

РОЛЬ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ЖИДКОСТИ ПРИ РАБОТЕ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Феофанов Ю. А.

ROLE OF LIQUID RECIRCULATION AT BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Feofanov Yu. A.

Аннотация

Введение. На станциях биологической очистки сточных вод рециркуляция очищенной жидкости, или иловой смеси, предусматривается для снижения высокой начальной концентрации загрязнений, повышения эффективности работы сооружений, транспортирования возвратного активного ила в аэротенках и для других целей. Применение или увеличение кратности рециркуляции при работе сооружений биологической очистки приводит (вместе с разбавлением исходных сточных вод очищенной жидкостью) к увеличению гидравлической нагрузки на эти сооружения, а также на сооружения по илоотделению, вносит изменения в структуру движения потока жидкости в сооружениях и оказывает определенное влияние на эффективность их работы. Таким образом, рециркуляция жидкости в определенных условиях может приводить как к положительным результатам (повышению эффективности очистки сточных вод), так и к негативным последствиям (увеличению объемов вторичных отстойников и росту энергозатрат на перекачку рециркуляционного расхода). **Методы.** Целью работы являлась оценка комплексного воздействия рециркуляции жидкости на эффективность работы разных типов сооружений биологической очистки, которая производилась на основании анализа данных о работе производственных сооружений и нормативных материалов. **Результаты.** В статье оценивается роль рециркуляции при работе орошаемых биологических фильтров и аэротенков с наружной и внутренней (продольной) рециркуляцией. Рассмотрено влияние рециркуляции в орошаемых биофильтрах на важные технологические параметры их работы, на условия массообменных процессов и эффективность очистки сточных вод, а также влияние степени рециркуляции иловой смеси и возвратного активного ила в аэротенках на величину рабочей дозы ила и эффективность очистки сточных вод. **Заключение.** Величина кратности рециркуляции при работе сооружений биологической очистки должна быть увязана с достигаемой эффективностью очистки сточных вод и основана на технико-экономических расчетах, повышение степени рециркуляции более эффективно при низкой степени очистки сточных вод и экономически нецелесообразно при достаточно высокой эффективности очистки.

Ключевые слова: биологическая очистка сточных вод, биофильтры, аэротенки, рециркуляция очищенной жидкости и активного ила.

Abstract

Introduction. At biological wastewater treatment plants recirculation of purified liquid or activated sludge is used to reduce the high initial concentration of contaminants, improve the performance of the plants and the transportation of returned activated sludge in aeration tanks, as well as for other purposes. The use of recirculation or recirculation ratio increase at biological wastewater treatment plants leads (together with the dilution of untreated wastewater with treated liquid) to an increase in the hydraulic load in the plants as well as desludging facilities, changes the structure of liquid flow at the plants, and affects their performance. Thus, liquid recirculation under certain conditions can lead to both positive (improvement of wastewater treatment efficiency) and negative consequences (increase in volume regarding final clarifiers and growth of energy consumption for recirculation flow pumping). **Methods.** The purpose of the study was to assess the integrated effect of liquid recirculation on the performance of biological wastewater treatment plants of various types. The assessment was carried out based on the analysis of data on the performance of production facilities as well as standards, specifications, and guidelines. **Results.** The paper evaluates the role of recirculation during the operation of wet biological filters and aeration tanks with external and internal (longitudinal) recirculation. The author considers the influence of recirculation in wet biofilters on essential technological parameters of their work, conditions of mass transfer processes, and wastewater treatment efficiency, as well as the influence of the mixed liquor and returned sludge recirculation rate in aeration tanks on the amount of the dose and wastewater treatment efficiency. **Conclusion.** The recirculation ratio at biological treatment plants should be linked to the achieved wastewater treatment efficiency and based on technical and economic estimates. An increase in the recirculation rate is more efficient at a low degree of wastewater treatment and not economically feasible in case of sufficiently high treatment efficiency. **Keywords:** biological wastewater treatment, biofilters, aeration tanks, recirculation of purified liquid or activated sludge.

Введение

В современной практике работы станций биологической очистки бытовых и производственных сточных вод зачастую используют технологические схемы с рециркуляцией очищенной жидкости. Возможность и необходимость применения рециркуляции жидкости при работе различных типов сооружений биологической очистки сточных вод предусматривается в следующих случаях:

- при высокой начальной концентрации загрязнений в поступающих сточных водах с целью их разбавления очищенной жидкостью;
- при недостаточной степени очистки сточных вод для повышения эффективности работы сооружений;
- для транспортирования возвратного активного ила (в случае применения аэротенков);
- для сохранения биомассы в рабочем состоянии при перерывах в подаче исходных сточных вод (в случае применения орошаемых биофильтров) и в других целях [1, 2, 12, 14, 15, 16].

