

$$\Gamma(l, x, \xi) = \ln \frac{l^2 - x\xi - \sqrt{l^2 - x^2} / \sqrt{l^2 - \xi^2}}{l^2 - x\xi + \sqrt{l^2 - x^2} / \sqrt{l^2 - \xi^2}};$$

$$l = l_{\text{ср}} + R,$$

x – координата точки на оси абсцисс, в которой определяется раскрытие трещины; ξ – текущая координата, изменяющаяся в интервалах $-l \leq \xi \leq -R$; $R \leq \xi \leq l$. Функция нормальной составляющей напряжений, приложенных к берегам трещины при одноосном сжатии, имеет вид [6]

$$q(\xi) = q_1 \left(3 \frac{R^4}{\xi^4} - \frac{R^2}{\xi^2} \right). \quad (27)$$

Окончательно после подстановки (27) в (26) получаем

$$2\nu_{x,0} = \frac{q}{\pi E_b} \int_{-l}^l \left(3 \frac{R^4}{\xi^4} - \frac{R^2}{\xi^2} \right) \Gamma(l, x, \xi) d\xi. \quad (28)$$

При проектировании рекомендуется следующий порядок определения ширины трещины при длительном действии нагрузки:

- определяется величина критического коэффициента интенсивности напряжений при поперечном сдвиге;
- текущее значение меры ползучести бетона вычисляется по (5);

- начальная ширина раскрытия трещины определяется из (28);
- вычисляется модуль упругости $E(\tau)$;
- по формуле (24) определяется текущее значение ширины раскрытия трещины под длительно действующей нагрузкой.

ВЫВОД

Выполненные исследования позволяют рассчитывать длину и ширину развивающейся во времени трещины в бетонных элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трапезников, Л. П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений / Л. П. Трапезников. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
2. Гузев, Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест: БПИ, 1999. – 217 с.
3. Зайцев, Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю. В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
4. Арутюнян, Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Н. Х. Арутюнян. – М.; Л.: Гостехиздат, 1951. – 324 с.
5. Панасюк, В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В. В. Панасюк. – Киев: Навук. думка, 1968. – 246 с.
6. Мухелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

Поступила 11.11.2008

УДК 696.135:502.3

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА С ТЕРРИТОРИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. КОЛОБАЕВ А. Н., асп. НОВИКОВА О. К.

Белорусский национальный технический университет

При проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений по очистке ливневых вод с территории промышленных предприятий учитывается главная особенность этих вод: их

крайне неравномерное распределение во времени. Определение производительности очистных сооружений исходя из максимальных расходов воды связано с неоправданным удорожа-

нием строительства, так как на полную мощность очистные сооружения будут работать редко и в течение непродолжительного времени. В связи с этим часто предусматривается создание специальных резервуаров, куда направляются ливневые воды при их расходах, близких к максимальным. Значения этих расходов обычно принимаются в процентах от максимальных величин поверхностного стока с рассматриваемой территории. При этом известный факт снижения концентрации загрязняющих веществ по ходу дождя учитывается лишь косвенно.

В настоящей работе рассматриваются вопросы оценки влияния качества ливневых вод с территорий предприятий машиностроения как на параметры работы очистных сооружений, так и на схему отведения этих вод. В частности, ливневые воды могут отводиться:

- на общие для предприятия сооружения по очистке дождевых и талых вод;
- на отдельные сооружения по очистке дождевых и талых вод (например, с территорий основного и вспомогательного производств);
- на подпитку оборотных систем водоснабжения;
- в городскую канализацию или в природный водный объект.

Для выбора оптимальной схемы отведения ливневых вод и параметров очистных сооружений крайне важно располагать информацией о закономерностях формирования качества этих вод.

