

EDN: OODFCF

УДК 628.3

В. И. НЕЗДОЙМИНОВ, В. С. РОЖКОВ, Ю. В. ВАСИЛЬЕВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭРЛИФТНЫХ БИОРЕАКТОРОВ

Аннотация. В статье приведено описание теоретических моделей схем улучшенного биологического удаления фосфора, созданных на базе Йоханнесбургского и Кейптаунского процессов, модифицированных использованием аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторов). Предложено применение моделирования биохимических процессов с помощью ASM3+Bio-P, которое позволяет описывать взаимное преобразование компонентов системы активного ила и прогнозировать качество очистки в таких сооружениях. Для моделирования эрлифтных биореакторов предложены зависимости для определения циркуляционного расхода в сооружении. Выполнено моделирование по указанным зависимостям для исходных сточных вод г. Макеевка, с разработкой мероприятий по повышению качества очистки путем варьирования параметров работы сооружений и добавлением органического субстрата. Выполнена теоретическая оценка эффективности предложенных схем, ограничений их применения. Установлено, что наиболее значимым параметром для финального качества очистки является соотношение органического вещества, азота и фосфора в исходном стоке.

Ключевые слова: биологическая очистка, эрлифтный биореактор, моделирование биохимических процессов активного ила.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Биологические методы очистки повсеместно используются как для обработки хозяйственно-бытовых, так и промышленных сточных вод, содержащих органические примеси и соединения биогенных элементов. Существует ряд схем биологической очистки, предназначенных для получения на выходе из очистной станции воды, не вызывающей эвтрофикацию поверхностных водоемов. При этом схемы, отличающиеся высокой эффективностью, являются весьма громоздкими, а их воплощение сопряжено со значительными затратами как на строительство сооружений, так и на обеспечение их функционирования. Одним из наиболее перспективных путей выполнения указанных требований на станциях очистки сточных вод является применение в качестве биореакторов аэротенков с затопленной эрлифтной системой аэрации, которые отличаются высокой эффективностью по использованию кислорода, особым гидродинамическим режимом в сооружении. В настоящее время эти сооружения эффективно используются для очистки сточных вод от органических веществ и соединений азота, в системах обработки осадка, в качестве дополнительных и вспомогательных сооружений в различных схемах. На базе данных сооружений кафедры ВВиОВР ГОУ ВПО ДонНАСА разработана концепция «биологической очистки с эрлифтными биореакторами» («БОСЭБ»). Основным отличительным элементом технологии БОСЭБ (биологическая очистка с эрлифтными биореакторами) являются аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации, обладающие рядом преимуществ относительно других сооружений [1, 2]:

- исключается нитратный рецикл, который, согласно различным источникам [3], составляет до 300 % от расхода сточных вод;
- перемешивание в аноксидной зоне выполняется за счет потока жидкости, созданного эрлифтной циркуляцией в сооружении, что исключает необходимость использования в этой зоне оборудования для механического перемешивания;

© В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Ю. В. Васильева, 2022



- из схемы исключается вторичный отстойник, функции по илоразделению которого выполняет взвешенный слой активного ила внутри аэротенка-осветлителя. Ввиду вихревой рециркуляции взвешенного слоя, ил не пребывает долгое время в аноксидных условиях, что исключит характерный для гравитационного отстаивания выброс фосфатов при илоотделении;

- высокая эффективность илоразделения позволяет повышать концентрацию ила в системе, что положительно скажется на эффективности очистки.

До настоящего времени не был изучен вопрос работы таких сооружений в схемах улучшенного биологического удаления фосфора, что затрудняет возможность использования эрлифтных биореакторов на уровне наилучших доступных технологий.

Целью данной работы является создание теоретических моделей схем биологической очистки сточных вод с применением эрлифтных биореакторов.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

На основании наиболее распространенных схем биологического удаления фосфора (Кейптаунский процесс МУСТ и Йоханнесбургский процесс JHB) предложены аналогичные системы, в которых функцию трех характерных сооружений выполняет аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации (рисунок). Данное сооружение заменяет аэробный, аноксидный реакторы и вторичный отстойник. Схемы предлагается называть соответственно МУСТ-ЭБ и JHB-ЭБ, где приставка «-ЭБ» обозначает использование в схеме эрлифтного биореактора в рамках концепции БОСЭБ.