При очистке городских сточных вод на орошаемых биологических фильтрах концентрация органических загрязнений в жидкости, подаваемой на эти сооружения (по рекомендациям СНиП 2.04.03–85*) ограничивается следующими величинами: для капельных биофильтров показатель БПК_{полн} не должен превышать 220 мг/л, для высоконагружаемых биофильтров (аэрофильтров) — 300 мг/л, для биофильтров с пластмассовой загрузкой — 250 мг/л. При более высоких концентрациях следует предусматривать рециркуляцию очищенной жидкости для разбавления исходного стока. Необходимость в рециркуляции также возникает и в том случае, если при расчете сооружений биологической очистки получен недостаточно высокий эффект очистки и не достигается требуемое качество очищенных сточных вод. Также необходимо предусматривать рециркуляцию на биофильтрах при перерывах в поступлении исходных сточных вод для предотвращения высыхания биопленки на поверхности загрузки [1, 12, 14, 15, 16].

Технология работы аэротенков с традиционными видами илоотделителей (вторичные отстойники, флотаторы) предусматривает циркуляцию очищенной жидкости для возврата активного ила в зону биореакции. Циркулирующий ил в дан-

ном случае представляет собой смесь, состоящую из 0,5–1,2 % активного ила и 99,5–98,8 % очищенной воды. При этом также происходит разбавление исходной концентрации загрязнений поступающих сточных вод циркулирующей очищенной жидкостью. Таким же образом может осуществляться работа биотенков, затопленных биофильтров с неподвижной загрузкой и биореакторов с подвижной загрузкой с целью повторного использования свободно плавающей биомассы в зоне биореакции, а также для повышения эффективности очистки сточных вод.

Более прогрессивные технологии биологической очистки сточных вод с применением мембранных биореакторов (МБР), в которых для илоотделения используются ультрафильтрационные мембраны, не требуют рециркуляции активного ила. Однако в случае недостаточной степени очистки сточных вод на этих сооружениях с целью улучшения качества очищенной воды они так же могут работать с рециркуляцией, как и другие типы биореакторов [1, 11, 12, 15, 16].

Введение или повышение кратности рециркуляции при работе сооружений биологической очистки приводит (вместе с разбавлением исходных сточных вод очищенной жидкостью) к увеличению гидравлической нагрузки на эти сооружения, а также на сооружения по илоотделению. Применение рециркуляции вносит изменения и в структуру движения жидкости в сооружениях биологической очистки и илоотделителях. Все это может оказать определенное влияние на эффективность работы очистных сооружений.

Целью работы являлась оценка комплексного воздействия рециркуляции жидкости на эффективность работы разных типов сооружений биологической очистки.

Методы и материалы Оценка влияния рециркуляции жидкости на изменения условий и эффективности работы сооружений биологической очистки, производилась на основании анализа данных работы производственных очистных сооружений и нормативных материалов. Учитывая различия в технологических и конструктивных особенностях разных типов сооружений биологической очистки, влияние рециркуляции на их работу рассмотрено и оценено ниже отдельно для биофильтров и аэротенков.

Биофильтры с рециркуляцией очищенной жидкости

Технологическая схема работы показана на рис. 1. При введении рециркуляции на биофильтрах кратность рециркуляции (или коэффициент рециркуляции) n определяется исходя из уравнения водного баланса по формуле (1) [14, 15].

$$n = \frac{L_{en} - L_{mix}}{L_{mix} - L_{ex}}, \quad (1)$$

где L_{en} , L_{ex} , L_{mix} — БПК, соответственно, исходных, очищенных сточных вод и их смеси.

Структура потока жидкости в орошаемых биофильтрах зависит от многих факторов (конструкции сооружения, вида загрузки, количества биопленки, способа подачи и распределения жидкости по поверхности загрузки и др.). Однако при оценке влияния рециркуляции на структуру потока жидкости и эффективность работы сооружения основным определяющим фактором здесь является увеличение величины гидравлической нагрузки, которая изменяется прямо пропорционально коэффициенту рециркуляции.

Повышение гидравлической нагрузки, вызванное ростом кратности рециркуляции n , приводит к изменению продолжительности пребывания жидкости в загрузке биофильтра, усилению степени ее перемешивания, лучшему распределению протекающей по поверхности загрузки жидкости и увеличению коэффициента полезного использования загрузочного материала,

а также вносит изменения в условия внешнего массопереноса субстрата и кислорода.

В орошаемых биофильтрах жидкость стекает по загрузке в виде отдельных струек и пленок. При традиционных типах оросительных систем, применяемых на биофильтрах (спринклерные или трубчатые вращающиеся), жидкость подается с перерывами, вследствие чего движение ее через загрузку приобретает прерывистый характер [1, 3, 5–7, 10, 13, 14].

В результате неравномерности и прерывистости движения жидкости в загрузке биофильтра ее поверхность орошается лишь частично и используется не полностью. Растеканию жидкости по загрузке препятствуют силы поверхностного натяжения, которые преобладают в диапазоне величин гидравлических нагрузок, характерных для орошаемых биофильтров [5, 10, 13].