Поверхностный сток с территорий предприятий машиностроения имеет свои специфические особенности и отличия (особенно по качеству воды) от поверхностного стока с городской территории. Эти отличия обусловлены технологическими процессами производства, складированием используемых материалов и готовой продукции, повышенной интенсивностью движения автотранспорта, большим процентом водонепроницаемых поверхностей, планировочными работами на территории предприятия и т. д. Кроме того, на многих предприятиях машиностроения предусмотрена отдельная схема отведения ливневых и талых вод с территорий основного и вспомогательного производств. Следовательно, существующие рекомендации по оценке качественных ха-

рактеристик поверхностного стока с городской территории [1–11] нельзя распространить на территорию предприятия машиностроения. В связи с этим в настоящей работе проведены специальные исследования (применительно к территориям предприятий сельскохозяйственного машиностроения), включающие в себя:

- анализ ретроспективных данных (за 2000–2008 гг.) гидрохимических лабораторий двух предприятий ПО «Гомсельмаш» и отдела аналитического контроля Гомельского городского комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды;
- определение восстановленных значений концентраций загрязняющих веществ на входе очистных сооружений на основании:
 - результатов анализов отборов проб после очистных сооружений, проводимых гидрохимической лабораторией предприятия (2000–2008 гг.);
 - данных предприятия о фактической эффективности работы очистных сооружений.

Собственные экспериментальные исследования, т. е. предметно-ориентированные отборы ливневых и талых вод в характерных точках ливневой канализации предприятия, в том числе на входе и выходе очистных сооружений (в летний и весенний периоды 2006–2008 гг.).

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Качественная характеристика поверхностного стока с площадок промышленных предприятий не только отличается от стока с городской территории (табл. 1), но и имеет отличительные особенности внутри одного предприятия на двух промплощадках (табл. 2). Пробы, отобранные с площадки основного производства, где сосредоточены сварочное, литейное, гальваническое производства и окраска основных изделий, и для которой характерно интенсивное движение транспорта между корпусами, имеют более высокие концентрации загрязняющих веществ, чем с промплощадки, на которой сосредоточено складирование готовой продукции и вспомогательные производства, включающие в себя окрасочное и сварочное производства отдельных видов производимой

продукции. Зависимость качества поверхностного стока от технологических процессов производства следует учитывать при проектировании и строительстве очистных сооружений, реконструкции систем отведения поверхност-

ного стока на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения, территория которых, как правило, условно разделена на основное и вспомогательное производства.

Таблица 1

Средние концентрации загрязняющих веществ в поверхностном стоке с различных территорий водосбора, мг/дм³

Наименование коллектора	Показатель				
	БПК ₅	Взвешенные вещества	Нефтепродукты	Азот аммонийный	Железо общее
Территория города Минска (по данным 1999–2004 гг.) [2]					
Комаровка	5,96	14,8	0,31	0,8	–
Центр	5,31	23,2	1,6	0,93	–
Аранская	7,0	61	0,8	0,45	–
Велозаводской	5,3	15,7	0,3	0,5	–
Дражня	4,8	13,9	0,4	0,1	–
Запад	6,5	34,4	0,3	1,63	–
Территория города Гомеля (по данным 2007 г.)					
АвтоВАЗ	9,27	13,07	0,77	0,33	1,06
Новый мост	7,96	9,27	0,05	0,92	1,10
Прудковский	11,88	16,78	0,46	0,51	0,97
Территория предприятия сельскохозяйственного машиностроения (по совокупности экспериментальных и восстановленных данных 2000–2008 гг.)					
Промплощадка основного производства	8,5	66,7	2,9	2,1	3,3
Промплощадка вспомогательных производств	8,4	48,1	2,7	1,3	2,1
Территория предприятия сельскохозяйственного машиностроения (по экспериментальным данным 2006–2008 гг.)					
Промплощадка основного производства	5,4	30,1	1,8	3,9	4,7
Промплощадка вспомогательных производств	4,0	24,5	1,5	1,2	2,3

Таблица 2

Экстремальные и средние значения концентраций загрязняющих веществ в поверхностном стоке с территории предприятия сельскохозяйственного машиностроения, мг/дм³

Показатель	Экстремальные концентрации		Средние концентрации		$\frac{C_{cp1}}{C_{cp2}}$
	С площадки основного производства	С площадки вспомогательных производств	С площадки основного производства C_{cp1}	С площадки вспомогательных производств C_{cp2}	
БПК ₅	4,0–28,9	7,5–8,7	8,5	8,3	1,02
Взвешенные вещества	29,7–125,3	21,4–85,7	66,7	48,1	1,39
Нефтепродукты	0,2–7,8	0,1–8,0	2,9	2,7	1,07
Азот аммонийный	0,2–28,5	0,17–13,0	2,1	1,3	1,62
Фосфаты	0,13–0,73	0,17–0,67	0,4	0,3	1,33
Железо общее	0,8–15,8	0,5–9,4	3,3	2,1	1,57
Цинк	0,01–4,5	0,01–0,88	0,27	0,16	1,69
Никель	0,01–0,12	0,01–0,14	0,023	0,020	1,15

2. Максимальные значения концентраций характерны для гальванических цехов и производств, связанных с горячей высадкой и штамповкой металлов, а минимальные – для производств холодной высадки, различных видов механической обработки, открытого складирования готовой продукции.

