

УДК 628.29; 556.048

Оптимизация гидрологических расчетов систем очистки поверхностного и дренажного стока воды

Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев, В. И. Штыков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б., Штыков В. И. Оптимизация гидрологических расчетов систем очистки поверхностного и дренажного стока воды // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 332–344. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-332-344

Аннотация

Цель: разработать способ определения оптимальных гидрологических характеристик систем очистки загрязненных поверхностных и дренажных вод. **Методы:** применено уравнение баланса загрязняющих веществ. Для сравнения использована методика НИИ «Водгео». Исследованы затраты на очистку и экологический ущерб от загрязнения водотоков при различных вариантах водности года и параметрах очистных сооружений. В качестве основных параметров выбраны виды загрязняющих веществ (взвешенные вещества и нефтепродукты) и коэффициент разделения стока в разделительных камерах. **Результаты:** разработан способ оптимизационных расчетов гидрологических характеристик систем очистки поверхностных и дренажных вод, учитывающий вероятность стока в половодье и паводки, затраты на строительство и эксплуатацию очистных сооружений и ущерб от загрязнения водотоков. В качестве примера выполнены оптимизационные расчеты нескольких вариантов очистки талого, дождевого и дренажного стока. **Практическая значимость:** способ оптимизационных расчетов ОС позволит более обосновано и точно определить необходимую степень очистки сточных вод, производительность и параметры очистных сооружений, а в ряде случаев — снизить степень загрязнения водотоков.

Ключевые слова: очистные сооружения, загрязняющие вещества, водный объект, сток, расходы воды, половодье, дождевой паводок, кратность разбавления, экологический ущерб, оптимальная производительность.

Введение

В соответствии с действующими в РФ нормативно-методическими документами по проектированию гидротехнических сооружений, гидрологические характеристики, необходимые для обоснования их конструкций и параметров, должны устанавливаться в результате сравнительных технико-экономических расчетов в зависимости от гидрологического режима и характера использования водного объекта,

а также капитальности сооружений, включая системы водоотведения и очистки загрязненных стоков. Однако в связи с отсутствием достаточно обоснованных и практически реализуемых методов таких расчетов в настоящее время используются, как правило, нормативные (фиксированные) значения расчетных обеспеченностей расходов и объемов как речного стока, так и стока с селитебных и производственных

территорий (ЗТ). Причем при проектировании очистных сооружений (ОС) ориентируются в основном на очистку поверхностного стока в маловодные и средние по водности расчетные периоды года (половодье, паводки), что, естественно, может привести к увеличению степени загрязнения водных объектов при сбросе в них максимального стока с ЗТ, считая его сравнительно чистым, то есть имеющим значительно меньшее содержание загрязняющих веществ в воде. В то же время, занижая расчетные расходы загрязненных вод, поступающих на ОС, мы тем самым уменьшаем затраты на их строительство и эксплуатацию, что, безусловно, выгодно заказчику, который, как правило, недостаточно заинтересован в должной мере учитывать экологический ущерб (ЭУ) от загрязнения водных объектов.

Основными гидрологическими характеристиками систем очистки поверхностных вод являются прежде всего предельный расход и объем воды, направляемый от разделительной камеры на очистные сооружения или в общесплавной коллектор. В зависимости от их величины определяется производительность ОС, подбираются конструкции с соответствующими техническими характеристиками.

Согласно Методическому пособию НИИ «Водгео» [1], **предельный** расход дождевых вод рассчитывается с помощью коэффициента разделения расхода после определения **расчетного** расхода перед разделительной камерой и гидравлического расчета сети дождевой канализации. Его величина устанавливается в зависимости от продолжительности периода однократного превышения, принимаемого при расчете предельного расхода в пределах от 0,05 до 0,2 года,

а также зональных коэффициентов (C, n). При этом недостаточно учитывается сток и качество воды с ЗТ, что снижает эффективность работы ОС и повышает экологический ущерб от загрязнения водоприемника. Кроме того, очевидно, предельный **секундный** расход, по величине которого определяют параметры разделительной камеры, не соответствует предельному **суточному** расходу, используемому для оценки производительности ОС.

Основы оптимизационных расчетов ОС

Предлагаемый способ оптимизационных гидролого-экономических расчетов предназначен для обоснования оптимальных гидрологических характеристик (ОГХ) загрязненного стока воды, необходимых при определении конструкций и параметров систем его очистки. При этом используется уравнение баланса загрязняющих веществ (ЗВ), учитывающее сток и качество воды в водоприемнике и ЗТ [2].

Оптимизационные расчеты следует выполнять по основным ЗВ отдельно для весеннего половодья (талый сток) и летне-осеннему (летнему) дождевому паводку (дождевой сток). Причем необходимо рассматривать различные варианты работы ОС по водности и коэффициенту разделения расхода воды с ЗТ, поступающей в разделительную камеру на коллекторе, от которого зависит производительность и параметры ОС.