Результаты и обсуждение

Степень полезного использования поверхности загрузки выражается коэффициентом ее использования $a_s = \frac{S_{раб}}{S}$, где S и $S_{раб}$ — соответственно, полная и орошаемая (рабочая) поверхность загрузки. Величина коэффициента a_s меняется в зависимости от величины гидравлической нагрузки, а также от вида загрузочного материала и его удельной поверхности, что выражается уравнениями (2) и (3) [13]:

– в биофильтрах с объемной загрузкой

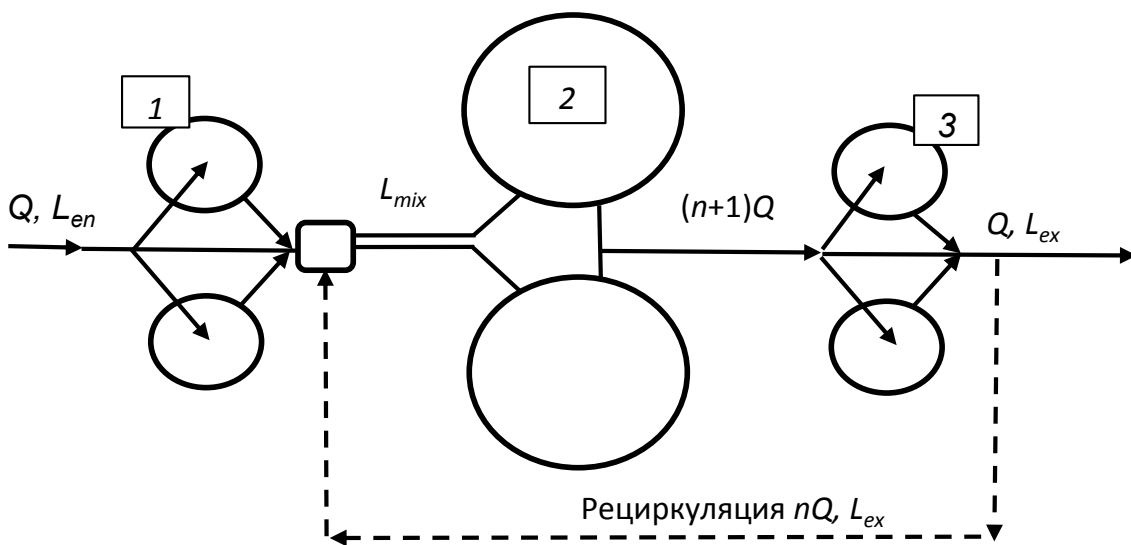


Рис. 1. Технологическая схема работы биофильтров с рециркуляцией очищенной жидкости: 1 — первичные отстойники; 2 — биофильтры; 3 — вторичные отстойники

$$a_s = 0,24 \cdot q^{0,678} \cdot S^{-0,47}; \quad (2)$$

– в биофильтрах с плоскостной блочной загрузкой:

$$a_s = 0,596 \cdot q^{0,578} \cdot S^{-0,6}. \quad (3)$$

Степень перемешивания жидкости при ее протекании через загрузку биофильтра, можно выразить величиной критерия Пекле Pe , который изменяется с повышением гидравлической нагрузки (при введении или усилении кратности рециркуляции) следующим образом (4):

$$\frac{Pe_n}{Pe_0} = (n+1)^\alpha. \quad (4)$$

При изменении коэффициента рециркуляции n меняется и продолжительность пребывания жидкости в сооружении, что с учетом повторного прохождения жидкости через загрузку биофильтра выражается уравнением

$$\frac{t_n}{t_0} = (1+n)^{\alpha_1}. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) применены следующие обозначения: Pe_n , Pe_0 — критерий Пекле, соответственно, при работе биофильтра с рециркуляцией очищенной жидкости (кратностью n) и без нее; t_n , t_0 — продолжительность пребывания жидкости в загрузке биофильтра, соответственно, при работе биофильтра с рециркуляцией и без нее; α , α_1 — эмпирические коэффициенты, величина которых зависит от вида загрузочного материала; в частности, для биофильтров с объемной загрузкой их величины составляют: $\alpha = -0,21$, $\alpha_1 = 0,6$ [13].

Таким образом, введение рециркуляции при работе орошаемых биофильтров приводит к изменению ряда технологических параметров, которые оказывают комплексное влияние на условия внешнего массопереноса субстрата и кислорода к биопленке, на ход процесса и эффективность очистки сточных вод. На рис. 2 приведены данные о работе высоконагружаемых биофильтров с объемной загрузкой с разной кратностью рециркуляции при очистке сточных вод молочного завода [13].

