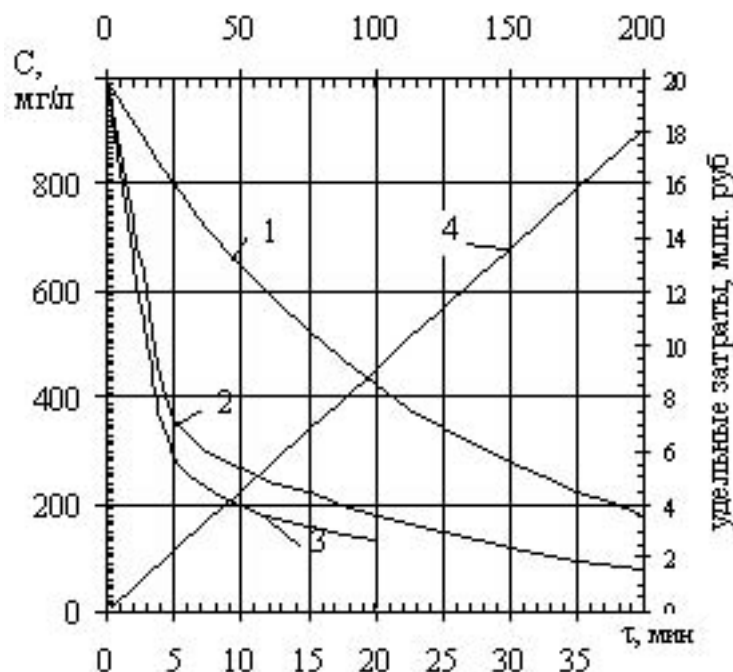
Длина резервуара отстойника зависит от гидромеханических параметров потока, концентрации взвешенных частиц в стоке, величины осветляемого слоя.

При определении оптимальной длины резервуара следует исходить из того, что осветление дренажно-ливневого стока возможно до достижения экологически безопасного предела (ПДК+0,25 мг/л) или до необходимых концентраций, обоснованных экономическими затратами. В зависимости от объема капитальных вложений изменяется длина отстойника и, следовательно, количество осажденных частиц.

Точки пересечения графиков (рис. 4) являются пределами изменения оптимальной длины отстойника при условии движения разбавленных стоков в течении 20 мин и неразбавленных стоков при продолжительности



дождя более 40 мин. Изменение длины отстойника в этом случае будет колебаться от 46 м до 96 м при среднем значении 71 м.



1 – без разбавления,  $\tau=40$  мин; 2 – с разбавлением,  $\tau=40$  мин  
3 – с разбавлением,  $\tau=20$  мин; 4 - капиталовложения

Рис. 4. Изменение концентрации взвешенных веществ в зависимости от капиталовложений

Прогнозируемая концентрация неконсервативных веществ с учетом разбавления и фонового загрязнения находится по формуле Родзиллера [1]

$$C_{пр} = (C_{\phi} + (C_{ст} - C_{\phi})/n)10^{-kt}, \quad (8)$$

где  $n$  – разбавление;  $C_{пр}$  – прогнозируемая концентрация окисляемого вещества;  $C_{\phi}$  – концентрация того же вещества в дренажных водах;  $C_{ст}$  – концентрация вещества в ливневых или талых водах;  $t$  – время от начала процесса биохимического окисления;  $k$  – коэффициент неконсервативности.

В водоотводящей сети происходит смешение дренажных и ливневых или талых вод. Величина разбавления различна и зависит от расхода поверхностных вод (расход дренажных вод постоянен).

В пределах уличной водоотводящей сети разбавление изменяется неравномерно и определяется по формуле

$$n = (a(Q_1 + q_0) + q_0) / aQ_1, \quad (9)$$

где  $a$  – число дождеприемников, принявших ливневые (талые) стоки от начала уличной сети;  $Q_1$  – расход ливневых вод на 1 дождеприемник;  $q_0$  – расход дренажных вод.

В пределах коллектора разбавление определяется по формуле

$$n = (b(Q_2) + q) / bQ_2, \quad (10)$$

где  $b$  – число выпусков, принявших ливневые (талые) стоки от начала коллектора;  $Q_2$  – расход дренажно-ливневого стока на 1 выпуск.

В рассматриваемом бассейне разбавление  $n$  составляет в зависимости от величины расхода в пределах уличной сети 1,02-5,88, в пределах коллектора 1,27-1,63. Исследуемые стоки проходят стадию биохимического окисления уже в процессе движения по уличной водоотводящей сети и по коллектору. Продолжительность движения воды в пределах уличной сети 26 мин ( $2,9e^{-4}$  сут), в пределах коллектора 27 мин ( $3,125e^{-4}$  сут).