3. Средние концентрации загрязняющих веществ в поверхностном стоке с территории основного производства в 1,02–1,7 раза выше, чем с территории вспомогательных производств (табл. 2). Следовательно, при соответствующем технико-экономическом обосновании может быть предусмотрена отдельная схема отведения ливневых и талых вод предприятия

с более глубокой очисткой поверхностного стока с территории основного производства.

4. Диапазоны концентраций загрязняющих веществ (мг/дм³) находятся в широких пределах: по взвешенным веществам – 15–125; БПК₅ – 4–29; нефтепродуктам – 0,1–8; азоту аммонийному – 0,2–30; железу – 0,2–16; цинку – 0,01–4,5. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании очистных сооружений.

Для выбора рациональной схемы отведения ливневых вод и определения расчетной производительности очистных сооружений важным фактором является динамика смываемых загрязнений по ходу дождя. На основании анализа отечественных и зарубежных литературных источников [1–10] о физических и метеорологических закономерностях формирования дождевого стока выдвинута гипотеза, что при снижении концентраций загрязняющих веществ по ходу дождя существует «точка перелома», или определенный предел, после которого концентрации принимают сравнительно небольшие и устойчивые значения, сопоставимые с концентрациями загрязняющих веществ в выпадающих осадках. Критерием «относительной стабилизации качества поверхностного стока» может служить объем поверхностного стока, достаточного для смыва основного количества загрязняющих веществ с единицы водосбора, или «критический слой активно используемых атмосферных осадков». Теоретически на основании формул А. М. Курганова по расчету количества смываемых загрязнений [3] и формулы Д. Л. Соколова по определению ливневых максимумов [10] предложено следующее вы-

ражение для определения критического слоя осадков H , мм:

$$H = H_0 + \frac{-\ln(1-p)}{2 \cdot 166,7 k_c \delta}, \quad (1)$$

где H_0 – слой осадков, расходуемых на начальные потери (аккумуляция воды в незащищенных искусственных и естественных водоемах, воронках и других понижениях местности, а также на смачивание почвы); 2 – коэффициент, учитывающий снижение количества осадков, аккумулирующихся в водопроницаемых почвах, учтенное при расчете слоя осадков, расходуемых на начальные потери; p – отношение массы смываемых к массе накопленных на территории водосбора загрязнений; 166,7 – коэффициент, мм⁻¹, для перевода интенсивности дождя, выраженной в л/с с 1 га в мм/мин; k_c – константа смыва, зависящая от уклона поверхности водосбора (находится в пределах 0,003–0,008) [3]; δ – коэффициент, учитывающий аккумулирующую роль водопроницаемых почв, который находится в интервале 0,25–1,0;

$$\delta = 1 - 2,51g(f + 1), \quad (2)$$

где f – доля площади водопроницаемых почв в общей площади водосбора.

Величина слоя осадков, расходуемого на начальные потери, мм, укрупненно определяется по формуле

$$H_0 = h_{\min}(1-f) + h_{\max}f, \quad (3)$$

где h_{\min} – величина слоя осадков, расходуемого на начальные потери, при формировании стока с водонепроницаемых поверхностей (асфальтобетонных покрытий дорог, кровель зданий и т. д.); h_{\max} – то же с грунтовых поверхностей, покрытых дерном; f – доля площади водопроницаемых почв в общей площади водосбора.

По данным ЛНИИ АКХ им. К. Д. Панфилова: $h_{\min} = 0,7–1,0$ мм; $h_{\max} = 6,0$ мм [3], а по данным службы охраны почв США: соответственно 1,0 и 7,0 мм.

Для территорий промышленных предприятий расчетная величина H_0 , как правило, находится в пределах 1,5–2,8 мм, а для городской территории может быть значительно выше.