Опыт работы орошаемых биофильтров свидетельствует о том, что применение рециркуляции более эффективно при низкой степени очистки сточных вод (см. рис. 2). В этом случае ввиду неполной очистки воды за один проход через загрузку биофильтра жидкость подвергается доочистке при ее повторном пропуске через сооружение

при рециркуляции (см. рис. 2, кривая 3). В том случае, если биофильтры работают с достаточно высокой степенью очистки сточных вод, повышение кратности рециркуляции малоэффективно (рис. 2, кривые 1, 2). В очищенной жидкости остаются в основном трудноокисляемые вещества, и циркулируемая жидкость проходит через загрузку практически транзитом, без дополнительной доочистки. Из общего потока извлекаются лишь «свежие» загрязнения, поступившие в биофильтр с исходной жидкостью. Таким образом, рециркуляция жидкости является фактором, который может обеспечить повышение эффективности работы орошаемых биофильтров, но целесообразность ее применения и степень рециркуляции следует увязывать с концентрацией загрязнений в поступающей воде, режимом работы биофильтра, типом сооружения, кинетикой процесса и другими факторами.

Рециркуляция иловой смеси в аэротенках

С целью возврата активного ила рециркуляция иловой смеси в аэротенках может осуществляться как по внешнему, так и по внутреннему контурам. На рис. 3 показаны технологические схемы работы аэротенков с наружной рециркуляцией активного ила (схема а) и с внутренней (продольной) рециркуляцией иловой смеси (схема б). По схеме с внутренним рециклом иловой смеси работают, в частности, аэротенки «карусельного» типа, циркуляционные окислительные каналы (ЦОКи). Внутренние и внешние рециклы иловой смеси (и/или возвратного ила) устраиваются также и в более сложных схемах аэротенков, работающих с одновременным удалением азота и фосфора и имеющих аэробные, аноксидные и анаэробные зоны [1, 8, 9, 12].

Не зависимо от схемы работы аэротенков, рециркуляция иловой смеси приводит к разбавлению поступающих сточных вод пропорционально кратности рециркуляции. Степень разбавления исходного стока, в общем случае, определяется по уравнению

$$L_{mix} = \frac{L_{en} + L_{ex} \cdot R_{i\text{общ}}}{1 + R_{i\text{общ}}}, \quad (6)$$

где $R_{i\text{общ}} = (R_{i\text{вн}} + R_{i\text{нар}})$ — общая кратность рециркуляции иловой смеси.

Основное различие между схемами работы аэротенков с наружной и внутренней рециркуля-

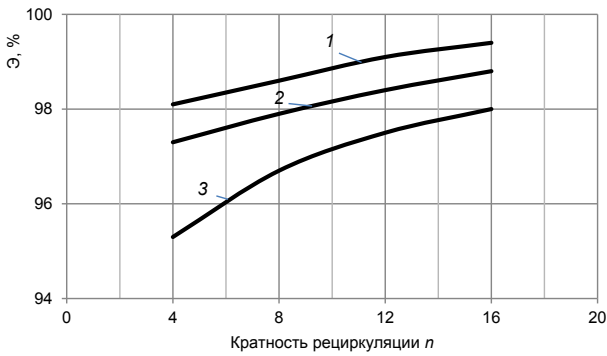


Рис. 2. Зависимость эффективности очистки сточных вод на биофильтрах от кратности рециркуляции при очистке сточных вод молочного завода ($L_{en} = 1200$ мг/л, нагрузка по БПК_{полн}: 1 — 700–900 г/м³ сут; 2 — 1400–1600 г/м³ сут; 3 — 1100–1300 г/м³ сут)

цией иловой смеси заключается в том, что в первом случае при рецикле возвращается сгущенный (в илоотделителе) активный ил, что позволяет уменьшить кратность рециркуляции. Во втором случае циркулирует иловая смесь, концентрация ила в которой близка к рабочей дозе ила био-

реактора, и которая в 3–4 раза ниже, чем в возвратном иле при наружном рецикле. Поэтому, для поддержания одинаковой рабочей дозы ила, кратность рециркуляции при этом должна быть, соответственно, увеличена. Однако, при работе аэротенков с наружной рециркуляцией ила увеличивается объем илоотделителей, поскольку он пропускает суммарный расход циркулирующего ила и сточных вод.

Результаты и обсуждение

Степень рециркуляции активного ила при работе аэротенка определяется исходя из рабочей дозы ила и его илового индекса, который зависит от нагрузки на ил по органическим загрязнениям, сезона года и ряда других факторов. На рис. 4 показана взаимосвязь степени рециркуляции активного ила R_p , нагрузки на ил, илового индекса J_i и концентрации активного ила в аэротенке (по данным СНиП 2.04.03–85*).