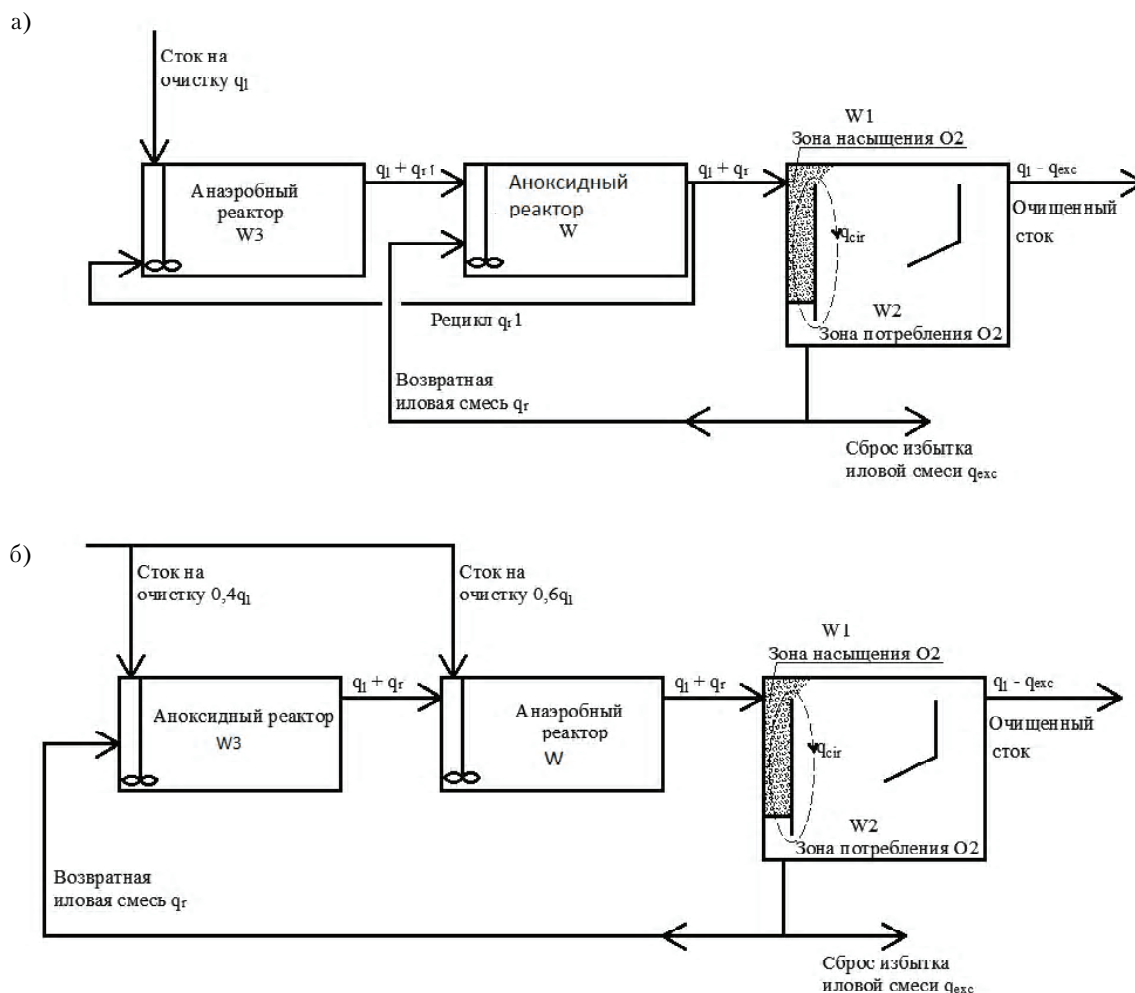


Рисунок – Схемы биологической очистки от соединений азота и фосфора в рамках концепции БОСЭБ: а) на базе схемы МУСТ; б) на базе схемы JHB.

Для расчета систем биологической очистки сточных вод необходимо оперировать как зависимостями скорости биохимических процессов, так и закономерностями, описывающими гидравлические параметры элементов и реакторов. В совместном решении этих систем, в зависимости от уровня сходимости результатов, лежит задача не только проектирования, но и эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод.

Для расчета и математического описания процессов биологической очистки в настоящее время практикуется ряд методов, которые можно условно поделить на 2 группы: последовательные расчеты и моделирование процессов.

Методы последовательных расчетов заложены в ряд нормативов, действующих в европейских, североамериканских странах [4, 5], ряд отечественных разработок также базируются на способе последовательного расчета сооружений [6, 7].

Данные методы основаны на определении максимальной нагрузки на активный ил, определении минимального возраста ила на основе эмпирических зависимостей. Такие подходы имеют достаточно частный характер и могут быть использованы для предварительных расчетов.

Более современным подходом, используемым в области научных исследований, является моделирование биохимических процессов [8, 9, 10].

Моделирование подразумевает описание процессов биологической очистки сточных вод с помощью биохимических зависимостей (уравнения Моно) [11] с составлением и решением системы дифференциальных уравнений.

Наборы уравнений, описывающих биохимические процессы в системах с активным илом и значения постоянных величин, используемых при моделировании, разрабатывались с 70-х годов прошлого века, первоначально учеными из Южной Африки. В 80-х годах Международная водная ассоциация предложила один из наиболее распространенных в настоящее время подходов – ASM (Activated Sludge Model).

Динамика изменения концентрации каждого компонента описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = \sum STK \cdot V, \quad (1)$$

где dC – элементарное приращение концентрации компонента, мг/л;

dt – дифференциал времени, сут.;

STK – стехиометрический коэффициент для данного компонента в i -той реакции;

V – скорость реакции, мг/(л·сут).

В общем виде биохимические зависимости всех биохимических процессов в каждом биореакторе схемы представляют из себя систему уравнений (ур-е 2). Расшифровки компонентов представлены в таблице.

Таблица – Компонентная схема ASM3+Bio-P

Растворенные компоненты		Нерастворенные компоненты	
Обозн.	Наименование	Обозн.	Наименование
S_O	растворенный кислород	X_I	инертная нерастворенная органика
S_S	легкоокисляемая растворенная органика	X_S	биоразлагаемая нерастворенная органика
S_{NH_4}	азот аммонийный	X_H	гетеротрофная биомасса
S_{NO}	азот нитратов и нитритов	X_{STO}	накопленный внутриклеточный продукт
S_{N_2}	свободный азот	X_{PAO}	биомасса ФАО
S_{PO_4}	ортофосфаты	X_{PP}	полифосфаты
S_{HCO}	щелочность	X_{PHA}	ПГА
S_I	инертная растворенная органика	X_{AUT}	автотрофная биомасса
		X_{TSS}	взвешенные вещества

Для полного математического описания биологической очистки к уравнениям 2 необходимо добавлять зависимости, характеризующие приток сточных вод на очистку, перетоки между зонами, илоразделение.

К физическим уравнениям, описывающим работу системы БОСЭБ, как предложено выше, относятся следующие группы зависимостей:

1. Уравнения, описывающие количественные параметры притока сточных вод и содержащихся в них примесей, как растворенных, так и нерастворенных.
2. Уравнения, связывающие между собой различные технологические зоны, согласно схеме очистки, включая рециркуляционные, возвратные и сбросные потоки.
3. Уравнения, описывающие илоразделение, которые с учетом эффективности задержания взвешенных веществ, описывают массовый баланс в системе.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_O}{dt} = f_1(S_S, S_{NH}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A) \\ \frac{dS_S}{dt} = f_2(S_O, S_{NO}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PAO}, X_A) \\ \frac{dS_{NH}}{dt} = f_3(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{NO}}{dt} = f_4(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{N_2}}{dt} = f_5(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{PO_4}}{dt} = f_6(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{HCO}}{dt} = f_7(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{PO_4}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_I}{dt} = f_8(X_S, X_H) \\ \frac{dX_I}{dt} = f_9(S_O, S_{NO}, X_H, X_A) \\ \frac{dX_S}{dt} = f_{10}(X_H) \\ \frac{dX_H}{dt} = f_{11}(S_O, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}) \\ \frac{dX_{STO}}{dt} = f_{12}(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H) \\ \frac{dX_{PAO}}{dt} = f_{13}(S_O, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_{PHA}) \\ \frac{dX_{PP}}{dt} = f_{14}(S_O, S_S, S_{PO_4}, S_{NO}, S_{HCO}, X_{PHA}, X_{PAO}) \\ \frac{dX_{PHA}}{dt} = f_{15}(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_{PP}, X_{PAO}) \\ \frac{dX_A}{dt} = f_{16}(S_O, S_{NH_4}, S_{PO_4}, S_{HCO}) \\ \frac{dX_{TSS}}{dt} = f_{17}\left(\begin{array}{l} S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, \\ X_{PAO}, X_A, X_{STO} \end{array} \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

Поскольку все эти уравнения войдут в систему с биохимическими зависимостями (2), они должны описывать свои процессы с применением тех же компонентов, что и в биохимических уравнениях.

