

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ БИОТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ОТ АЗОТА И ФОСФОРА НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ КАНАЛИЗАЦИИ

С. Е. МАСКАЛЕВА, ведущий инженер ООО «Эковод»,
Н. Ю. БОЛЬШАКОВ, ведущий специалист ООО «Эковод», к.т.н., доцент

Среди различных методов удаления азота и фосфора наиболее предпочтительны, с экономической точки зрения, биологические методы. Однако в традиционных системах биологической очистки, работающих в режиме нитрификации, азот и фосфор удаляются на 10–30%, что не позволяет обеспечить норматив НДС. Увеличения эффективности очистки до 70–90% можно добиться, если использовать биотехнологии нитриденитрификации (НД) и биологической дефосфотации (БДФ). Качество воды, очищенной по этим биотехнологиям, отвечает требованиям на сброс для водоемов рыбохозяйственной категории водопользования. Одновременно достигается эффективная очистка от органических веществ и сокращение расхода воздуха на аэрацию.

Реализация биотехнологий НД и БДФ связана с созданием в аэротенке трех типов зон:

- аэробная зона (высокая концентрация растворенного кислорода), где протекают процессы аэробной очистки от органических веществ, нитрификация (биоокисление аммонийного азота до нитратного) и дефосфотация (быстрое потребление фосфатов фосфорными бактериями);
- аноксидная зона (растворенный кислород практически отсутствует, но есть нитраты, а также органические вещества), где происходит процесс денитрификации;
- анаэробная зона (нет растворенного кислорода, нет нитратов и нитритов, но есть органические вещества), где идет сбраживание органических веществ до ацетата, который потребляется фосфорными бактериями с выделением в среду фосфатов.

Аноксидные и анаэробные условия создаются заменой аэрации на механическое перемешивание. Однако для действующих очистных сооружений такая реконструкция аэротенков требует значительных капитальных затрат, связанных с большим объемом строительно-монтажных работ и высокой стоимостью импортных перемешивающих устройств (аналогичное отечественное оборудование отсутствует). Альтернативный подход состоит в создании аноксидных условий в аэротенке за счет низкой (минимально допустимой для предотвращения осаждения активного ила) интенсивности

аэрации. Наши исследования свидетельствуют также о возможности создания в зонах с низкой интенсивностью аэрации псевдоанаэробных условий (без O_2 и без NO_3), влекущих развитие процесса биологической дефосфотации.

Для существующих аэротенков, работающих в традиционном аэробном режиме, внедрение биотехнологий НД и БДФ при сохранении производительности по стокам требует интенсификации аэробной очистки. Повышение скорости аэробных процессов, включая нитрификацию и биоокисление органических веществ, позволяет сократить объем аэробной зоны с выделением в аэротенке аноксидных и анаэробных зон. Интенсификация аэробной очистки достигается применением эффективных аэраторов и созданием в аэротенке широкой аэрируемой полосы. Решение вопроса о возможности перевода существующего аэротенка в режим НД и БДФ, а также выбор оптимальной схемы его работы требуют применения методов математического моделирования. С этой целью авторами разработана математическая модель, основные положения которой рассмотрены ниже.

Удаление из стоков аммонийного азота обусловлено двумя биологическими процессами: потреблением азота на синтез биомассы и биоокислением при нитрификации. Кроме того, в результате проведенных исследований выявлено существенное вторичное загрязнение воды аммонийным азотом, протекающее как в аэротенке, так и во вторичном отстойнике [1, 3]: органический азот, содержащийся во взвешенных веществах сточной воды и биомассе активного ила, в ходе их деструкции выходит в раствор в виде аммонийного азота.

Скорость биоокисления аммонийного азота определяется 1-й стадией нитрификации и может быть выражена через удельную скорость роста (μ_{mN}) бактерий-нитрификаторов рода *Nitrosomonas*:

$$V_N = -\frac{dC_N}{dt} = \frac{\mu_{mN} 1.07^{T-20} C_N C_o}{(k_N + C_N)(k_o + C_o)} \times \frac{X \Delta N_n}{\Delta X},$$

где: μ_{mN} — максимальная удельная скорость роста нитрификаторов при 20 °С; C_N, C_o — концентрации аммонийного азота и растворенного кислорода; k_N, k_o — константы Моно (полунасыщения) для процесса нитрификации; $X, \Delta X$ — концентрация активного ила в аэротенке и его прирост на 1 л сточной воды; ΔN_n — количество нитрифицированного азота на 1 л сточной воды; T — температура иловой смеси в аэротенке (°С).