Анализ данных рис. 4 показывает, что для поддержания рабочей дозы ила в аэротенке в пределах 2–4 г/л, при иловом индексе 100 см³/г

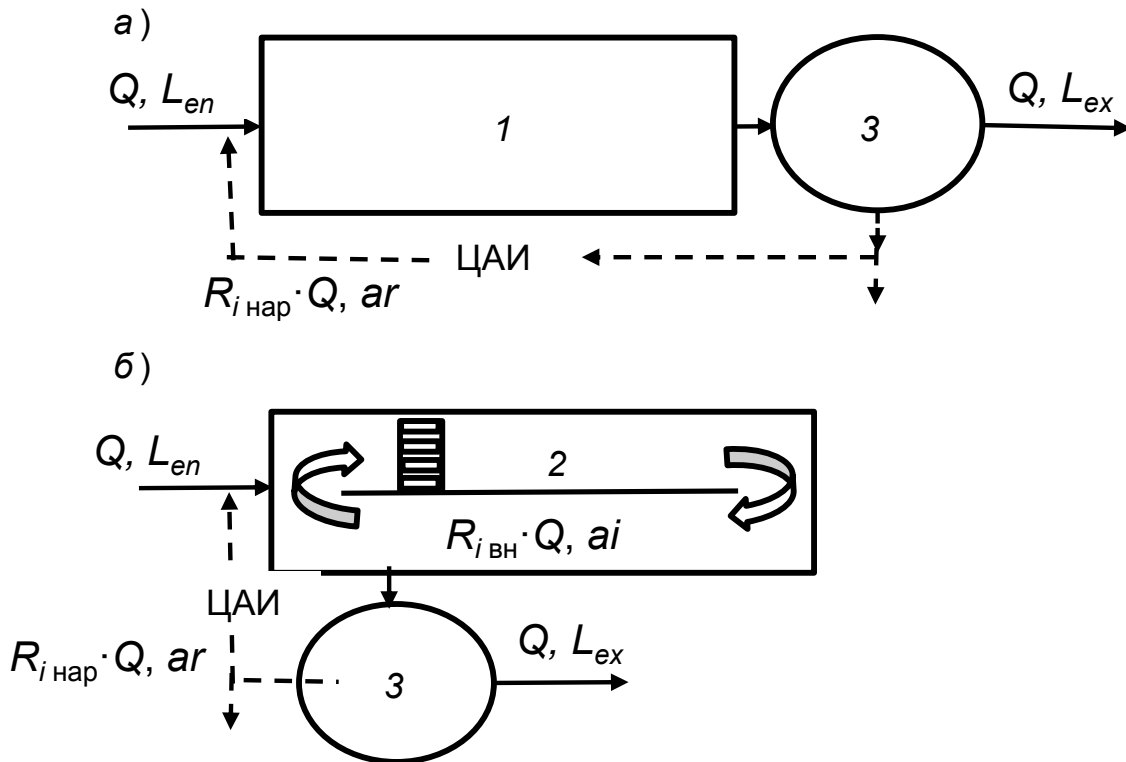


Рис. 3. Технологические схемы работы аэротенков: а — с наружной рециркуляцией ила; б — с внутренней и наружной рециркуляцией иловой смеси; 1 — аэротенк-вытеснитель; 2 — аэротенк «карусельного» типа; 3 — вторичные отстойники

степень рециркуляции возвратного ила составляет 0,25–0,67 (для бытовых сточных вод). Увеличение степени рециркуляции ила, при прочих равных условиях, позволяет увеличить дозу ила в аэротенках и повысить эффект очистки сточных вод. Однако следует учитывать, что с ростом степени рециркуляции возвратного ила R_i возрастает и гидравлическая нагрузка на илоотделители, например, вторичные отстойники. При этом может уменьшиться время пребывания ила в осадочной части отстойника, что приведет к снижению концентрации отводимого из него циркули-

рующего ила и затем к снижению рабочей дозы ила в аэротенке. Во избежание этого при повышении степени рециркуляции ила необходимо поддерживать оптимальную продолжительность уплотнения ила в илоотделителях. Осуществить это на действующих сооружениях порой затруднительно, а повышение гидравлической нагрузки на илоотделители может привести к значительному выносу ила из них (особенно при высоком иловом индексе) и ухудшению качества очищенной воды [4, 8, 9].

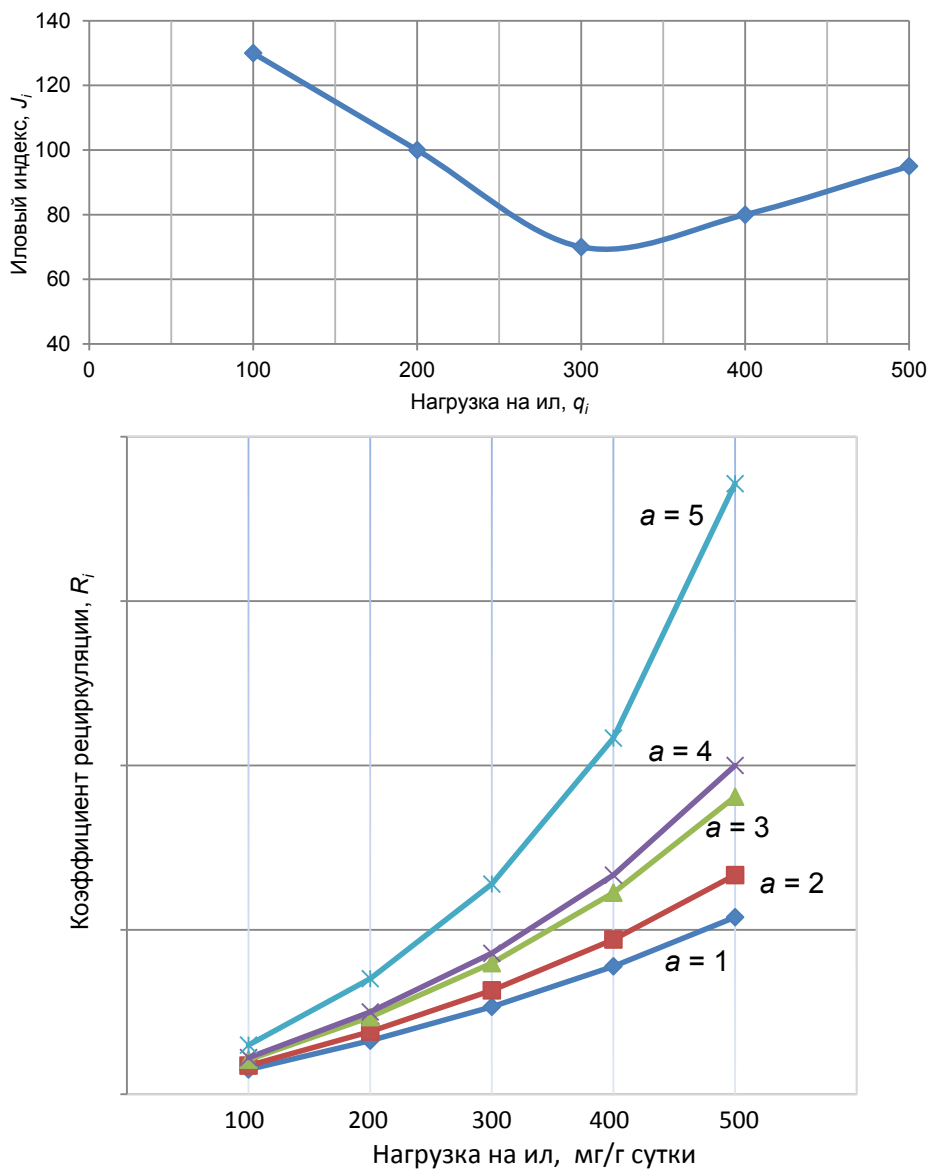


Рис. 4. Зависимость степени рециркуляции иловой смеси и илового индекса от нагрузки на ил и концентрации активного ила в аэротенке

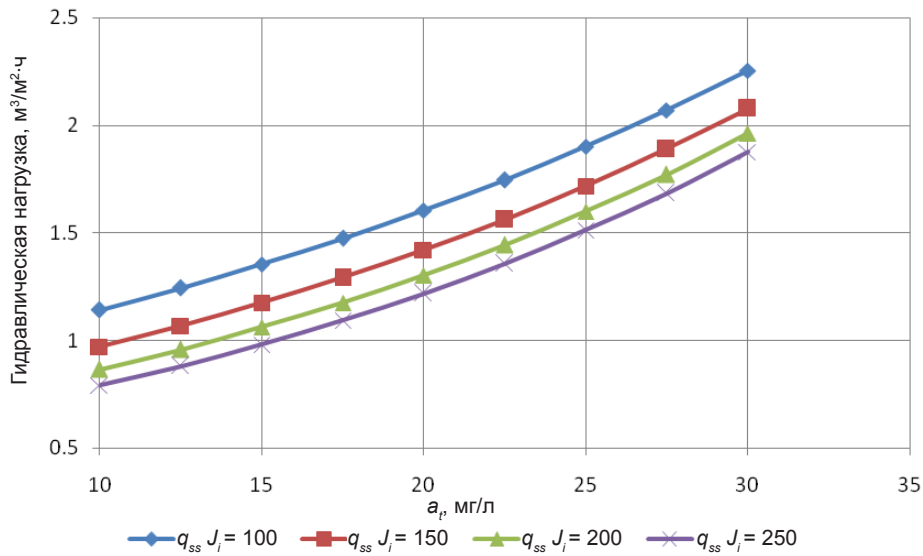


Рис. 5. Вынос ила из вторичных отстойников a_i в зависимости от гидравлической нагрузки q_{ss} и илового индекса J_i