Для территорий предприятий сельскохозяйственного машиностроения зависимость величины H от процента смываемых загрязнений и удельного веса площади водопроницаемых

почв в общей площади водосбора представлена на рис. 1.

На основании выражений (1)–(3) применительно к площадкам предприятия сельскохозяйственного машиностроения определены теоретические значения критического слоя осадков, позволяющего смыть 75–80 % загрязнений. Для площадки основного производства величина H составляет 3,3–3,5 мм, для площадки вспомогательных производств – 4,1–4,4 мм. Основное отличие обусловлено различным процентом водопроницаемых почв: соответственно 26 и 38 %.

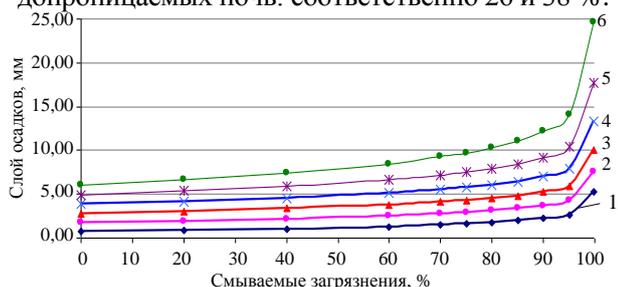


Рис. 1. Зависимость расчетного критического слоя осадков от процента смываемых загрязнений при различных значениях удельного веса площади водопроницаемых почв в общей площади водосбора для $k_c = 0,0045$: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100 %

Для проверки корректности полученных расчетных значений проведены специальные экспериментальные исследования дождевого стока с промплощадки основного производства в летний период 2008 г., заключающиеся в отборе проб в трех фазах формирования поверхностного стока:

1) в начале формирования стока (появление воды в коллекторе при слое осадков около 2 мм);

2) при слое выпавших осадков 3,5 мм;

3) при слое осадков 5 мм.

Эксперимент проведен при дожде с суммарным слоем осадков 17 мм, а затем повторен при дожде с суммарным слоем осадков 5,5 мм.

Результаты экспериментов (табл. 3) подтверждают правомерность выдвинутой гипотезы, так как концентрации загрязняющих веществ при слое дождя 3,5 мм оказались ниже концентраций в начале формирования поверхностного стока в 1,4–5,5 раза и всего лишь в 1,02–1,33 раза выше концентраций загрязняющих веществ при слое дождя 5 мм. Следовательно, можно утверждать, что слой осадков

порядка 3,5 мм является минимально достаточным для смыва основной массы загрязнений, скапливающихся на территории водосбора, и может быть принят за критерий «относительной стабилизации качества» поверхностного стока с территории рассматриваемой промплощадки.

Полученные в процессе эксперимента данные табл. 4 свидетельствуют о том, что концентрации загрязняющих веществ в пробах, отобранных после выпадения слоя осадков 3,5 мм, близки к средним значениям концентраций после очистных сооружений. Это означает, что применительно к условиям рассматриваемого ливневого коллектора предприятия сельхозмашиностроения после выпадения дождя слоем 3,5 мм ливневые воды предприятия могут отводиться, минуя очистные сооружения.

Таблица 3

Сопоставление концентраций загрязняющих веществ в различных фазах формирования поверхностного стока

Показатель	Отношение концентрации загрязняющих веществ		
	В начале формирования стока к концентрации после выпадения слоя осадков 3,5 мм	В начале формирования стока к концентрации после выпадения слоя осадков 5 мм	После выпадения слоя осадков 3,5 мм к концентрации после выпадения слоя осадков 5 мм
БПК ₅	2,2	2,3	1,04
Взвешенные вещества	4,2	5,6	1,33
Нефтепродукты	4,4	5,0	1,15
Азот аммонийный	2,9	3,8	1,32
Фосфаты	5,5	6,6	1,21
Железо общее	3,0	3,9	1,29
Цинк	1,4	1,6	1,17
Никель	2,2	2,3	1,04

Таблица 4

Сравнительная характеристика концентраций загрязняющих веществ с промплощадки основного производства

Показатель	Средние концентрации загрязняющих веществ, мг/дм ³	
	В пробах после выпадения слоя осадков, равного 3,5 мм	После очистных сооружений

БПК ₅	4,82	4,23
Взвешенные вещества	23,2	11,9
Нефтепродукты	0,62	0,6
Азот аммонийный	0,95	0,9
Фосфаты	0,115	0,1
Железо общее	2,52	1,4
Цинк	0,34	0,3
Никель	0,028	0,02

ВЫВОДЫ

1. Определены зависимости качественных характеристик поверхностного стока с территорий предприятий машиностроения от технологических процессов производства. Анализ ретроспективных данных и результатов специальных экспериментальных отборов проб (проведенных авторами) показал, что средние концентрации загрязняющих веществ в поверхностном стоке с территории основного производства в 1,02–1,70 раза выше, чем с территорий вспомогательных производств. Следовательно, при соответствующем технико-экономическом обосновании может оказаться более эффективной раздельная схема отведения ливневых и талых вод предприятия с более глубокой очисткой поверхностного стока с территории основного производства.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден критерий относительной стабилизации качества поверхностного стока в виде критического слоя осадков, достаточно для смыва основной массы загрязняющих веществ с территории предприятия и определяемого в зависимости от процента водопроницаемых почв, уклона и рельефа местности. На основе этого критерия рекомендуется:

а) при эксплуатации очистных сооружений направлять на очистку наиболее загрязненную часть стока (до достижения критического слоя осадков);

б) при проектировании и строительстве систем водоснабжения и водоотведения предусматривать использование части менее загрязненных дождевых вод в оборотных системах водоснабжения или их отведение без очистки в городскую канализационную сеть, а также (после нефтесборных устройств) в природные водные объекты.

3. Установлено, что для территории основного производства ПО «Гомсельмаш», удельная площадь водопроницаемых поверхностей которого – 26 %, величина критического слоя осадков составляет 3,5 мм, а для территорий вспомогательных производств (водопроницаемых поверхностей – 38 %) – 4,0 мм. Для предприятий других отраслей промышленности разработка аналогичных рекомендаций требует дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ландшафтные** воды в условиях техногенеза / О. В. Кадацкая [и др.]. – Минск: Бел. наука, 2005. – 347 с.
2. **Алексеев, М. И.** Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированной территории: учеб. пособие для вузов / М. И. Алексеев, А. М. Курганов. – М.; СПб.: АСВ, 2000. – 352 с.
3. **Отведение** и очистка поверхностных сточных вод: учеб. пособие для вузов / В. С. Дикаревский [и др.]. – Л.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
4. **Молоков, М. В.** Очистка поверхностного стока с территории городов и промышленных площадок / М. В. Молоков, В. Н. Шифрин. – М.: Стройиздат, 1977. – 104 с.
5. **Молоков, М. В.** Дождевая канализация площадок промышленных предприятий / М. В. Молоков. – Л.; М.: Стройиздат, 1964. – 136 с.
6. **Стрельцова, Л. И.** Исследование загрязненности дождевого стока Ленинграда / Л. И. Стрельцова // Городская канализация: сб. науч. тр. АКХ М.; Л.: ОНТИ АКХ, 1968. – № 3, вып. XXXIX. – С. 195–202.
7. **Правошинский, Н. А.** О мерах охраны водоемов в городской черте от загрязнения стоками дождевых, талых и поливомоечных вод / Н. А. Правошинский, В. М. Смольянинов, Т. Д. Гречухина // Проблемы использования водных ресурсов. – Минск: Наука и техника, 1968. – С. 109–117.
8. **Говорова, Ж. М.** Регулирование и очистка поверхностных сточных вод: обзорно-аналит. докл. / Ж. М. Говорова. – М.: Стройиздат, 2007. – 47 с.
9. **Colomino, F.** Combined Sever Overflows into the Crate River and retention storage sizing / F. Colomino, P. Prilo, G. Palma // Enhancing Urban Environment by Environment Upgrading and Restoration. Series IV: Earth and Environment Sciences. – Netherlands, 2004. – Vol. 43. – P. 139–149.
10. **Леви, И. И.** Инженерная гидрология / И. И. Леви. – М.: Высш. шк., 1968. – 235 с.
11. **Рекомендации** по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с сельтебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты: утверждено ФГУП «НИИ ВОДГЕО» от 28.12.2005. – М., 2006. – 85 с.

Поступила 16.02.2009