Таким образом, расчетными вариантами будут являться:

— виды основных загрязняющих веществ в поверхностном стоке (взвешенные и биогенные вещества, нефтепродукты, СПАВ и др.);

— водность расчетного периода, которая характеризуется рядом величин (7–9) обеспеченности ($p\%$) расхода и объема стока воды с ЗТ в пределах от 2 до 99 % или соответствующим периодом однократного превышения максимальных суточных осадков (P);

— коэффициент разделения расчетного расхода воды в разделительной камере дождевого коллектора (K_{oc}), изменяющейся от 0 до 1.

В качестве критерия оптимальности принимаем минимальную сумму затрат на очистку загрязненного поверхностного стока с ЗТ (Z_i) и экологического ущерба (ЭУ) от загрязнения водного объекта i -м ЗВ (ΣY_i) за проектный период эксплуатации ОС, то есть $\Sigma(Z_i + \Sigma Y_i)$ мин. При должном обосновании возможно использование других экономических критериев оптимальности: максимального дифференциального дохода, минимального срока окупаемости капиталовложений и др. При окончательном выборе оптимальных вариантов необходимо учитывать социально-экологические условия объекта, которые в ряде случаев будут приоритетными.

За расчетные величины ОГХ принимаются наибольшие из найденных для всех вариантов расчета значения направляемых на ОС расходов (расчетной производительности) и объемов загрязненного стока воды с ЗТ.

Расчетные расходы и производительность ОС

Расчетная общая производительность ОС накопительного типа по очистке поверхностного и дренажного стока определяется по формуле [1]:

$$P \approx \frac{q_c - Q_n}{3,6(T_n - T_m - T_o)}, \text{ л/с} \quad (1)$$

где q_c — предельный суточный расход талых (дождевых и дренажных) вод, направляемых на ОС, м³/сут;

Q_n — суточный объем возвратных промывочных вод, м³;

T_n — нормативный период переработки суточного объема стока, ч;

T_m — продолжительность технологических перерывов в работе ОС, ч;

T_o — продолжительность периода отстаивания стока, ч.

Нормативный период переработки суточного объема стока в ОС должен быть существенно больше продолжительности его отстаивания, которая определяется исходя из величин гидравлической крупности частиц взвешенных веществ, скорости водного потока и максимальной глубины наполнения аккумулирующего резервуара (отстойника) [1]. Так как, как правило, $T_n \gg (T_m + T_o)$ и $q_c \gg Q_n$, то в сравнительных гидролого-экономических расчетах можно приближенно принять $(T_m + T_o) \approx 0$ и $Q_n \approx 0$.

Учитывая, что в период весеннего снеготаяния талый сток будет поступать на ОС каждые сутки, нормативная продолжительность его переработки без аккумулирующего резервуара должна быть не более 24 часов. При устройстве аккумулирующего резервуара в зависимости от его объема T_n увеличивают до 30–50 часов и более.

Для дождевого стока $T_n \approx (T_o + 24)$, где T_o — средняя продолжительность бездождевого (сухого) периода, который для Северо-Запада РФ составляет 48–72 часа.

Предельный суточный расход талых вод $p\%$ обеспеченности, направляемый на ОС, наблюдается, как правило, в дневные часы на пике половодья и определяется в соответствии с указаниями [1, 3–6].

Предельный суточный суммарный расход дождевых, поливомоечных и дренажных вод $p\%$ обеспеченности, направляемый на ОС, равен:

$$q_c = K_{oc} \cdot q_{p\%} = K_{oc} \cdot (Q_{лс} + Q_{пм} + Q_{др}), \text{ м}^3$$