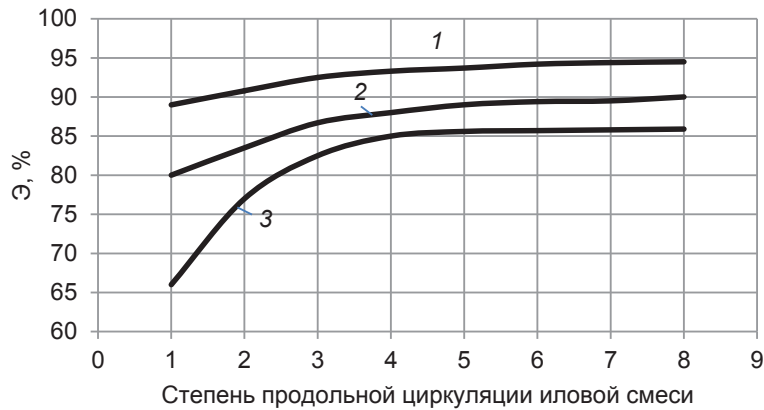


Рис. 6. Зависимость эффекта очистки сточных вод по БПК от степени продольной рециркуляции иловой смеси при: 1 — $t_a = 6,12$ ч, $a_i = 1,3$ г/л; 2 — $t_a = 3,95$ ч, $a_i = 1,65$ г/л; 3 — $t_a = 2,1$ ч, $a_i = 1,45$ г/л

На рис. 5 представлены зависимости выноса ила из вторичного отстойника a_i от гидравлической нагрузки q_{ss} и илового индекса J_i , полученные расчетом по данным СНиП 2.04.03–86* для радиальных отстойников глубиной $H_{set} = 3,1$ м, при дозе ила в аэротенке $a_i = 3,0$ г/л.

Повышенный вынос ила из вторичных отстойников может служить препятствием для увеличения кратности рециркуляции ила в схемах работы аэротенков с наружной рециркуляцией ила (см. рис. 3, а). Например, как следует из рис. 5, при повышении гидравлической нагрузки в два раза (от 1 до 2 м³/м²·ч) за счет увеличения

объема циркуляции ила, при дозе ила в аэротенке 3 г/л и иловом индексе 150 см³/г, вынос ила увеличивается почти в 3 раза (с 10 до 29 мг/л).

В аэротенках с внутренней (продольной) циркуляцией иловой смеси технологические ограничения такого рода отсутствуют. Оптимальная кратность рециркуляции определяется только на основании технико-экономических показателей с учетом достигаемого эффекта очистки.

На рис. 6 приведены данные о работе аэротенков «карусельного» типа при разной степени продольной рециркуляции иловой смеси на разных режимах [2].

В аэротенках с продольной рециркуляцией иловой смеси эффективность очистки существенно возрастает при увеличении кратности цикла от 1 до 3–4, особенно при низкой начальной степени очистки (рис. 6, кривая 3). При высокой степени очистки роль рециркуляции менее эффективна (рис. 6, кривые 1, 2). Следует учитывать, что применение рециркуляции и увеличение объема циркулирующей иловой смеси приводит к повышению энергозатрат практически пропорционально кратности рециркуляции. Поэтому при необходимости введения рециркуляции в технологическую схему работы очистных сооружений ее кратность необходимо увязывать с достигаемой эффективностью очистки сточных вод и технико-экономическими показателями.

Заключение

1. Введение или повышение кратности рециркуляции при работе сооружений биологической очистки приводит (вместе с разбавлением исходных сточных вод очищенной жидкостью) к увеличению гидравлической нагрузки на эти сооружения и на илоотделители, вносит изменения в структуру движения жидкости и оказывает определенное влияние на эффективность работы очистных сооружений.

2. При работе орошаемых биофильтров введение или повышение кратности рециркуляции приводит к изменению продолжительности пребывания в загрузке жидкости, усилению степени ее перемешивания, увеличению полезного использования поверхности загрузочного материала, а также к изменениям условий внешнего массопереноса субстрата и кислорода. Все это при низкой степени очистки сточных вод способствует повышению эффективности работы биофильтров.

3. Увеличение степени рециркуляции ила в аэротенках с внешним рециклом при определенных условиях позволяет увеличить дозу ила и повысить эффект очистки сточных вод. Однако, снижение времени пребывания ила в илоотделителе, из-за возрастания на него гидравлической нагрузки, может привести к повышенному выносу ила, снижению концентрации циркулирующего ила, а затем и рабочей дозы ила в аэротенке. В аэротенках с внутренней (продольной) циркуляцией иловой смеси ввиду отсутствия илоотделителей на этом потоке указанные ограничения

отсутствуют и кратность рециркуляции определяется на основании технико-экономических показателей.

Литература

1. Алексеев, М. И., Иванов, В. Г., Курганов, А. М., Медведев, Г. П., Мишуков, Б. Г., Феофанов, Ю. А., Цветкова, Л. И. и Черников, Н. А. (ред.). (2007). Технический справочник по обработке воды. В 2 т. 2-е изд. Пер. с фр. СПб.: Новый журнал, 1696 с.
2. Баженов, В. И. (2009). Комплексная рециркуляционная модель биохимических процессов аэробной биологической очистки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Щелково: Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности.
3. Джеймс, А. (1981). Математические модели контроля загрязнения воды. Пер. с англ. М.: Мир, 472 с.
4. Кармазинов, Ф. В. (ред.) (2008). Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге. СПб.: Новый журнал, 464 с.
5. Кафаров, В. В. (1979). Основы массопередачи. 3-е изд. М.: Высшая школа, 439 с.
6. Коган, В. Б. (1977). Теоретические основы типовых процессов химической технологии. М.: Наука, 735 с.
7. Левеншпиль, О. (1969). Инженерное оформление химических процессов. Пер. с англ. М.: Химия, 620 с.
8. Мишуков, Б. Г. и Соловьева, Е. А. (2014). Глубокая очистка городских сточных вод. СПб.: СПбГАСУ, 179 с.
9. Мишуков, Б. Г., Соловьева, Е. А., Керов, В. А. и, Зверева, Л. Н. (2008). Технология удаления азота и фосфора в процессе очистки сточных вод. СПб.: ЗАО «Электростандарт-Принт», 114 с.
10. Рамм, В. М. (1976). Абсорбция газов. 2-е изд. М.: Химия, 656 с.
11. Самохин, В. Н. (ред.) (1981). Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика. 2-е изд. М.: Стройиздат, 639 с.
12. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (2015). ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Бюро НДТ, 377 с.
13. Феофанов, Ю. А. (2012). Биореакторы с неподвижной и подвижной загрузкой для очистки воды. СПб.: СПбГАСУ, 203 с.
14. Яковлев, С. В. и Воронов, Ю. В. (1982). Биологические фильтры. 2-е изд. М.: Стройиздат, 120 с.
15. Яковлев, С. В., Карелин, Я. А., Ласков, Ю. М. и Калицун В. И. (1996). Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 591 с.
16. Feofanov, J. (2013). Fish farm recirculating water treatment by reactors with fixed biocenosis. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 23 (Problems of Architecture and Construction), pp. 21-24. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90005.

References

1. Alekseyev, M. I., Ivanov, V. G., Kurganov, A. M., Medvedev, G. P., Mishukov, B. G., Feofanov, Yu. A., Tsvetkova, L. I. and Chernikov, N. A. (eds.). (2007). Water

treatment technical manual. In 2 volumes. 2nd edition. Translated from French. Saint Petersburg: Novy Zhurnal, 1696 p.

2. Bazhenov, V. I. (2009). Integrated recirculation model for biochemical processes of aerobic biological treatment. Author's abstract of DSc Thesis in Engineering. Shchyolkovo: All-Russian Scientific Research and Technological Institute of Biological Industry.

3. James, A. (ed.) (1981). Mathematical models in water pollution control. Translated from English. Moscow: Mir, 472 p.

4. Karmazinov, V. F. (ed.) (2008). Water supply and wastewater disposal in Saint Petersburg. Saint Petersburg: Novy Zhurnal, 464 p.

5. Kafarov, V. V. (1979). Fundamentals of mass transfer. Moscow: Vysshaya Shkola, 439 p.

6. Kogan, V. B. (1977). Theoretical framework of standard processes in chemical engineering. Moscow: Nauka, 735 p.

7. Levenspiel, O. (1969). Chemical reaction engineering. Translated from English. Moscow: Khimiya, 620 p.

8. Mishukov, B. G. and Solovyova, Ye. A. (2014). Advanced treatment of urban wastewater. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 179 p.

9. Mishukov, B. G., Solovyova, Ye. A., Kerov, V. A. and Zvereva, L. N. (2008). Technology of nitrogen and phosphorus removal during wastewater treatment. Saint Petersburg: ZAO Elektrostandart-Print, 114 p.

10. Ramm, V. M. (1976). Absorption of gases. 2nd edition. Moscow: Khimiya, 656 p.

11. Samokhin, V. N. (ed.) (1981). Sewerage systems in populated areas and at industrial enterprises. Designer's handbook. 2nd edition. Moscow: Stroyizdat, 639 p.

12. Federal Agency on Technical Regulation and Metrology (2015). Information and technical reference book ITS 10-2015.

Wastewater treatment using centralized water disposal systems of settlements, urban districts. Moscow: Byuro NDT, 377 p.

13. Feofanov, Yu. A. (2012). Bioreactors with fixed and mobile loads for water treatment. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 203 p.

14. Yakovlev, S. V. and Voronov, Yu. V. (1982). Biological filters. 2nd edition. Moscow: Stroyizdat, 120 p.

15. Yakovlev, S. V., Karelin, Ya. A., Laskov, Yu. M., Kalitsun, V. I. (1996). Wastewater disposal and treatment. Moscow: Stroyizdat, 591 p.

16. Feofanov, J. (2013). Fish farm recirculating water treatment by reactors with fixed biocenosis. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 23 (Problems of Architecture and Construction), pp. 21-24. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90005.

Автор

Феофанов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ufeofanov@rambler.ru

Author

Feofanov Jurij Aleksandrovich, Dr. of Engineering, Professor

Scopus ID: 56453369700

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

E-mail: ufeofanov@rambler.ru