У входа в отстойник при максимальной концентрации ливневых стоков в 316 мг/л (52,6 ПДК) концентрация БПК<sub>5</sub> снижается по сравнению с начальным значением на 84-95%. В отстойнике в результате сорбционных процессов, происходит дополнительное снижение концентрации БПК на 10-15%. При максимальной концентрации нефтепродуктов 47,5 мг/л (158,3 ПДК) в результате биохимического окисления происходит снижение концентрации на входе в отстойник при максимальном расходе до 7,4 мг/л, при минимальном расходе – до 2,5 мг/л, что составляет 84,4–94,8 % от первоначальной концентрации и соответственно 24,6–8,3 ПДК. Снижение концентраций аммонийного азота происходит за счет разбавления дренажными водами. При первоначальной концентрации аммонийного азота в ливневых водах 11,2 мг/л (5,6 ПДК), в талых 15 мг/л (7,5 ПДК) в

водоотводящей системе происходит уменьшение концентрации до 3,35 мг/л (1,67 ПДК) (в дренажно-ливневых водах) и в талых до 4,16 мг/л (2,08 ПДК). В ливневом стоке концентрация фенолов снижается у входа в отстойник до 0,0071 мг/л (7 ПДК) при максимальной концентрации, до 0,0039 мг/л (4 ПДК) при средней концентрации и до 0,0006 мг/л (0,6 ПДК) при минимальной начальной концентрации.

Оценка эколого-экономической эффективности системы совместного отведения дренажных и тало-ливневых вод приводится по отношению к капитальным затратам и к приведенным затратам. В первом случае экономическая эффективность  $\mathcal{E}_k = Y_{\text{пред}}/\sum K$  ( $\sum K$  – капитальные затраты на систему водоохраны). Во втором случае  $\mathcal{E}_n = Y_{\text{пред}}/\sum \Pi$  ( $\sum \Pi$  – годовые приведенные затраты для всего комплекса водоохраных мероприятий).

Предотвращенный максимальный ущерб представляет собой разницу ущербов между максимальным ущербом, наносимым городской среде в базовом варианте и в минимальном, достигаемым в результате работы системы совместного отведения стоков

$$Y_{\text{пред}} = Y_{\text{max}} - Y. \quad (11)$$

Оба ущерба образуются из ущербов, наносимых городскому хозяйству и природной среде подтоплением  $Y_n$ , ущерба за счет загрязнения природной среды ливневым стоком  $Y_l$  и ущерба от талого стока  $Y_t$ .

Для предлагаемой системы общие расходы затраты по смете на строительство составляют 17000 тыс.руб. В среднем предотвращенный ущерб составляет около 10000 тыс.руб. Средняя экономическая эффективность по капитальному строительству составляет  $\mathcal{E}_k=0,59$ .

Экологическая эффективность системы заключается в степени очистки стоков на выходе из системы. Минимальное снижение концентраций наблюдается в максимальном ливневом стоке – 88,3 %,

максимальное – при наблюдаемых минимальных расходах ливневого стока – 96,1%.

Процесс самоочищения сточных дренажно-ливневых вод носит вероятностный характер, поэтому для оценки экологической безопасности системы использован коэффициент экологической эффективности самоочищения  $k_3$ :

$$k_3 = 1 - \frac{\sum C_i / ПДК_i}{\sum C_{i0} / ПДК_i}, \quad (12)$$

где  $C_i$  – расчетная концентрация загрязняющего вещества, мг/л;  $C_{i0}$  – начальная концентрация вещества, мг/л; ПДК<sub>i</sub> – предельно-допустимая концентрация того же вещества, мг/л.

Анализ зависимости показывает, чем менее загрязнены поверхностные воды ( $C_i \rightarrow 0$ ), тем больше коэффициент экологической безопасности ( $k_3 \rightarrow 1$ ) и наоборот, чем больше загрязняющих веществ содержится в стоках, тем меньше коэффициент экологической безопасности. Изменение качества воды ( $k_3$  - от 0,6 до 0,9 на выходе из отстойника) происходит в основном, за счет самоочищения стоков, входящих в общесанитарный (за счет снижения концентрации БПК<sub>5</sub>) и органолептический ЛПВ (взвешенных веществ, нефтепродуктов и фенолов).

#### Литература

1. Родзиллер И.Д. Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод. – М.: Стройиздат, 1984, 262 с.
2. Курганов А.М., Н.И. Федоров. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат, 1973, 408 с.
3. Яковлев С.В. и др. Рациональное использование водных ресурсов. – М.: Высшая школа, 1991, 473 с.