$$Q_{лс} = 10 \cdot (K_{p\%} \cdot h_{сос}) \cdot \varphi_q \cdot F$$

$$Q_{пм} = 10 \cdot q_{пм} \cdot \varphi_{ка} \cdot F_{пм}$$

$$Q_{др} = 86,4 \cdot (q_{до} \cdot F_o + q_{дз} \cdot F_з)$$

где: $q_{p\%}$ — суммарный максимальный суточный приток воды $p\%$ обеспеченности с ЗТ в коллектор (до разделительной камеры), м^3 ;
 $Q_{лс}$ — максимальный суточный приток дождевых вод с ЗТ, м^3 ;
 $Q_{пм}$ — приток поливомоечных вод при 1 поливе (мойке), м^3 ;
 $Q_{др}$ — максимальный суточный приток дренажных вод с ЗТ, м^3 ;
 $q_{пм} = 0,3–1,5$ л на 1 м^2 — расход воды на 1 мойку (полив) асфальтобетонных покрытий дорог и стоянок и пр. на ЗТ [7];
 $\varphi_{ка}$ — коэффициент поверхностного стока воды с асфальтобетонных покрытий дорог и стоянок на ЗТ [1];
 F — общая площадь ЗТ, га;
 $F_{пм}$ — площадь поливомоечных асфальтобетонных покрытий дорог, стоянок и пр. на ЗТ, га;
 φ_q — средневзвешенный коэффициент стока дождевых вод с ЗТ;
 $h_{сос}$ — расчетный **средне многолетний** максимальный суточный слой осадков [9–11], мм;
 $K_{p\%}$ — ордината кривых обеспеченностей биномиального или трехпараметрического (Пирсона 3-го типа) распределения вероятностей осадков;

$q_{до}, q_{дз}$ — максимальный модуль дренажного стока с «открытой» (газоны, парки, лесопарки, кладбища и пр.) и «закрытой» площади ЗТ соответственно, л/(с*га);

$F_o, F_з$ — «открытая» и «закрытая» площади ЗТ соответственно, га.

Учитывая, что до 60–70 % загрязненного предельного суточного расхода будет задерживаться накопителями (отстойниками), средний за расчетные сутки половодья (паводка) секундный расход, сбрасываемый в водоток с ОС **накопительного типа**, должен быть равен их расчетной производительности.

Максимальный модуль дренажного стока изменяется в зависимости от водности сезона или обеспеченности стока примерно в пределах от 0,3 ($p > 75\%$) до 1 ($p < 25\%$) л/(с*га) и более на «открытых» площадях ЗТ и от 0,1 ($p > 75\%$) до 0,4 ($p < 25\%$) л/(с*га) на «закрытых» площадях ЗТ [8].

Следует отметить, что величина $Q_{пм}$ в среднем может достигнуть 20 % от суточного расхода дождевых вод только в «сухие» годы и не превысит 2–3 % во влажные. Поэтому учитывая невысокую точность определения исходных данных, сток загрязненных поливомоечных вод в суммарном стоке целесообразно учитывать только в «сухие» годы.

Оценка экологического ущерба от загрязнения водного объекта

Экологический вред или ущерб от загрязнения водного объекта возникает в результате превышения допустимых концентраций ЗВ в сбрасываемых стоках с ЗТ и ОС:

- в местах их выпуска;
- в расчетном створе водотока ниже выпуска.

В первом случае место выпуска располагается в пределах населенного пункта или рекреационной зоны, а также при питьевом

и рыбохозяйственном характере использования водотока. В последние годы в связи с ужесточением экологического законодательства РФ большинство даже очень небольших водотоков относят к этой категории.

Расчеты ЭУ основаны на **компенсационном** принципе оценки и возмещения размера вреда по величине суммарных затрат, необходимых для устранения его причин и последствий. Таким образом, ЭУ должен определяться в зависимости от стоимости очистки **сверхдопустимой (сверхлимитной)** массы ($\sum M_i$) загрязняющего вещества, попадающего в водный объект.

В соответствии с Методикой [12] без учета поправочных коэффициентов, которые для сравнительных оптимизационных расчетов можно принять равными единице, ЭУ составит:

$$\sum Y_i = H_i \cdot \sum M_i \quad (3)$$

где $\sum Y_i$ – размер вреда (ЭУ) от i -го ЗВ, тыс. руб.;

H_i — таксы для исчисления размера вреда от сброса i -го ЗВ в водные объекты; определяются в соответствии с [12], тыс. руб./т;

$\sum M_i$ — суммарная сверхдопустимая масса ЗВ, сброшенная в водный объект за весь период эксплуатации ОС, т.

В водоприемник будет поступать как очищенный сток с ОС, так и неочищенный, сбрасываемый непосредственно в ВО с помощью разделительной камеры, установленной на коллекторе, в который направляется поверхностный и дренажный сток со всей площади ЗТ [13–15].

Величина $\sum M_i$ вычисляется для каждого варианта обеспеченности загрязненного стока по уравнению баланса масс стока ЗВ в виде разности между общей массой стока ЗВ, поступающей в водный объект с ЗТ за весь период эксплуатации ОС, и предельно допустимой массой стока ЗВ, который может быть сброшен в водный объект за этот же период, то есть:

$$\begin{aligned} M_{p+1} &= 10^{-6} \cdot (W_{oc} \cdot C_{ок} + W_{го} \cdot C_c)_{p+1} - НДС_{p+1} = 10^{-6} \cdot W_{го}(C_c - C_{ок})_{p+1}, \text{ т} \\ НДС_{p+1} &= 10^{-6} \cdot W_{p+1} \cdot C_{ок}, \text{ т} \\ M_p &= 10^{-6} \cdot (W_{oc} \cdot C_{ок} + W_{го} \cdot C_c)_p - НДС_p = 10^{-6} \cdot W_{го}(C_c - C_{ок})_p, \text{ т} \\ НДС_p &= 10^{-6} \cdot W_p \cdot C_{ок}, \text{ т} \end{aligned} \quad (4)$$

где M_{p+1} и M_p — сверхдопустимая масса сброшенного в водный объект стока ЗВ для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности, т;

C_c — средняя концентрация ЗВ в талом или дождевом максимальном стоке с ЗТ, который сбрасывается без очистки в ВО, г/м³;

$C_{ок}$ — допустимая концентрация ЗВ

в талом или дождевом очищаемом стоке воды для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности, г/м³;

$W_{p\%}$ (W_{p+1} , W_p) — суммарный объем стока поверхностных (талых, дождевых, поливомоечных) и дренажных вод с ЗТ для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности, м³;

$W_{60} = W_p - W_{oc}$ — объем стока с ЗТ p и $(p+1)$ обеспеченности, отводимый непосредственно в водный объект, то есть минуя ОС, м³;

W_{oc} — объем стока p и $(p+1)$ обеспеченности, отводимый на ОС, м³;

$НДС_p$ — предельно допустимая масса стока ЗВ, поступающая в ВО с ЗТ для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности (прилож. 2), т.

Из формулы (4) следует, что экологический ущерб от загрязнения водного объекта возникает в случае $C_c > C_{ок}$.

Используя кривую («ломаный» график) обеспеченности (повторяемости) сверхдопустимой массы стока ЗВ, сброшенного в водный объект при $K_{oc} < 1$, а также формулу площадей трапеций на ней, получим выражение для определения накапливаемых сумм $\sum M_i$ в период эксплуатации ОС в виде:

$$\sum M_{p+1} = \sum M_p + 0,5 \cdot (M_{p+1} + M_p) \cdot (N_{p+1} + N_p) \quad (5)$$

где p — номер варианта обеспеченности стока (1... n);

N_{p+1} и N_p — повторяемость или число лет превышения рассчитанных **годовых или сезонных масс** загрязнения ВО в период эксплуатации ОС для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности стока.

Величины **средней и допустимой** концентрации основных загрязняющих веществ (взвешенных и биогенных веществ, нефтепродуктов, СПАВ и др.) определяют в соответствии с [1]. Для обеспечения условия непревышения ПДК ЗВ в местах выпуска стоков в водоток принимаем $C_{ок} = C_{нок}$ (где $C_{нок}$ — **предельно допустимая** концентрация ЗВ_{*i*} в стоке, сбрасываемом в водный объект, г/м³).

Кратность основного разбавления сточных вод до контрольного створа в водотоке

(n_p), необходимая для расчетов допустимой концентрации ЗВ, НДС и др., определяется отдельно для весеннего половодья и летнего (летне-осеннего) дождевого паводка [1].

Конструкции и параметры сооружений ОС (накопитель, насосная станция и пр.) должны рассчитываться на прием и переработку определенной массы ЗВ $p\%$ обеспеченности (M_p) [16]. При полном отводе стока с ЗТ на ОС, то есть при $K_{oc} = 1$, часть поступившей к ОС сверх этой массы ЗВ, равная разности ($M_{p+1} - M_p$), будет без очистки сбрасываться в ВО, так как она не может быть «обработана» из-за конструктивных ограничений. Таким образом, сверхдопустимая масса стока ЗВ при $K_{oc} = 1$, которую мы вынуждены сбрасывать в водный объект без очистки в период эксплуатации ОС по каждому варианту обеспеченности стока, составит:

$$\sum M_{p+1} = \sum M_p + 0,5 \cdot (M_{p+1} - M_p) \cdot (N_{p+1} - N_p) \quad (6)$$

Для **годовых** или **сезонных** объемов стока и масс ЗВ, поступающих в ВО, повторяемость их превышения равна [3]:

$$N = \frac{100}{p}, \text{ год (сезон)} \quad (7)$$

Тогда повторяемость или число лет превышения рассчитанных годовых или сезонных объемов стока и масс ЗВ $p\%$ обеспеченности за период эксплуатации ОС (M) составит:

$$N_p = p \cdot \frac{M}{100} = \frac{100}{N} \cdot \frac{M}{100} = \frac{M}{N} \quad (8)$$

Исходя из свойства соотношения площадей подобных треугольников, аппроксимирующих гидрографы стока с ЗТ (W_m) и в водный объект (W_{60}), получим:

$$\frac{W_{60}}{W_m} = \left(\frac{q_{p\%} - q_c}{q_{p\%}} \right)^2. \quad (9)$$