Приращение концентрации i -того компонента в первом реакторе за время t за счет притока в него исходного стока из бесконечного источника определяется по зависимости:

$$\Delta C^i = \frac{t \cdot C_{in}^i \cdot q_1}{W_1}, \text{ г/м}^3 \quad (3)$$

где t – расчетное время приращения концентрации, сут;

C_{in} – концентрация i -того компонента в исходном стоке, определенная прямым измерением, г/м³;

q_1 – расход сточных вод, поступающих на очистку, м³/сут;

W_1 – объем первой расчетной зоны биологической очистки, м³.

Количество уравнений в системе по форме (3) соответствует количеству учитываемых компонентов в исходных сточных водах. В классическом прочтении схемы очистки воды – это 8 зависимостей для ASM3+Bio-P.

По аналогии с уравнением (3), вынос массы из сооружения в размерностях снижения концентрации и поступление этой массы в другое, следующее сооружение очистки описывается двумя уравнениями.

Для сооружения, из которого выходит рассматриваемый j -тый поток, изменение концентрации составит:

$$\Delta C_j^i = -\frac{t \cdot C_{\text{вых}}^i \cdot q_j}{W_{\text{вых}}}, \text{ г/м}^3 \quad (4)$$

где $C_{\text{вых}}^i$ – концентрация i -того компонента в сооружении, откуда выходит рассматриваемый j -тый поток, г/м³;

q_j – расход иловой смеси в j -том потоке, м³/сут;

$W_{\text{вых}}$ – объем сооружения, откуда выходит поток, м³.

Знак минус в этой зависимости показывает, что данный поток выносит массу из сооружения. Для сооружения в который входит рассматриваемый j -тый поток, изменение концентрации составит:

$$\Delta C_j^i = \frac{t \cdot C_{\text{вх}}^i \cdot q_j}{W_{\text{вх}}}, \text{ г/м}^3 \quad (5)$$

где $C_{\text{вх}}^i$ – концентрация i -того компонента в сооружении, куда входит рассматриваемый j -тый поток, г/м³;

$W_{\text{вх}}$ – объем сооружения, куда входит поток, м³.

Сами концентрации в сооружении входа и выхода потока будут являться искомыми величинами при решении общей системы биохимических и гидравлических уравнений. А изменение концентрации должно быть сведено для каждого сооружения согласно аналогу закона Кирхгофа, что исключает эту переменную из системы.

Внутри аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации происходит интенсивная внутренняя циркуляция, характеризующаяся в том числе сменой аэробных и аноксидных зон [12].

В этом случае также можно использовать уравнения (4, 5) для описания обмена масс между зонами, однако возникает вопрос определения циркуляционного расхода и объема этих зон в одном сооружении.

Поскольку биохимические процессы проходят с потреблением кислорода (по мере продвижения циркуляционного потока концентрация кислорода будет снижаться), в расчетной модели принято использовать 2 зоны: зона насыщения кислородом ($W_{\text{нас}}$) и зона потребления кислорода $W_{\text{номр}}$.

Для определения величины циркуляционного расхода была предложена зависимость:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{Q_{\text{air}}}{v_{\text{ж}} + 0,34} \\ h_a - \frac{(h_a - z_1) \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{\gamma_{\text{г}} \cdot Q_{\text{air}}}{\gamma_{\text{ж}} \cdot (v_{\text{ж}} + 0,34)} \right) - \left[W_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{\gamma_{\text{г}} \cdot Q_{\text{air}}}{\gamma_{\text{ж}} \cdot (v_{\text{ж}} + 0,34)} \right) + \frac{W_{\text{к}} - W_{\text{ц}}}{W_{\text{к}}} \right] h_a + ,}{2g} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}} + Q_{\text{air}}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{\text{cir}}^2}{2g} \end{array} \right. \quad (6)$$

где q_{cir} – расход иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт, м³/с;

h_a – глубина погружения аэратора, м;

$W_{\text{ц}}$ – объём газожидкостной смеси в затопленном эрлифте, м³;

$W_{\text{к}}$ – объём газожидкостной смеси над затопленным эрлифтом, м³;

ω_a – площадь поперечного сечения затопленного эрлифта, м²;

Q_{air} – расход воздуха, поступающий в затопленную эрлифтную систему аэрации, м³/с;

z_1 – глубина погружения верха эрлифтной трубы под уровень свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе, м;

$\gamma_{\text{ж}}$ – удельный вес иловой смеси в аэротенке, Н/м³;

$v_{\text{ж}}$ – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в эрлифтной трубе, м/с;

ζ_i – соответствующий коэффициент местного сопротивления на пути циркулирующего потока от выхода из сечения, в котором расположены аэраторы, до входа в это сечение;

ω_i – занимаемая жидкой фазой часть поперечной площади потока, м², в сечении с местным сопротивлением, коэффициент которого составляет ζ_i .

Приведенные зависимости позволяют дополнить общую математическую модель БОСЭБ уравнениями обмена масс между зонами насыщения и потребления кислорода по форме уравнений с применением циркуляционного расхода q_{cir} .

Для реализации теоретической модели всего комплекса сооружений БОСЭБ нами предложено использовать программную среду Cell Designer разработки The Systems Biology Institute, Токио, Япония. Это довольно мощный инструмент биохимического моделирования, который используется в биотехнологии, биологии, медицине [13].

Согласно схеме исследований, приведенной на рисунке, в программной среде Cell Designer созданы 2 модели: МУСТ-ЭБ и JНВ-ЭБ на основе ASM3+Bio-P. Данные исходного стока определены на основании реального стока, отобранного с КНС мкрн. «Калининский» г. Макеевка.

В процессе наладки модели выполнялось варьирование исходных данных для достижения максимального качества очистки. Все варьируемые величины можно разделить на 3 группы: расход воздуха, объемы сооружений и величины рециклов.

Особенностью систем БОСЭБ является тот факт, что воздух используется не только для аэрации, но и для обеспечения внутреннего рецикла и существования взвешенного слоя в осветлителе. Это накладывает ограничения на диапазон варьирования интенсивности аэрации [14], что для характерных сооружений составляет 10...20 м³/час/м² площади эрлифта. Площадь эрлифта для рассматриваемой системы составляет 0,05 м², что дает требуемый расход воздуха 0,6...1,2 м³/час. Именно по минимальному значению принят расход воздуха, что выполнено с целью минимизации затрат.

Далее выполняется анализ необходимости повышения расхода подаваемого воздуха, так, установлено, что в модели МУСТ-ЭБ этого не требуется, а в JНВ-ЭБ может быть рационально.

Если увеличение расхода воздуха до предельного значения не решает систему либо на каком-то этапе наблюдается одновременное превышение ЦТП (целевых технологических показателей) и по азоту аммонийному, и по нитратам, значит варьированием расхода воздуха эту задачу не решить и необходимо менять объемы различных зон.

Варьирование рециклов рекомендуется на завершающем этапе подбора, приведенные значения являются средними, и в основном этот механизм (изменения степеней рециклов) предназначен для оперативного управления системой очистки в условиях изменения качества воды на действующих станциях.

Состав сточных вод КНС мкрн. «Калининский» выдвигает достаточно жесткие условия с учетом неоптимального соотношения БПК: N:P, что может потребовать введения дополнительного органического субстрата либо полного отказа от биологического удаления фосфора с переходом к методам пост-преципитации.

Так, схему МУСТ-ЭБ удалось оптимизировать только увеличением объема анаэробной и аноксидной зон до 0,15 м³ (что, в принципе, соответствует рекомендациям авторов исходной схемы МУСТ), снижением денитрифицированного рецикла до 2 и добавлением к исходному стоку 30 г/м³ растворимого органического субстрата при минимальном расходе воздуха.

Установлено, что в случае изначально большего соотношения БПК исходного стока к азоту и фосфору, эта схема вполне применима и обеспечивает биологическое удаление соединений азота и фосфора до параметров, близких к ЦТП.

В случае JНВ-ЭБ схемы, оптимизация также потребовала увеличения объемов анаэробной и аноксидной зон до 0,15 м³ каждая и добавления тех же 30 г/м³ растворимого органического субстрата при минимальном расходе воздуха.

Преимуществом JНВ-ЭБ схемы стало отсутствие денитрифицированного рецикла при том же расходе воздуха, объеме сооружений, что делает ее более предпочтительной для внедрения.

Для обеих схем установлено, что увеличение дозы субстрата не ведет к улучшению качества очистки, оно остается практически неизменным при соответствующем увеличении подачи воздуха в систему. Схемы практически идентичны по эффективности очистки.

Текущее значение БПК:N:P составляло 100:22:2,6, что сильно отличается от классического 100:5:1 и объясняет необходимость добавления органического субстрата. При более благоприятных соотношениях, возможно применение предложенных схем без дополнительной органической подпитки.

Предел роста ХПК исходного стока в данных объемах сооружений определяется максимальным расходом воздуха, подаваемым в аэротенк-осветлитель. С помощью составленной модели JНВ-ЭБ определено максимальное приращение ХПК исходного стока, при котором интенсивность аэрации составит критические 20 м³/м²/ч, которое составило порядка 260 г ХПК/м³. После этой величины происходит срыв нитрификации и необходимо увеличение объемов аэротенка-осветлителя.

ВЫВОДЫ

Предложенные схемы биологической очистки с эрлифтными биореакторами МУСТ-ЭБ и JНВ-ЭБ, на основании теоретического моделирования, могут обеспечить высокое качество очистки сточных вод по всем целевым показателям при определенном соотношении БПК:N:P, в случае нехватки в исходном стоке органического вещества требуется добавление субстрата. Схемы идентичны по эффективности, что делает JНВ-ЭБ предпочтительной из-за отсутствия в ней дополнительного рецикла и, соответственно, меньшей затратности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нездойминов, В. И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д. В. Заворотный. – Текст : непосредственный // Строитель Донбасса. – 2018. – № 4 декабрь. – Р. 17–21.
2. Нездойминов, В. И. Теоретическое обоснование метода одноиловойнитри-денитрификации при очистке сточных вод / В. И. Нездойминов. – Текст : непосредственный // Науковий вісник будівництва. – 2014. – Том 1. – С. 101–105.
3. Есин, М. А. Интенсификация работы сооружений для очистки городских сточных вод от соединений азота и фосфора : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Есин Михаил Анатольевич. – Харьков : ХНУСА, 2014. – 196 с. – Текст : непосредственный
4. United States Environmental Protection Agency, Nutrient Control Design Manual. State of Technology Review Report. – Cincinnati, Ohio : Office of Research and Development / National Risk Management Research Laboratory, 2009. – 102 p. – Текст : непосредственный.
5. Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants : German ATV-DVWK Rules And Standards : May 2000 / GFA-Gesellschaft zur Forderung der Abwassertechnik e.V / Original German edition produced by : DCM, Meckenheim. – 2010. – 58 p. – ISBN 3-933707-41-2. – Текст : непосредственный.
6. Технология удаления азота и фосфора в процессах очистки сточных вод / Б. Г. Мишуков, В. А. Соловьёва, В. А. Керов, Л. Н. Зверева. – Санкт-Петербург : Издательство журнала «Вода: технология и экология», 2008. – 144 с. – Текст : непосредственный.
7. Соловьёва, Е. А. Совершенствование технологии удаления азота и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка / Е. А. Соловьёва. – Санкт-Петербург : [б. и.], 2010. – 259 с. – Текст : непосредственный.
8. Рожков, В. С. Сравнение подходов к моделированию биологической очистки сточных вод в Украине и других странах / В. С. Рожков, Ю. В. Васильева. – Текст : непосредственный // Опыт и молодость в решении водных проблем : сборник статей 5-ой Восточно-Европейской конференции, Киев, 2013 г. – Киев : [б. и.], 2013. – С. 321–326.
9. Баженов, В. И. Математическое моделирование очистных сооружений с применением погружной техники / В. И. Баженов. – Текст : непосредственный // Сантехника. – 2008. – № 5. – С. 68–71.
10. Баженов, В. И. Критерий оптимизации аэротенков с продольной рециркуляцией иловой смеси «карусельного» типа / В. И. Баженов. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2008. – Том 12. – С. 20–23.
11. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван ; перевод с английского. – Москва : Мир, 2006. – 480 с. – Текст : непосредственный.
12. Нездойминов, В. И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенк-осветлителе / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д. В. Заворотный. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Выпуск 2017-3(125). – Р. 80–85. – URL: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-3\(125\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-3(125).pdf) (дата публикации: 30.05.2017).
13. CellDesigner: a graphical biological network editor and workbench interfacing simulator / A. Funahashi, Y. Matsuoka, M. Morohashi [et al.]. – Текст : непосредственный // Introduction to Systems Biology. – Choi : Humana Press, 2007. – Р. 422–434.
14. Заворотный, Д. В. Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Заворотный Дмитрий Викторович ; ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка : ГОУ ВПО «ДонНАСА», 2019. – 151 с. – Текст : непосредственный.

Получена 14.10.2022

Принята 28.10.2022

В. І. НЕЗДОЙМІНОВ, В. С. РОЖКОВ, Ю. В. ВАСИЛЬЄВА
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ЕРЛІФТНИХ БІОРЕАКТОРІВ
ДОНБУСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ»

Анотація. У статті наведено опис теоретичних моделей схем покращеного біологічного видалення фосфору, створених на базі Йоганнесбурзького та Кейптаунського процесів, модифікованих використанням аеротенків-освітлювачів із затопленою ерліфтною системою аерації (ерліфтних біореакторів). Запропоновано застосування моделювання біохімічних процесів за допомогою ASM3+Bio-P, що дозволяє описувати взаємне перетворення компонентів системи активного мулу та прогнозувати якість очищення у таких спорудах. Для моделювання ерліфтних біореакторів запропоновано залежності визначення циркуляційної витрати у споруді. Виконано моделювання за вказаними залежностями для вихідних стічних вод м. Макіївка, з розробкою заходів щодо підвищення якості очищення шляхом варіювання параметрів роботи споруд та додаванням органічного субстрату. Виконано теоретичну оцінку ефективності запропонованих схем, обмежень їх застосування. Встановлено, що найбільш значущим параметром для фінальної якості очищення є співвідношення органічної речовини, азоту та фосфору у вихідному стоку.

Ключові слова: біологічне очищення, ерліфтний біореактор, моделювання біохімічних процесів активного мулу.

VICTOR NEZDOYMINOV, VITALII ROZHKOVA, JULIA VASILIEVA
THEORETICAL SUBSTANTIATION OF WASTEWATER TREATMENT
SCHEMES USING AIRLIFT BIOREACTORS
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article describes the theoretical models of schemes for improved biological phosphorus removal, created on the basis of the Johannesburg and Cape Town processes, modified by the use of aerotanks-clarifiers with a flooded airlift aeration system (airlift bioreactors). The application of modeling of biochemical processes using ASM3 + Bio-P is proposed, which allows describing the mutual transformation of the components of the activated sludge system and predicting the quality of treatment in such facilities. For modeling airlift bioreactors, dependencies are proposed for determining the circulation flow in the facility. Modeling was carried out according to the indicated dependencies for the initial wastewater of the city of Makeevka, with the development of measures to improve the quality of treatment by varying the parameters of the facilities and adding an organic substrate. A theoretical assessment of the effectiveness of the proposed schemes, limitations of their application is carried out. It has been established that the most significant parameter for the final quality of treatment is the ratio of organic matter, nitrogen and phosphorus in the initial runoff.

Key words: biological treatment, gas-loop bioreactor, simulation of activated sludge biochemical processes.

Нездойминов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: биологическая очистка сточных вод, обработка осадка сточных вод, система транспортирования природных и сточных вод.

Рожков Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: биологическая очистка сточных вод, оборотные системы промышленного водоснабжения, очистка природных вод.

Васильева Юлия Вячеславовна – ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: биологическая очистка сточных вод, оборотные системы промышленного водоснабжения, очистка природных вод.

Нездойминов Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОНБУСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ». Наукові інтереси: біологічне очищення стічних вод, обробка осаду стічних вод, система транспортування природних та стічних вод.

Рожков Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: біологічне очищення стічних вод, оборотні системи промислового водопостачання, очищення природних вод.

Васильєва Юлія В'ячеславівна – асистент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: біологічне очищення стічних вод, оборотні системи промислового водопостачання, очищення природних вод.

Nezdoyminov Viktor – Sc. D. (Eng.), Professor, Head of Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, sewage sludge treatment, natural and wastewater transportation system.

Rozhkov Vitaliy – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, circulating industrial water supply systems, natural water treatment.

Vasileva Yuliya – Assistant, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, circulating industrial water supply systems, natural water treatment.