Скорость вторичного загрязнения воды аммонийным азотом в аэротенке (V_{Nox}) связана со скоростью биораспада (самоокисления) активного ила (V_{ox}), которую можно выразить через его возраст:

$$V_{Nox} = \alpha_N V_{ox};$$

$$V_{ox} \cong bX \frac{y_0 L_{en} + B_{en}(1 - f_B)}{y_0 L_{en}(1 + fb\tau_x) + B_{en}(1 + fb\tau_x)},$$

где: α_N — массовая доля азота в биодеградируемых (окисляемых) органических веществах активного ила (зависит от доли биомассы в активном иле и в среднем $\alpha_N = 0,08$); b — константа скорости самоокисления биомассы ($b = 0,2 \times 1,07^{T-20}$, сут.⁻¹).

В зонах нитрификации обычно обеспечивают гидродинамический режим, близкий к идеальному вытеснению, при котором эффективность нитрификации выше, чем в режиме смешения.

Для нитрификатора-вытеснителя получим:

$$-\frac{dC_N}{dt} = V_N - V_{Nox}.$$

Решение этого уравнения при условии эффективной очистки от аммонийного азота ($C_{Nen} \gg C_{Nex}$), а также с учетом соотношений:

$$\frac{\tau}{\tau_x} = \frac{\Delta X}{X} = \frac{y_0 L_{en}(1 + fb\tau_x) + B_{en}(1 + fb\tau_x)}{X(1 + b\tau_x)},$$

можно представить в виде:

$$C_{Nex} = \frac{\alpha_N b K_N [y_0 L_{en} + B_{en}(1 - f_B)]}{\mu_{mN}^* C_{Nen}(1 + b\tau_x)} + \frac{C_{Nen}}{1 + r} \exp \left[- \frac{(\mu_{mN}^* \tau_x \frac{\tau_N}{\tau} - 1) C_{Nen}}{(1 + r) K_N} \right], \quad (1)$$

где: τ, τ_n — время пребывания сточной воды во всем аэротенке и в зоне нитрификации,

соответственно $\tau = \frac{V_a}{Q}$, $\tau_N = \frac{V_N}{Q}$; r — коэффициент рециркуляции; $\mu_{mN}^* = \frac{\mu_{mN} C_O}{K_O + C_O}$.

Как следует из уравнения (1), с увеличением возраста ила концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка (C_{Nex}) стремится к нулю.

Расчеты показывают, что при температуре 20 °С и типичных значениях параметров ($\mu_{mN} = 0,4$ сут.⁻¹, $C_O = 3$ мг/л, $K_O = 1$ мг/л, $y_0 = 0,5$ г/г БПК_п, $r = 1$, $L_{en} = 100$ мг/л, $B_{en} = 80$ мг/л, $C_{Nen} = 15$ мг/л, $\tau_N/\tau = 0,65$, значения остальных параметров приведены выше) концентрация аммонийного азота на выходе аэротенка-вытеснителя достигает 0,39 мг/л (ПДК для водоемов рыбохозяйственной категории водопользования) уже при возрасте активного ила 5 суток, а при $\tau_x = 10$ сут., $C_{Nex} = 0,11$ мг/л. Эти расчеты подтверждаются фактическими данными работы аэротенков. Так, на выходе аэротенков Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга при $C_O \geq 3$ мг/л и возрасте ила 10–12 суток достигались выходные концентрации аммонийного азота около 0,1 мг/л.

Однако на выходе всей системы биологической очистки, включающей аэротенк и вторичный отстойник, концентрация аммонийного азота может быть существенно выше, чем на выходе аэротенка. В радиальных отстойниках, оборудованных илоскребами, перемещение осадка к центральному приемку влечет его перемешивание и возникновение турбулентного переноса растворенных примесей из зоны осадка в зону осветленной воды. Результатом является существенное (на уровне нескольких ПДК) вторичное загрязнение сточной воды аммонийным азотом, выделяющимся из активного ила в ходе его биораспада в зоне осадка вторичного отстойника.

Моделирование процессов во вторичном отстойнике и данные натурных исследований свидетельствуют о возможности сокращения вторичного загрязнения с достижением на выходе системы «аэротенк — вторичный отстойник» концентрации аммонийного азота в пределах ПДК. Наиболее эффективными мерами являются: повышение концентрации кислорода в потоке иловой смеси, поступающей во вторичный отстойник, и уменьшение в нем уровня осадка. Повышение концентрации кислорода на выходе аэротенка (выходе вторичного отстойника) решает также задачу глубокой очистки от нитритного азота (до уровня ПДК, составляющего 0,02 мг/л).

Поступление нитритов со сточными водами незначительно. В аэротенках нитриты могут образовываться из аммонийного азота как продукт первой стадии нитрификации, если вторая стадия (биоокисление нитритов до нитратов) лимитирована по кислороду. Лимитирование практически снимается при концентрации растворенного кислорода 3 мг/л. Поэтому достижение на выходе аэротенка концентрации нитритного азота не более 0,02 мг/л обеспечивается поддержанием концентрации растворенного кислорода не менее 3 мг/л в выходной зоне аэротенка-вытеснителя. При этом условии вторичного загрязнения нитритами во вторичных отстойниках практически нет, соответственно, обеспечивается самый жесткий норматив НДС по нитритному азоту.

Если включить в схему биологической очистки дополнительную аноксидную зону, то параллельно с процессом нитрификации будет происходить процесс денитрификации — биовосстановления нитритного и нитратного азота в азот молекулярный, отдуваемый при аэрации в атмосферу. На стадии денитрификации биоосстановление органических веществ осуществляется не кислородом, а нитратами, что позволяет сократить расход аэрирующего воздуха и затраты на аэрацию. По окислительной способности 1 г нитратного азота эквивалентен 2,86 г молекулярного кислорода. Аноксидные зоны одновременно с биовосстановлением нитратов служат для частичной очистки от органических веществ. Расход внешнего окислителя органических веществ в аноксидных зонах, куда, как правило, подается исходная сточная вода, в единицах молекулярного кислорода составляет 0,6–0,8 г O₂/г снятого БПК_п, что соответствует расходу азота нитратов в количестве 0,2–0,3 гN/г БПК_п, т. е. для удаления 1 г нитратного азота требуется 3–5 г БПК_п.

На практике возможны два варианта устройства зон денитрификации: с аэрацией и без аэрации. В зонах денитрификации, создаваемых за счет низкой интенсивности аэрации, снижение концентрации растворенного кислорода до величины 0,1 мг O₂/л достигается потреблением кислорода облигатными аэробами (в частности бактериями-нитрификаторами) и частью гетеротрофов. Чем выше скорость дыхания клеток (интенсивность энергетического обмена), тем легче достигнуть условий, близких к аноксидным, и обеспечить высокую скорость денитрификации. С уменьшением концентрации легкоокисляемых (растворенных) органических веществ и снижением температуры скорость дыхания падает, что требует существенного уменьшения интенсивности аэрации в зонах денитрификации (до 1,5–2 м³/м³ час.). Во вторичном отстойнике происходит дополнительная очистка от нитратного азота. Поэтому достижение требуемых по нормативам ПДС концентраций нитратов практически не представляет труда при использовании технологии нитриденитрификации. Более подробно процесс денитрификации и его расчет рассмотрен в работах Большакова Н. Ю. и Николаева А. Н. [1, 3].

В традиционном процессе биологической очистки изымающийся из сточной воды фосфор идет на построение клеточного вещества активного ила, фосфаты используются для обеспечения энергетических потребностей клеток. Поэтому рост потребления фосфора может быть достигнут в процессе биологической очистки сточных вод с повышенным приростом ила. Однако при традиционном режиме био-



очистки возможность увеличения прироста ила ограничена. Повышение прироста ила в системе «аэротенк — вторичный отстойник» достигается за счет снижения концентрации активного ила и его возраста. Результат — снижение эффективности очистки по БПК и азоту (в случае наличия схем нитриденитрификации). Поэтому при эксплуатации очистных сооружений в традиционном режиме можно достичь лишь незначительного изъятия фосфора и фосфатов и не удастся обеспечить требования норматива ПДС наряду с ухудшением очистки по остальным показателям. Для глубокого изъятия фосфора по технологии биологической дефосфотации осуществляют модификацию процесса путем включения ступени анаэробной обработки активного ила в традиционную схему. В этом случае в системе биологической очистки создаются условия, когда активный ил поочередно проходит анаэробную и аэробную зоны, что стимулирует развитие в нем фосфорных бактерий, относящихся к факультативным анаэробам.

В анаэробной зоне не фосфорные гетеротрофные бактерии сбраживают органические вещества (преимущественно взвешенные) до ацетата, являющегося субстратом фосфорных бактерий. Фосфорные бактерии потребляют ацетат и синтезируют из него поли-β-гидроксibuтират (PHB), используя для синтеза энергию, выделяющуюся при гидролизе клеточных полифосфатов. Образующиеся при гидролизе полифосфатов ортофосфаты выделяются в среду. Поэтому для успешного применения этой биотехнологии недопустимо длительное пребывание активного ила в бескислородных условиях на стадиях его обработки во избежание выхода фосфора из клеток в раствор и его возврата на вход очистных сооружений.

В аэробных условиях фосфорные бактерии синтезируют биомассу, используя в качестве источника углерода PHB, запасенный в анаэробных условиях. PHB одновременно служит энергетическим субстратом: часть его окисляется молекулярным кислородом (до CO₂ и H₂O), а выделяющаяся энергия идет на синтез АТФ и полифосфатов. Энергия АТФ сразу используется на синтез биомассы (АТФ гидролизует до АДФ), а полифосфаты запасаются в клетках в виде гранул, что и обеспечивает высокое потребление фосфора из среды (сточной воды).

Существует мнение [2], что с уменьшением возраста эффективности БДФ возрастает в соответствии с увеличением прироста ила. Поскольку технология НД при низком возрасте не работает, то важной задачей является выявление значений возраста активного ила, при котором совместное применение технологий НД и БДФ дает наилучший результат. С этой целью нами был выполнен теоретический анализ и проведены экспериментальные исследования влияния возраста активного ила на процесс БДФ.

Закономерность снижения эффективности БДФ с увеличением возраста может быть описана на основе концепции самоокисления биомассы (эндогенного дыхания) или концепции энергии поддержания в модификации, учитывающей состав активного ила (биомасса, эндогенная масса, взвешенные вещества сточной воды) [1, 3]. В соответствии с

механизмом биологической дефосфотации удаление фосфора из сточной воды пропорционально приросту фосфорных бактерий, который в свою очередь пропорционален количеству образовавшегося в анаэробной зоне ацетата. Исходя из этого и учитывая возможность анаэробных условий в зоне осадка вторичных отстойников, для расчета удаления фосфора можно использовать простые уравнения:

$$\Delta P = \alpha_P \cdot \Delta X_a^P, \quad (2)$$

где: α_P — массовая доля фосфора в Р-бактериях; ΔX_a^P — прирост активной биомассы Р-гетеротрофов, мг/л.

Прирост Р-гетеротрофов можно выразить через экономический коэффициент:

$$\Delta X_a^P = y_P \cdot \Delta C_{ac}, \quad (3)$$

$$y_P = \frac{y_0 P (1 + fb\tau_x)}{1 + b\tau_x}, \quad (4)$$

где: y_P — экономический коэффициент для Р-гетеротрофов, г/г БПК_н; ΔC_{ac} — количество потребленного Р-гетеротрофами ацетата, мг/л (на 1 л сточной воды); $y_0 P$ — экономический коэффициент для Р-гетеротрофов при нулевых затратах на поддержание жизнедеятельности (истинный экономический коэффициент), г/г БПК_н; f — бионеразлагаемая часть активного ила; b_P — константа скорости самоокисления биомассы Р-гетеротрофов, сут.⁻¹; τ_x — возраст активного ила, сут.

Количество потребленного Р-гетеротрофами ацетата связано простым соотношением со скоростью процесса:

$$\Delta C_{ac} = \frac{R_{ac}}{Q}, \quad (5)$$

где: R_{ac} — скорость потребления ацетата фосфорными бактериями, мг/сут.; Q — расход сточной воды, л/сут.

Полагая, что в анаэробной зоне весь образованный не Р-гетеротрофами ацетат потребляется фосфорными бактериями и, учитывая возможность анаэробных условий в зоне осадка вторичных отстойников [3], выражение для скорости потребления ацетата Р-гетеротрофами примет вид:

$$R_{ac} = \rho_{ac} \cdot \left(X_{oc} \cdot V_{oc} + \sum_i X_i \cdot V_i \right), \quad (6)$$

где: ρ_{ac} — удельная скорость образования ацетата не Р-гетеротрофами, мг/г сут. (на 1 г активного ила); X_{oc} — концентрация активного ила в анаэробной зоне осадка вторичных отстойников, г/л; V_{oc} — объем анаэробной зоны осадка вторичных отстойников, л; X_i — концентрация ила в i анаэробной зоне аэротенка, г/л; V_i — объем i анаэробной зоны аэротенка, л.

С учетом формулы (5) и известных соотношений $Q_r = r_1 \cdot Q$, $\tau_{oc} = \frac{V_{oc}}{Q_r}$ и $\tau_i = \frac{V_i}{Q}$, выражение (4) примет вид:

$$\Delta C_{ac} = \rho_{ac} \cdot \left(r_1 \cdot X_{oc} \cdot \tau_{oc} + \sum_i X_i \cdot \tau_i \right), \quad (7)$$

где: Q_r — расход возвратного ила, л/сут.; r_1 — коэффициент рециркуляции возвратного ила; τ_{oc} — время пребывания ила в анаэробных условиях в зоне осадка вторичных отстойников, сут.; τ_i — период очистки в i анаэробной зоне аэротенка, сут.