Таким образом, объем стока **талых** вод, направляемых на ОС (W_{oc}) для различных вариантов K_{oc} , будет равен:

$$W_{oc} = W_m - W_{60} = W_m \left[1 - \left(\frac{q_{p\%} - q_c}{q_{p\%}} \right)^2 \right] = W_m \left[1 - (1 - K_{oc})^2 \right]. \quad (10)$$

Для определения объема стока поверхностных и дренажных вод $p\%$ обеспеченности (W_{oc}), поступающих на ОС из разделительной камеры в теплый период года, можно использовать приближенную эмпирическую зависимость:

$$W_{oc} = W_{\partial+dp} \cdot \left(\frac{q_c}{q_{p\%}} \right)^\gamma = W_{\partial+dp} \cdot (K_{oc})^\gamma, \quad (11)$$

где γ — показатель степени; изменяется в пределах 0,3–0,5;

$W_{\partial+dp} = W_{\partial} + W_{dp}$ — суммарный объем поверхностного и дренажного стока, поступающий с ЗТ в коллектор, м³.

Суммарный объем поверхностного стока **дождевых и поливомоечных** вод $p\%$ обеспеченности с ЗТ в теплый период года (W_{∂}) вычисляется с учетом рекомендаций [1, 5–7].

Объем дренажного стока с систем осушения на ЗТ (W_{dp}) определяется в зависимости от объемов инфильтрационного притока воды в дренаж и утечек воды из водонесущих коммуникаций,

к которым следует отнести водопроводную сеть, дождевую и бытовую канализацию [8].

Затраты на очистку загрязненного поверхностного стока

Капитальные и эксплуатационные затраты на очистку загрязненного поверхностного стока с ЗТ за проектный период эксплуатации ОС (Z_i) зависят в основном от стоимости оборудования (сооружений) и сметных (укрупненных) нормативов на их строительство и эксплуатацию, принимаемых, как правило, из проектно-сметной документации. Стоимость оборудования следует определять в зависимости от расчетной производительности, числа функций и степени очистки воды от ЗВ. В большинстве случаев производится очистка талых и дождевых стоков с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов, реже — от СПАВ и биогенных веществ.

Величина Z_i вычисляется по каждому расчетному варианту в виде суммы текущих (эксплуатационных) затрат и единовременных капитальных вложений в строительство ОС:

$$Z_i = (K_i + \sum \mathcal{E}_i), \text{ тыс. р.}$$

$$K_i = C_{об} + C_{мн} + C_{нпр} + C_{нр}$$

$$C_{об} = A \cdot P^n$$

$$\sum \mathcal{E}_i = 0,01 \cdot K_i \cdot K_3 \cdot M \quad (12)$$

$$C_{мн} = 0,01 \cdot K_{мн} \cdot C_{об}$$

$$C_{нпр} = 0,01 \cdot K_{нпр} \cdot (C_{об} + C_{мн})$$

$$C_{нр} = 0,01 \cdot K_{нр} \cdot (C_{об} + C_{мн} + C_{нпр})$$

где K_i — затраты на строительство ОС, тыс. р;

$\sum \mathcal{E}_i$ — сумма эксплуатационных затрат за период эксплуатации ОС, тыс. р;

$C_{об}$ — стоимость оборудования, тыс. р;

P — расчетная производительность очистных сооружений, л/с;

$C_{мн}$ — стоимость строительно-монтажных и пусконаладочных работ;

$C_{нпр}$ — стоимость проектно-изыскательских работ;

$C_{нр}$ — накладные расходы;

$K_{нпр}$ — норматив затрат на проектно-изыскательские работы (5–7), %;

$K_{мн}$ — норматив затрат на строительно-монтажные и пусконаладочные работы. С учетом накладных расходов, плановых накоплений, НДС и пр. его величина достигает 30–50 % и более;

$K_{нр}$ — норматив накладных расходов (5–10), %;

K_3 — норматив ежегодных затрат на эксплуатацию ОС (10–15), %;

M — проектный период эксплуатации ОС (30–50 и более), лет;

A, n — параметры зависимости, определяемые по данным поставщиков (про-

изводителей) оборудования. Для оборудования, предназначенного для очистки талых и дождевых стоков с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов в Северо-Западной зоне РФ ориентировочно $A = 10–20, n = 1,2–1,5$.

Результаты оптимизационных расчетов

В соответствии с разработанным способом (методикой) на примере пригорода Санкт-Петербурга произведены оптимизационные расчеты гидрологических характеристик ОС с вариациями:

— стоимости ОС от относительно недорогих, предназначенных для обработки взвешенных веществ и нефтепродуктов до дорогих, обрабатывающих еще и биогенные загрязняющие вещества;

— концентрации ЗВ в максимальном стоке с ЗТ, который сбрасывается без очистки из разделительной камеры в водоприемник;

— коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s) кривой распределения вероятностей стока воды с ЗТ;

— расчетного периода (половодье и летне-осенний дождевой паводок).

Отметим, что допустимая концентрация ЗВ в очищаемом стоке вычислялась без учета качества максимального стока, то есть в соответствии рекомендациями [1, 2, 5].

Анализ результатов многовариантных расчетов (таблица 1) показал:

1. Величина суммы затрат и ущерба от загрязнения водного объекта $\sum(Z_i + \sum Y_i)$ зависит от принимаемых в расчетах ОС, обеспеченности стока воды с ЗТ и коэффициента его разделения. С увеличением K_{oc} она возрастает.

2. Минимальная сумма $\sum(Z_i + \sum Y_i)$ получена для вариантов с очисткой дождевого

и дренажного стока до допустимых концентраций ЗВ в многоводные годы 5–10 % обеспеченности при $K_{oc} = 0,4–0,6$ и производительности ОС (П) в диапазоне от 10 до 20 л/с. Причем при очистке стока от нефтепродуктов в половодье величина П снижается до 5–10 л/с при $K_{oc} = 1$. Удельная оптимальная производительность ОС в расчете на 1 га изменяется примерно от 0,2 до 0,4 л/(с*га).

3. При расположении выпуска очищенных стоков в населенном пункте или рекреационной зоне, а также при питьевом и рыбохозяйственном использовании водотока следует в половодье полностью отводить загрязненный талый сток с ЗТ на очистные сооружения, ориентируясь на среднегодовые значения ($p \approx 40\%$) и $P = 5–8$ л/с, принимая в расчетах $C_{ок} = C_{нок}$ и $K_{oc} = 1$. Оптимальная производительность систем очистки дождевого и дренажного стока с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов будет в 2–3 раза больше, чем для талого стока и на 20–30 % больше расчетной произво-

дительности, определенной в соответствии с нормативно-методическими рекомендациями [1].

4. С увеличением концентрации взвешенных веществ (C_c) с 50 до 400 г/м³ в максимальном дождевом стоке с ЗТ, который сбрасывается без очистки из разделительной камеры в водоприемник, оптимальная производительность ОС при $C_{ок} = C_{нок}$ возрастает примерно в 3 раза, K_{oc} изменяется от 0,2 до 0,6 при $p = 5–10\%$. Это обстоятельство необходимо учесть при оценке указанной характеристики качества стока, отдавая безусловное предпочтение полевому методу определения C_c , который является наиболее объективным и точным методом его определения.

5. При увеличении стоимости оборудования в 4–5 раз оптимальная производительность ОС снизится только на 30–35 %.

6. При изменении коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s) в 1,5–2 раза производительность ОС возрастет не более чем на 10 %.

ТАБЛИЦА 1. Основные результаты гидролого-экономических расчетов оптимальных характеристик систем очистки стока с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Пригород г. Санкт-Петербурга. $F = 50$ га, $M = 50$ лет, $np = 80$, $C_v = 0,3$, $C_s/C_v = 2$

ЗВ	Вид стока	$C_{дк}(C_c)$, г/м ³	$\Sigma(3I_i + \Sigma Y_i)$ млн р.	Соб, млн р.	p, %	K_{oc}	П, л/с	W_{oc} , тыс. м ³
Взвешенные вещества	Талый	97(250)	3,1	0,16	40	1	7,6	14,7
		10(250)	3,1	0,16	40	1	7,6	14,7
	Дождевой и дренажный	21(250)	5	0,42	5	0,4	17	206
		10 (250)*2	4,4	0,35	10	0,4	14,5	95
		10(50)	2	0,18	5	0,2	8,5	167
		10(100)	4	0,35	10	0,4	14,5	179
		10(400)	7,3	0,68	5	0,6	26	233
		10(250)*1	2,9	0,24	5	0,6	26	232
		10 (250)*3	9,7	0,8	20	0,6	18	178

Окончание ТАБЛИЦЫ 1

ЗВ	Вид стока	$C_{\text{дк}}(C_c)$, г/м ³	$\sum(3i+\Sigma Y_i)$ мин. млн р.	Соб, млн р.	Р, %	$K_{\text{ос}}$	П, л/с	$W_{\text{ос}}$, тыс. м ³
Нефтепродукты	Талый	0,3	1,5	0,096	30	0,6	5	3,9
	Дождевой и дренажный	0,3	4	0,35	10	0,4	14,5	179
	Нормативный* ⁴	0,3	—	—	—	0,3	11,5	—

Примечание. *¹, *², *³ — низкая, средняя и высокая стоимость оборудования ОС соответственно.
*⁴ — значения $K_{\text{ос}}$ и P определены в соответствии с рекомендациями [1].

Выводы

Разработан способ гидролого-экономического обоснования оптимальных значений гидрологических характеристик загрязненного стока с ЗТ, необходимых для определения конструкций и параметров систем его очистки. Оптимизационные расчеты выполняют по основным загрязняющим веществам отдельно для весеннего половодья (талый сток) и летне-осеннему (летнему) дождевому паводку (дождевой сток). При разных вариантах водности сезонов и коэффициента разделения стока с ЗТ, поступающего в разделительную камеру коллектора. Произведены многовариантные расчеты и установлено влияние вариации основных исходных данных на расчетные характеристики.

Библиографический список

1. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. / ФГУП «НИИ Водгео». М., 2015. 146 с.
2. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85. Утв. приказом

Министерства строительства и ЖКХ РФ (Минстрой России) от 25 декабря 2018 г. № 680/пр, введен в действие с 26 июня 2019 г. М.: Стандартиформ, 2019. 76 с.

3. СП 529.1325800.2023 Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Утв. приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ № 654/пр от 11 сентября 2023. М. ФАУ «ФЦС». 2023.103 с.

4. Пособие по определению основных расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 447 с.

5. Дикаревский В. С., Курганов А. М., Нечаев А. П. и др. Отведение и очистка поверхностных сточных вод. Л.: Стройиздат, 1990. 223 с.

6. Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б. Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на селитебных и производственных территориях Северо-Запада РФ // Известия ПГУПС. 2016, вып. 1 (46). С. 68–76.

7. СП 32.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.02-84.

8. Канцибер Ю. А., Штыков В. И. Оценка характеристик дренажного стока с селитебных и производственных территорий Северо-Запада РФ // Инженерно-строительный журнал. СПб., 2012. Т. 30, вып. 4. С. 46–51. DOI: 10.5862/МСЕ.30.7

9. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова и др. // ВНИИГМИ-МЦД, 2024 [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/svc/aisori-climsprn/> (дата обращения: 14.04.2024).
10. СП 131.13330.2020. Свод правил. СНиП 23-01-99*, введен 24.05.2021 / Строительная климатология. М.: Минстрой России, 2020. 146 с.
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолет. Данные. Ч. 1–6 / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. СПб.: Гидрометеорологиздат, 1993. 22 с.
12. Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. Утверждена приказом Минприроды России от 13 апреля 2009 года № 87 (с изменениями на 26 августа 2015 года).
13. Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б., Штыков В. И. Основные расчетные гидрологические характеристики систем очистки поверхностного стока в Северо-Западной зоне России // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, вып. 4. С. 801–810. DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-801-810. EDN ALKZAL
14. Иванов В. Г., Черников Н. А., Твардовская Н. В. Интенсивность расчетных дождей и анализ соотношения объемов дождевой и производственной сточной воды для железнодорожных станций сибирского и дальневосточного регионов России // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, вып. 1. С. 95–104. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-95-104. EDN MBIPEN
15. Chernikov N. A., Tvardovskaya N. V., Okhremenko I. M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies / BRICS Transport. 2023. Vol. 2, iss. 2. DOI 10.46684/2023.2.2. EDN AGSEGJ
16. Черников Н. А., Твардовская Н. В. Совместная очистка производственных и дождевых сточных вод / III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года // СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. Т. 2. С. 186–188. EDN NIIDJB
- Дата поступления: 27.04.2024
Решение о публикации: 31.05.2024
- Контактная информация:**
КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент; kanziber3@yandex.ru
ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук, доцент; pol1nom@yandex.ru
ШТЫКОВ Валерий Иванович — докт. техн. наук, профессор; shtykov41@mail.ru

Optimization of hydrological calculations for surface and drainage runoff treatment systems

Ju. A. Kanziber, A. B. Ponomarev, V. I. Shtykov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kanziber Ju. A., Ponomarev A. B., Shtykov V. I. Optimization of hydrological calculations for surface and drainage runoff treatment systems // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2, P. 332–344. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-332-344

Abstract

Objective: to develop a method for determining the optimal hydrological characteristics of systems for treating contaminated surface and drainage waters. **Methods:** the pollutant balance equation was applied. For comparison, the method of the Vodgeo Research Institute was used. The costs of treatment and environmental damage from pollution of watercourses were studied for various water levels of the year and the parameters of treatment facilities. The main parameters chosen are the types of pollutants (suspended substances and petroleum products) and the separation coefficient of the runoff in the separation chambers. **Results:** a method has been developed for optimization calculations of the hydrological characteristics of surface and drainage water treatment systems, taking into account the likelihood of runoff during high water and floods, the costs of construction and operation of treatment facilities and damage from pollution of watercourses. As an example, optimization calculations were performed for several options for treating melt, rain and drainage runoff. **Practical importance:** the method of optimization calculations of environmental protection will allow a more reasonable and accurate determination of the required degree of wastewater treatment, productivity and parameters of treatment facilities, and in some cases — to reduce the degree of pollution of watercourses.

Keywords: surface runoff, treatment facilities, pollution of a water body, water body, precipitation, hydrological characteristics, runoff, water flow, flood, rain flood, dilution factor, availability, repeatability, reliability.

References

1. Rekomendacii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverhnostnogo stoka s selitebnyh territorij, ploshhadok predpriyatij i opredeleniju uslovij vypuska ego v vodnye ob#ekty. / FGUP «NII Vodgeo». M., 2015. 146 s. (In Russian)
2. SP 32.13330.2018. Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. SNiP 2.04.03-85. Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKH RF (Minstroj Rossii) ot 25 dekabrja 2018 g. № 680/pr, vveden v dejstvie s 26 ijunja 2019 g. M.: Standartinform, 2019. 76 s. (In Russian)
3. SP 529.1325800.2023 Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKH RF № 654/pr ot 11 sentjabrja 2023. M. FAU «FCS». 2023. 103 s. (In Russian)
4. Posobie po opredeleniju osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 447 s. (In Russian)
5. Dikarevskij V. S., Kurganov A. M., Nechaev A. P. i dr. Otvedenie i ochistka poverhnostnyh stochnyh vod. L.: Strojizdat, 1990. 223 s. (In Russian)
6. Kanziber Ju. A., Ponomarev A. B. Raschety harakteristik poverhnostnogo stoka sistem vodootvedeniya na selitebnyh i proizvodstvennyh territorijah Severo-Zapada RF // *Izvestija PGUPS*. 2016, vyp. 1 (46). S. 68–76. (In Russian)
7. SP 32.13330.2021. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzhenija. SNiP 2.04.02-84. (In Russian)

8. Kanciber Ju. A., Shtykov V. I. Ocenka harakteristik drenazhnogo stoka s selitebnyh i proizvodstvennyh territorij Severo-Zapada RF // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. SPb., 2012. T. 30, vyp. 4. S. 46–51. DOI: 10.5862/MCE.30.7. (In Russian)
9. Nauchno-prikladnoj spravochnik "Klimat Rossii" / V. N. Razuvaev, O. N. Bulygina, N. N. Korshunova i dr. // VNIIGMI-MCD, 2024 [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://meteo.ru/svc/aisori-climprn/> (data obrashhenija: 14.04.2024). (In Russian)
10. SP131.13330.2020.Svodpravil.SNIP23-01-99*, vveden 24.05.2021 / Stroitel'naja klimatologija. M.: Ministroy Rossii, 2020. 146 s. (In Russian)
11. Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogolet. Dannye. Ch. 1–6 / Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. 22 s. (In Russian)
12. Metodika ischislenija razmera vreda, prichinenogo vodnym ob#ektam vsledstvie narushenija vodnogo zakonodatel'stva. Utverzhdena prikazom Minprirody Rossii ot 13 aprelya 2009 goda № 87 (s izmenenijami na 26 avgusta 2015 goda). (In Russian)
13. Kanciber Ju. A., Ponomarev A. B., Shtykov V. I. Osnovnye raschetnye gidrologicheskie harakteristiki sistem ochistki poverhnostnogo stoka v Severo-Zapadnoj zone Rossii // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. 2023. T. 20, vyp. 4. S. 801–810. DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-801-810. EDN ALKZAL. (In Russian)
14. Ivanov V. G., Chernikov N. A., Tvardovskaja N. V. Intensivnost' raschetnyh dozhdej i analiz sootnoshenija ob#emov dozhdevoj i proizvodstvennoj stochnoj vody dlja zhelezodorozhnyh stancij sibirskogo i dal'nevostochnogo regionov Rossii // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. 2019. T. 16, vyp. 1. S. 95–104. DOI 10.20295/1815-588X-2019-1-95-104. EDN MBIPEH. (In Russian)
15. Chernikov N. A., Tvardovskaja N. V., Okhremenko I. M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies / BRICS Transport. 2023. Vol. 2, iss. 2. DOI 10.46684/2023.2.2. EDN AGSEGJ
16. Chernikov N. A., Tvardovskaja N. V. Sovmestnaja ochistka proizvodstvennyh i dozhdevykh stochnykh vod / III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda // SPb: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I, 2021. T. 2. S. 186–188. EDN NIIDJB. (In Russian)

Received: 27.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Author's information:

Yuri A. KANZIBER — PhD in Engineering, Associate Professor; kanziber3@yandex.ru

Andrei B. PONOMAREV — PhD in Engineering, Associate Professor; pol1nom@yandex.ru

Valery I. SHTYKOV — PhD in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru