

# ОПТИМИЗАЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕФОСФОТАЦИИ

## ЭФФЕКТИВНОЕ УДАЛЕНИЕ ФОСФАТОВ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Н. Ю. БОЛЬШАКОВ, к. т. н., доцент СПб ГУКиТ,  
ведущий специалист ООО «Эковод»

**При расчете процесса удаления фосфора из городских сточных вод важно выявить оптимальный возраст активного ила, при котором совместное применение технологий нитриденитрификации и биологической дефосфотации дает наилучший результат.**

В традиционной технологии аэробной биологической очистки (рис. 1) изымаемый 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 биологической 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 биохимическому потреблению кислорода (БПК) и по азоту (в случае наличия схем нитриденитрификации). Поэтому при эксплуатации очистных сооружений в традиционном режиме можно достичь лишь незначительного изъятия фосфора фосфатов, но обеспечить требования норматива предельно допустимых сбросов (ПДС) не удастся наряду с ухудшением очистки по остальным показателям.

Для глубокого изъятия фосфора по технологии биологической дефосфотации (рис. 2) 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 [3, 4]. 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 [1].

**Чтобы достичь самой глубокой очистки, в традиционную схему биологической дефосфотации включены последовательно ступени анаэробной и аэробной обработки активного ила.**

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 CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), а выделяющаяся энергия идет на синтез аденозинтрифосфата (АТФ) и полифосфатов. Энергия АТФ сразу используется на синтез биомассы (АТФ гидролизует до аденозиндифосфата (АДФ), а полифосфаты запасаются в клетках в виде гранул, что и обеспечивает высокое потребление фосфора из среды (сточной воды) [3, 4].

Важная задача — выявление значений возраста активного ила, при котором совместное применение технологий нитриденитрификации (НД) и биологической дефосфотации (БДФ) дает наилучший результат. Закономерность

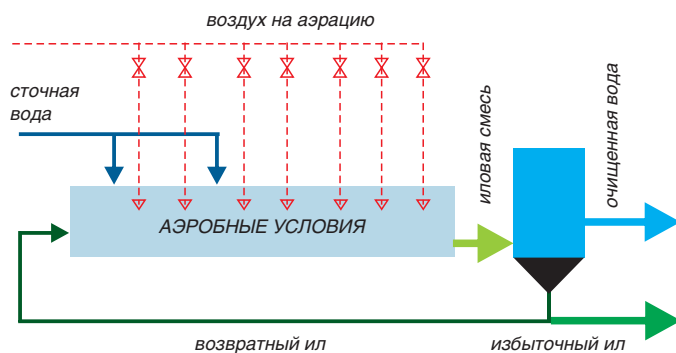


Рис. 1. Традиционная технология аэробной биологической очистки

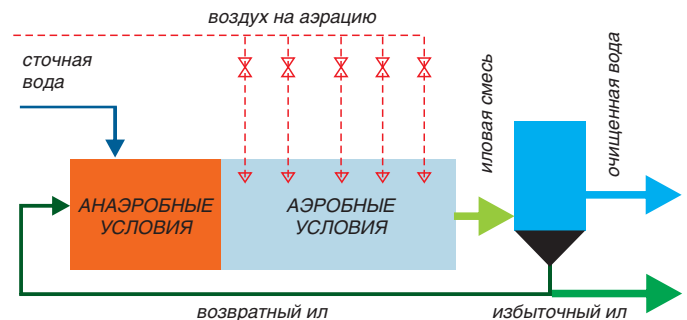


Рис. 2. Простейший вариант реализации технологии биологической дефосфотации, смысл которой состоит в чередовании аэробных и анаэробных условий по длине аэротенка

**Оптимальное значение возраста ила, при котором эффективность процессов удаления фосфора и нитриденитрификации достигает максимума, лежит в диапазоне от 6 до 11 суток.**

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). 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:

$$\Delta P = \alpha_P \cdot \Delta X_a^P, \tag{1}$$

где:  $\alpha_P$  — массовая доля фосфора в Р-бактериях,

$\Delta X_a^P$  — прирост активной биомассы Р-гетеротрофов, мг/л.

Прирост Р-гетеротрофов можно выразить через экономический коэффициент:

$$\Delta X_a^P = Y_P \cdot \Delta C_{acc}, \tag{2}$$

$$Y_P = \frac{Y_{OP}(1 + f_b \tau_x)}{1 + b_P \tau_x}, \tag{3}$$

где:  $Y_P$  — экономический коэффициент для Р-гетеротрофов, г/гБПК<sub>п</sub><sup>1</sup>;

$\Delta C_{acc}$  — количество потребленного Р-гетеротрофами ацетата, мг/л (на 1 л сточной воды);

$Y_{OP}$  — экономический коэффициент для Р-гетеротрофов при нулевых затратах на поддержание жизнедеятельности (истинный экономический коэффициент), г/гБПК<sub>п</sub>;

$f$  — бионеразлагаемая часть активного ила;

$b_P$  — константа скорости самоокисления биомассы Р-гетеротрофов, сут.<sup>-1</sup>;

$\tau_x$  — возраст активного ила, сут.

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

$$\Delta C_{acc} = \frac{R_{acc}}{Q}, \tag{4}$$

где:  $R_{acc}$  — 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, выражение для скорости потребления ацетата Р-гетеротрофами примет вид:

$$R_{acc} = \rho_{acc} \cdot \left( X_{oc} \cdot V_{oc} + \sum_i X_i \cdot V_i \right), \tag{5}$$

где:  $\rho_{acc}$  — 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;

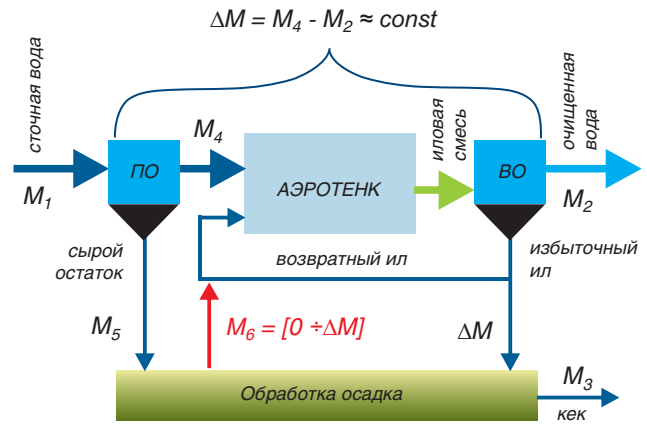
$X_i$  — концентрация ила в i-ой анаэробной зоне аэротенка, г/л;

$V_i$  — объем i-ой анаэробной зоны аэротенка, л.

С учетом формулы (5) и известных соотношений,

$$Q_r = r_1 \cdot Q, \tau_{oc} = \frac{V_{oc}}{Q_r} \text{ и } \tau_i = \frac{V_i}{Q}$$

<sup>1</sup> БПК<sub>п</sub> — биохимическое потребление кислорода полное.



$$M_1 = M_2 + M_3 ; \quad M_5 = M_1 - M_4 ;$$

$$M_3 = \Delta M + M_5 - M_6$$

Рис. 3. Материальный баланс в системе биологической очистки

выражение (4) примет вид:

$$\Delta C_{acc} = \rho_{acc} \cdot \left( r_1 \cdot X_{oc} \cdot \tau_{oc} + \sum_i X_i \cdot \tau_i \right), \tag{6}$$

где:  $Q_r$  — расход возвратного ила, л/сут.;

$r_1$  — коэффициент рециркуляции возвратного ила;

$\tau_{oc}$  — время пребывания ила в анаэробных условиях в зоне осадка вторичных отстойников, сут.;

$\tau_i$  — период очистки в i-ой анаэробной зоне аэротенка, сут.

Подставляя в уравнение (1) выражения (2), (3) и (6), в итоге получим:

$$\Delta P = \alpha_P \cdot Y_P \cdot \rho_{acc} \cdot \left( r_1 \cdot X_{oc} \cdot \tau_{oc} + \sum_i X_i \cdot \tau_i \right). \tag{7}$$

Принимая, что скорость образования ацетата прямо пропорциональна концентрации биомассы не Р-гетеротрофов,  $\rho_{acc}$  задается нами следующими уравнениями:

$$\rho_{acc} = \rho_{acc}^* \cdot \frac{X_a}{X}, \tag{8}$$

$$\frac{X_a}{X} = \frac{y_0 L_{Bx}}{y_0 L_{Bx} (1 + f_b \tau_x) + B_{Bx} (1 + f_b \tau_x)}, \tag{9}$$

где:  $\rho_{acc}^*$  — 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/гБПК<sub>п</sub>;

$L_{Bx}$  — БПК<sub>п</sub> растворенных органических веществ сточной воды, мг/л;

$b$  — константа скорости самоокисления биомассы активного ила, сут.<sup>-1</sup>;

$B_{Bx}$  — концентрация взвешенных веществ на входе аэротенка, мг/л;

$f_b$  — не биodeградируемая часть исходных взвешенных веществ.

При подстановке уравнения (9) в уравнение (8) получим искомое выражение для  $\rho_{acc}$ :

$$\rho_{acc} = \rho_{acc}^* \cdot \frac{y_0 L_{Bx}}{y_0 L_{Bx} (1 + f_b \tau_x) + B_{Bx} (1 + f_b \tau_x)}. \tag{10}$$

Величина  $\rho_{acc}^*$  зависит от температуры. Для активного ила Центральной станции аэрации в Санкт-Петербурге экспериментально найденная нами при 16 °С величина  $\rho_{acc}^*$  составила 0,69 мг/г-сут. [3]. С увеличением температуры в диапазоне 16–25 °С удельная скорость образования ацетата возрастает в соответствии с зависимостью:

$$\rho_{acc}^*(T) = \rho_{acc}^*_{16} \cdot 1,07^{T-16}, \tag{11}$$

где:  $T$  — температура иловой смеси, °С.

Таким образом, решение уравнения (7) совместно с выражениями (10) и (11) позволяет описать процесс биологической дефосфотации, отталкиваясь от состава сточных вод и технологических параметров процесса биологической очистки.

Рассмотренная закономерность снижения эффективности биологической дефосфотации с возрастанием возраста активного ила, на наш взгляд, несправедлива 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. Снижение скорости биораспада взвешенных веществ, в частности скорости их сбраживания, до ацетата в анаэробных условиях должно снижать выход ацетата, а следовательно, прирост фосфорных бактерий и эффективность очистки от фосфора. Теоретическое описание снижения скорости биологической дефосфотации с уменьшением возраста ила по рассмотренному механизму практически невозможно, тем самым зависимость биологической дефосфотации от возраста во всем его диапазоне может быть получена только полумпирически, на основе экспериментальных исследований.

Полученные нами экспериментальные данные [2] подтверждают обоснованный теоретически характер зависимости эффективности БДФ от возраста активного ила. Оптимальное значение возраста, где скорость образования ацетата и эффективность удаления фосфора достигают наибольших значений, лежат в диапазоне 6–11 суток. Этот диапазон соответствует и наибольшей эффективности технологии нитриденитрификации, что подтверждает целесообразность совмещения этих биотехнологий для эффективной очистки от азота и фосфора. Как следует из результатов исследований, применение технологии БДФ при возрасте менее 4–5 суток малоэффективно.

При проведении расчета количества удаляемого на сооружениях фосфора необходимо также учитывать высвобождение фосфора на стадии обработки осадков сточных вод. На рисунке 3 показан материальный баланс в системе биологической очистки аэротенк — вторичный отстойник.

Из рисунка видно, что на стадию обработки осадка поступает избыточный активный ил ( $\Delta M$ ), обогащенный фосфатом в процессе биологической очистки в системе аэротенк — вторичный отстойник. Со стадии обработки осадков вода над илом, фугат или фильтрат рециркулируются либо в «голову» очистных сооружений, либо в начало аэротенка ( $M_0$ ). В анаэробных условиях происходит интенсивное выделение фосфора в среду, поэтому, для эффективного удаления фосфора необходимо избегать длительного пребывания избыточного активного ила в анаэробных условиях. В противном случае возможна ситуация, когда практически весь накопленный в основном процессе (в системе аэротенк — вторичный отстойник) фосфор будет выделен на стадии обработки и возвращен в систему биологической очистки с внутренними потоками ( $M_0$  на рис. 3), что приведет к увеличению нагрузки на аэротенк и существенному снижению эффективности очистки от фосфора.

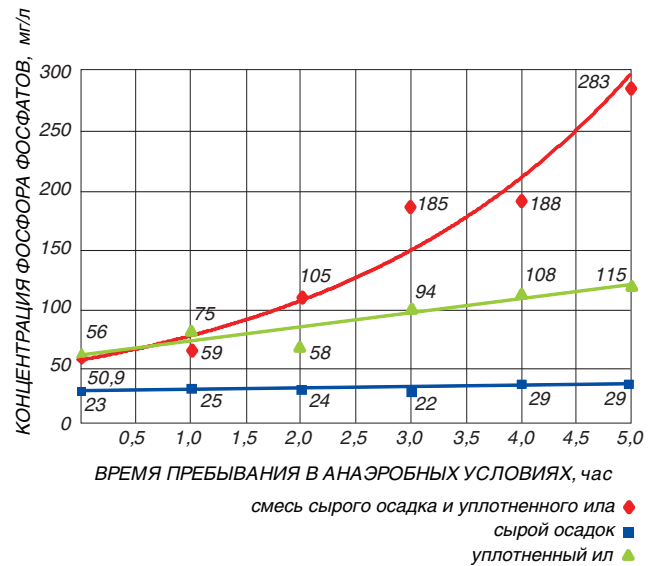


Рис. 4. Высвобождение фосфора фосфатов на городских очистных сооружениях производительностью 330 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Для получения практических данных об уровне вторичного загрязнения фосфором в процессе обработки осадков сточных вод проведена серия экспериментальных исследований [1]. Данные, полученные в результате этих исследований, приведены на рисунке 4.

График зависимости выделения фосфора фосфатов в среду от времени пребывания осадка в анаэробных условиях показывает, что наиболее существенное выделение фосфора фосфатов из осадка происходит при смешении избыточного ила с сырым осадком (органическими веществами), выделение же фосфатов из избыточного ила и сырого осадка значительно ниже.

Таким образом, для обеспечения эффективной очистки от фосфора на городских очистных сооружениях недостаточно использовать только технологию биологической дефосфотации, необходимо также предусмотреть специальные меры по минимизации вторичных загрязнений от стадии обработки осадков сточных вод. С этой целью могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

- максимальное сокращение времени пребывания смеси сырого осадка и избыточного ила (уплотненного ила) в анаэробных условиях,
- отказ от совместного уплотнения сырого осадка и избыточного ила,
- при отсутствии возможности отказаться от совместного уплотнения и/или сократить время пребывания осадка в анаэробных условиях, дозирование реагента (например сульфата железа),
- дозирование реагента в основном процессе позволяет свести к нулю вторичное загрязнение фосфором фосфатов во вторичных отстойниках.

#### Литература

1. Большаков Н. Ю. «Минимизация вторичных загрязнений в процессе очистки сточных вод по технологии биологической дефосфотации». // «Водоочистка», № 12, 2011 г.
2. Большаков Н. Ю. «Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях». — СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2010 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.