Подставляя в формулу (2) выражения (3) и (7), в итоге получим:

$$\Delta P = \alpha_P \cdot y_P \cdot \rho_{ac} \cdot \left(r_1 \cdot X_{oc} \cdot \tau_{oc} + \sum_i X_i \cdot \tau_i \right) \quad (8)$$

Принимая, что скорость образования ацетата прямо пропорциональна концентрации биомассы не Р-гетеротрофов, задается нами следующими уравнениями:

$$\rho_{ac} = \rho_{ac}^* \cdot \frac{X_a}{X}, \quad (9)$$

$$\frac{X_a}{X} = \frac{y_0 L_{ex}}{y_0 L_{ex}(1 + f_b \tau_x) + B_{ex}(1 + f_6 b \tau_x)}, \quad (10)$$

где: ρ_{ac}^* — удельная скорость образования ацетата в анаэробных условиях не Р-гетеротрофами, мг/г сут. (на 1 г биомассы не Р-гетеротрофов); X_a — концентрация активной биомассы, г/л; X — средняя концентрация активного ила в аэротенке, г/л; y_0 — истинный экономический коэффициент, г/г БПК_n; L_{ex} — БПК_n растворенных органических веществ сточной воды, мг/л; B_{ex} — концентрация взвешенных веществ на входе аэротенка, мг/л; f_b — небиodeградируемая часть исходных взвешенных веществ.

При подстановке уравнения (9) в формулу (8) получим искомое выражение для ρ_{ac} :

$$\rho_{ac} = \rho_{ac}^* \cdot \frac{y_0 L_{ex}}{y_0 L_{ex}(1 + f_b \tau_x) + B_{ex}(1 + f_6 b \tau_x)} \quad (11)$$

Величина зависит от температуры. Для активного ила Центральной станции аэрации Санкт-Петербурга экспериментально найденная нами при 16 °С величина составила 0,69 мг/г сут. С увеличением температуры в диапазоне 16–25 °С удельная скорость образования ацетата возрастает в соответствии с зависимостью:

$$\rho_{ac}^*(T) = \rho_{ac}^*_{16} \cdot 1,07^{T-16}$$

Таким образом, решение уравнения (8) совместно с выражениями (4) и (11) позволяет описать процесс биологической дефосфатации, отталкиваясь от состава сточных вод и технологических параметров процесса биологической очистки. Рассмотренная закономерность снижения эффективности биологической дефосфатации с возрастанием возраста активного ила, на наш взгляд, не справедлива в области малых

значений возраста. С уменьшением возраста падает степень биоокисления трудноокисляемых органических веществ (взвешенных веществ). При малых значениях возраста в биоценозе преобладают микроорганизмы, утилизирующие только легкоокисляемые органические вещества. Соответственно, доля бактерий, способных утилизировать взвешенные вещества, сокращается. Уменьшение скорости биораспада взвешенных веществ, в частности, скорости их сбраживания до ацетата, в анаэробных условиях должно снижать выход ацетата, а следовательно, и прирост фосфорных бактерий, и эффективность очистки от фосфора. Теоретическое описание снижения скорости биологической дефосфатации с уменьшением возраста ила по рассмотренному механизму практически невозможно, поэтому зависимость биологической дефосфатации от возраста во всем его диапазоне может быть получена только на основе полуэмпирических экспериментальных исследований.

Литература

1. Большаков Н. Ю. «Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях». — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010 г.
2. Мишуков Б. Г. «Расчет сооружений биологической очистки городских сточных вод». — СПб.: Инж.-строит. инст., 1993 г.
3. Николаев А. Н., Большаков Н. Ю. «Биологическая очистка сточных вод: математическая модель». // «Экология и промышленность России», ноябрь, 2001 г.
4. George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel: Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. — New York.: McGraw-Hill Higher Education, 2003.

Окончание в следующем номере □

¹БПК_n — биохимическое потребление кислорода (полное).

Организаторы:

- Выставочный центр «БашЭКСПО»;
- Администрация городского округа г. Уфа РБ;
- Государственный комитет РБ по строительству, архитектуре;
- Государственный комитет РБ по транспорту и дорожному хозяйству;
- Башкирское республиканское научно-техническое общество строителей;

международный строительный ФОРУМ

ГОРОД АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

5 - 8 ИЮНЯ УФА 2012



Тел./факс: (347) 256-51-80, 256-51-86, 256-59-04
<http://www.bashexpo.ru> | e-mail: gorod@bashexpo.ru



БАШЭКСПО
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР