

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

В.С. Рожков, В.И. Нездойминов

Рекомендации

ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И РАСЧЕТУ СИСТЕМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ОЧИСТКИ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД С ЭРЛИФТНЫМИ
БИОРЕАКТОРАМИ

УДК 628.335 (075.8)

ББК 38.761.2 я7

Р 62

Рекомендовано к изданию Научно-Техническим Советом ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» от 23.06.2022, протокол № 4 и Научно-Техническим Советом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства ДНР от 12.12.2022, решение № 2

Рецензент

Найманов А.Я., доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и хозяйство» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Р 62 Рожков, В.С. Рекомендации по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами / В.С. Рожков, В.И. Нездойминов – Макеевка: ГОУ ВПО «ДОННАСА», 2022. – 30 с.

В рекомендациях приведены положения по расчету и проектированию сооружений биологической очистки городских сточных вод от органических веществ, соединений азота и фосфора в схемах с эрлифтными биореакторами.

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников проектных строительных и научно-исследовательских организаций, преподавателей и студентов высших учебных заведений строительного профиля, магистров и аспирантов.

УДК 628.335 (075.8)

ББК 38.761.2 я7

© В.С. Рожков, В.И. Нездойминов, 2022

© ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные положения.....	7
2. Описание модифицированной схемы Йоханнесбургского процесса J НВ-ЭБ.....	7
3. Расчет сооружений биологической очистки в схеме JНВ-ЭБ	9
Литература.....	19
Приложение.	22

Введение

Сброс сточных вод различной степени очистки оказывает значительное воздействие на водные экосистемы [1-3], что выражается в снижении биосферных функций водоемов, принимающих сточные воды антропогенного характера. Причиной этого явления является эвтрофикация водных источников за счет интенсивного развития анаэробных микроорганизмов и водорослей, обусловленного, в свою очередь, сбросом очищенных сточных вод, содержащих соединения азота и фосфора (биогенных элементов).

Для сокращения данного воздействия в части очистки сточных вод, в настоящее время разработаны различные схемы и сооружения биологической очистки городских стоков [4], наиболее эффективные из которых представлены двумя группами методов: БНДФ (биологическая нитриденитрификация с биологическим удалением соединений фосфора) и БНДФХ (биологическая нитриденитрификация с комбинированным химико-биологическим удалением фосфора).

Такие системы представлены сооружениями (биореакторами различного типа и вторичными отстойниками), объединенными в целостную систему посредством перетоков и рециклов. Основой большинства наиболее распространенных схем БНДФ и БНДФХ в мире в настоящее время являются процессы Phoredox [5], модифицированный вариант процесса Кейптаунского университета МУСТ [6], Йоханнесбургский процесс JNB [7]. Данный перечень схем не является исчерпывающим. Существует еще ряд технических решений, которые либо базируются на приведенных выше, либо достаточно специфические по качеству исходного стока и аппаратному оформлению. К ним можно отнести PhoStrip [8], Renphosystem [9], VIP [10], ISAN [11], SBR и др. Часть из этих методов можно отнести к комбинированным – совместному биолого-химическому удалению фосфора.

Приведенные основные схемы биологического удаления азота и фосфора достаточно сложны в исполнении, что обуславливает дороговизну их реализации в отечественной практике очистки городских сточных вод. Кроме того, достаточной часто в случае реализации данных схем наблюдается расхождение фактического качества очистки с проектными расчетными величинами [4], [12-15]. Причиной подобных явлений являются не только колебания качества исходных сточных вод, но и несовершенство системы вторичного отстаивания – анаэробные условия вторичного отстаивания приводят к выделению фосфора в очищаемый сток [16].

Такого недостатка лишены системы, основанные на предложенных в ГОУ ВПО «ДонНАСА», аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации [17], которые являются основным элементом концепции биологической очистки с эрлифтными биореакторами (БОСЭБ) [18,19]. Концепция БОСЭБ подразумевает, в том числе, использование осветления во взвешенном слое для вторичного илоразделения, что исключает нахождение активного ила в анаэробных условиях на конечных стадиях биологической очистки, и исключает выделение фосфора в очищаемый сток.

Кроме того, системы биологической очистки БОСЭБ не предусматривают перекачивания иловой смеси для организации нитрифицированного рецикла – в аэротенке с затопленной эрлифтной системой аэрации протекают процессы симультанной нитри-денитрификации, что снижает затраты на перекачивание жидкости. Сравнение основных технологических показателей предложенной схемы ЛНВ-ЭБ (Йоханнесбургский процесс, модифицированный эрлифтным биореактором) с основными используемыми в мировой и отечественной практике процессами приведено в табл. 1.

В таблице 1. использованы следующие обозначения:

ИКПО – интегральный показатель качества очистки;

$T_{\text{оч}}$ – время пребывания жидкости на станции очистки;

$I_{\text{ок}}$ – удельный расход воздуха на окисление органического вещества 1 метра кубического поступающих сточных вод, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$S_{\text{РЕЦ}}$ – кратность превышения рециркуляционных потоков над расходом исходного стока;

$Z_{\text{ПЕР}}$ – количество условных зон перемешивания.

Таблица 1. Укрупненная характеристика схем биологической очистки сточных вод.

Технологическая схема	ИПКО	$T_{\text{оч}}, \text{ч}$	$I_{\text{ок}} \text{ м}^3/\text{м}^3$	$S_{\text{РЕЦ}}$	$Z_{\text{ПЕР}}$
Процесс Phoredox	14-20	18...28	26...55	2...6	2,5
Процессы УСТ и МУСТ	8-10	16...25	22...42	1,5...7	2
Йоханнесбургский процесс JHB	9-12	17...26	22...42	1,5...7	3
Процесс JHB-ЭБ	7-10	18...24	15...20	0,6...1	2

По относительным показателям процесс БОСЭБ превосходит все использующиеся в настоящее время технологические схемы, что соответствует требованиям Наилучших Доступных Технологий при более низких, чем у известных технологий, эксплуатационных затратах за счет меньшего объема рециркуляции и расхода воздуха.

1. Основные положения

1.1. Для биологического удаления соединений азота и фосфора из городских сточных вод рекомендуется использование модифицированной схемы Йоханнесбургского процесса, которая состоит из аноксидного биореактора, анаэробного биореактора и аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (обозначение схемы – «*ЖНВ-ЭБ*»).

1.2. Схема очистки предусматривает вторичное илоразделение в аэротенке-осветлителе посредством устройства в нем зоны илоотделения во взвешенном слое осадка.

1.3. Потокораспределение сооружений биологической очистки подразумевает наличие одного нитрифицированного рецикла с отбором возвратной иловой смеси из нижней зоны аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтного биореактора).

1.4. Исходный сток распределяется между аноксидным и анаэробным реакторами в пропорции 40:60, что обеспечивает органическим питанием в первом биореакторе процессы денитрификации, во втором – процессы высвобождения фосфатов.

1.5. Избыточный активный ил совместно с возвратной иловой смесью отбирается из нижней зоны аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтного биореактора) и отводится на дальнейшую стабилизацию и сгущение по известным технологиям.

2. Описание модифицированной схемы Йоханнесбургского процесса *ЖНВ-ЭБ*

Модифицированная применением эрлифтного биореактора схема Йоханнесбургского процесса биологической очистки приведена на рис. 1. Исходный сток после первичного отстаивания расходом q_1 ($\text{м}^3/\text{сут}$) поступает в пропорциях 40:60 в аноксидный и анаэробный реакторы объемом W (м^3) каждый. В этих сооружениях устраиваются системы перемешивания в бескислородных условиях. В аноксидный реактор, помимо указанной доли

исходного стока, осуществляется подача возвратной иловой смеси расходом q_r ($\text{м}^3/\text{сут}$), в анаэробный реактор поступает исходный сток в количестве 60% от общего расхода q_1 и сток аноксидного реактора.

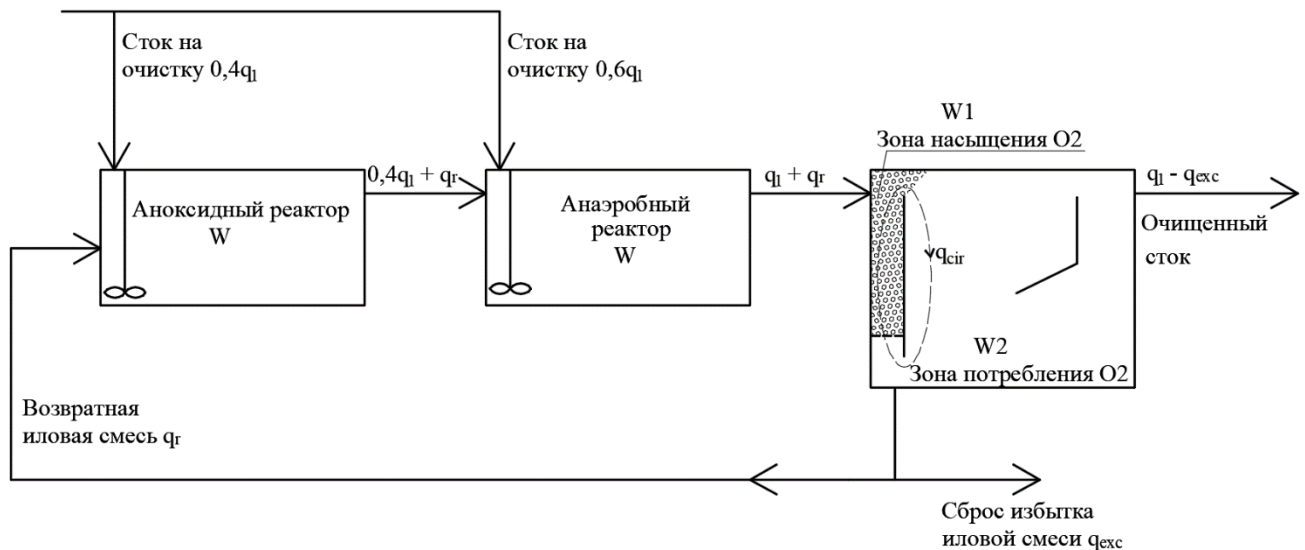


Рисунок 1. Расчетно-принципиальная схема процесса JNB-ЭБ

Далее иловая смесь поступает в эрлифтный биореактор, состоящий из двух зон: зоны насыщения кислородом воздуха объемом $W1$ (м^3) и зоны потребления кислорода $W2$ (м^3). В данном сооружении посредством затопленного эрлифта создается внутренняя циркуляция расходом q_{cir} ($\text{м}^3/\text{сут}$). Из нижней зоны аэротенка-осветлителя осуществляется отбор иловой смеси в количестве суммы расхода возвратного q_r и избыточного q_{exc} ила ($\text{м}^3/\text{сут}$). Из зоны осветления (которая входит в состав зоны потребления кислорода $W2$) в верхней части сооружения осуществляется отвод биологически очищенных сточных вод.

Аноксидный реактор предназначен для обеспечения протекания процессов денитрификации с целью снижения концентрации нитратов в возвратной иловой смеси. Добавление исходного стока в это сооружение обеспечивает протекающие аноксидные гетеротрофные процессы необходимым органическим субстратом.

Анаэробный реактор выполняет функцию культиватора фосфор-аккумулирующих микроорганизмов (ФАО), в котором эти микроорганизмы осуществляют накопление поли-β-гидроксиалканоатов (ПГА) с высвобождением ортофосфатов в окружающую жидкую фазу.

Эрлифтный биореактор (аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации) выполняет ряд функций:

1. Культивирование автотрофных микроорганизмов – нитрификаторов, осуществляющих в аэробных условиях биологическое окисления азота аммонийного до азота нитратов.

2. Наряду с нитрификацией, в данном сооружении симультанно протекают процессы денитрификации с восстановлением нитратов до свободного азота, что увеличивает качество очистки по общему азоту.

3. В аэробных условиях сооружения происходит интенсивный рост ФАО с потреблением фосфатов и накоплением внутриклеточных полифосфатов, что обеспечивает улучшенное биологическое удаление фосфора.

4. В зоне осветления, которая также задействована в процессе биологической очистки, происходит илоразделение в обновляющемся взвешенном слое активного ила.

3. Расчет сооружений биологической очистки в схеме ЖНВ-ЭБ

Исходными данными для расчета систем биологической очистки является состав и расход поступающих городских и смешанных сточных вод. Согласно СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения, исходные данные для проектирования развития и реконструкции существующих очистных сооружений следует принимать на основании полученных должным образом результатов контроля расхода и свойств поступающих сточных вод за период не менее 3 лет, с учетом перспективного развития поселений и городских округов.

Поскольку предложенный далее подход к расчету сооружений базируется на современных моделях активного ила (в частности, ASM3+Bio-P), состав поступающих сточных вод должен быть приведен к стандартизированному Международной водной ассоциацией (IWA) виду.

Сопоставление классических измерений состава сточных вод и по СП СП 32.13330.2018 и стандартизированных параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2. Соответствие стандартизированных компонентов показателям состава сточных вод.

Показатель исходного стока	Компоненты в ASM3+Bio-P
БПК ₅	S_S, S_I, X_I, X_S
ВВ	$X_{TSS}, (X_I, X_S)$
N-NH ₄ ⁺	S_{NH_4}
N-NO ₃ ⁻	S_{NO}
P-PO ₄ ³⁻	S_{PO_4}

Как видно из табл. 2. биогенные элементы (соединения азота и фосфора) имеют прямое выражение стандартизированных величинах, а компоненты БПК₅ представлены рядом взаимно пересекающихся параметров.

Для определения исходных параметров органических веществ при моделировании ASM, на основании данных химических анализов, следует решать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} S_S + X_S = 1,47 \text{ БПК}_5 \\ X_S + X_I = 1,45 \cdot (0,8) \cdot C_{ВВ} \\ S_S + S_I + X_S + X_I = \text{ХПК} \\ S_S + S_I = \text{ХПК}_\phi \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, для математического описания состава исходного стока по органическим веществам достаточно получения 4х результатов лабораторных исследований исходного стока: БПК₅, ХПК взболтанной пробы, ХПК фильтрованной пробы (ХПК_ф), концентрации взвешенных веществ.

Механическая очистка, усреднение и первичное отстаивание рассчитываются по зависимостям и на основании рекомендаций раздела 9 СП 32.13330.2018.

Анаэробный и аноксидный реакторы принимаются из расчета времени пребывания иловой смеси в них 0,5-0,75 часа с учетом рецикла. Для унификации размеров сооружений допускается принимать различное время в аэробном и аноксидном реакторе для достижения одинакового объема в этих ступенях. Фактический объем этих сооружений уточняется по результатам биохимического расчета.

Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации. Основные геометрические размеры сооружения определяются в следующем порядке.

Полезный объем биореактора-осветлителя определяется по формуле:

$$W = \frac{Q_{\text{сут}} \cdot (L_{\text{en}} - L_{\text{ex}})}{a_i \cdot (1 - A) \cdot 10^3 \cdot B_x}; \text{ м}^3 \quad (2)$$

где: L_{en} – БПК на входе в сооружение, мг/л

L_{ex} – БПК на выходе в сооружение, мг/л

a_i – концентрация активного ила, (2,5...4,5) мг/л

B_x – нагрузка на активный ил, (предварительно принимается 0,2) г/(г·сут)

Тогда:

Рассчитывается окислительная мощность биологического реактора

$$OM = \rho \cdot a_i \cdot (1 - A) \cdot W, \quad (3)$$

где: ρ – удельная скорость окисления, (0,006) г/(г·ч).

Вычисляется требуемый расход воздуха

$$Q_{\text{air}} = \frac{OC}{k_{\text{исп}} \cdot M_O}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

где OC – окислительная способность аэрационной системы, принимаемая равной окислительной мощности аэротенка-осветлителя OM , кг/ч;

$k_{исп}$ – коэффициент использования кислорода воздуха, определяемый исходя из глубины и типа аэраторов (0,035...0,045);

M_O – массовое содержание кислорода в подаваемом воздухе, (0,27) кг/м³.

Назначается интенсивность аэрации в затопленном эрлифте q_{air} , м³/(м²·ч), принимается $q_{air} = 10...20$ м³/(м²·ч).

По расходу воздуха и принятой интенсивности аэрации рассчитывается поперечная площадь затопленного эрлифта

$$\omega_a = \frac{Q_{air}}{q_{air}}, \text{ м}^2. \quad (5)$$

Задается значение рабочей высоты H , м.

$H=1,5...4,5$ м.

Принимается ширина осветлителя $B_c = (0,25...0,4) \cdot H$

Определяется глубина дна аэротенка-осветлителя относительно нижней кромки наклонного козырька определяется:

$$h_w = H - B_c, \text{ м}. \quad (6)$$

Ширина зеркала защитной зоны принимается равной:

$$B_s = 0,2 \cdot B_c, \text{ м}. \quad (7)$$

Ширину зазора B_j между затопленной перегородкой и нижней кромкой наклонного козырька следует принимать равной 0,3...0,35 от ширины B_c .

Глубина погружения вертикальной разделительной перегородки под уровень свободной поверхности $z_s = 0,05 \cdot B_c$ при значении угла между наклонным козырьком и вертикальной плоскостью $\beta = 40^\circ$.

Ширина наклонной части, которая должна занимать участок дна, не находящийся в поле соударения с турбулентной затопленной струёй рассчитывается по формуле:

$$B_d = B_c - 0,175 \cdot h_w, \text{ м}. \quad (8)$$

Высота наклонной части дна

$$H_d = B_d \cdot \text{tg} \alpha_d, \text{ м}, \quad (9)$$

где: α_d – угол наклонной поверхности, устраиваемой в месте сопряжения боковых стен и дна аэротенка-осветлителя, по отношению к горизонтальной плоскости. Угол α_d принимается равным 55° .

Ширина затопленного эрлифта B_a рассчитывается по формуле:

$$B_a = \frac{\omega_a}{W-H \cdot \omega_a} \cdot \left(B_j H + (B_c - B_s) \cdot \frac{(H-h_w+z_s)}{2} + h_w \cdot B_c - \frac{B_d \cdot H_d}{2} \right), \text{ м.} \quad (10)$$

Общая ширина секции аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации определяется по формуле:

$$B = B_a + B_j + B_c, \text{ м.}$$

Чертеж определенных геометрических параметров сооружения приведен на рис. 2.

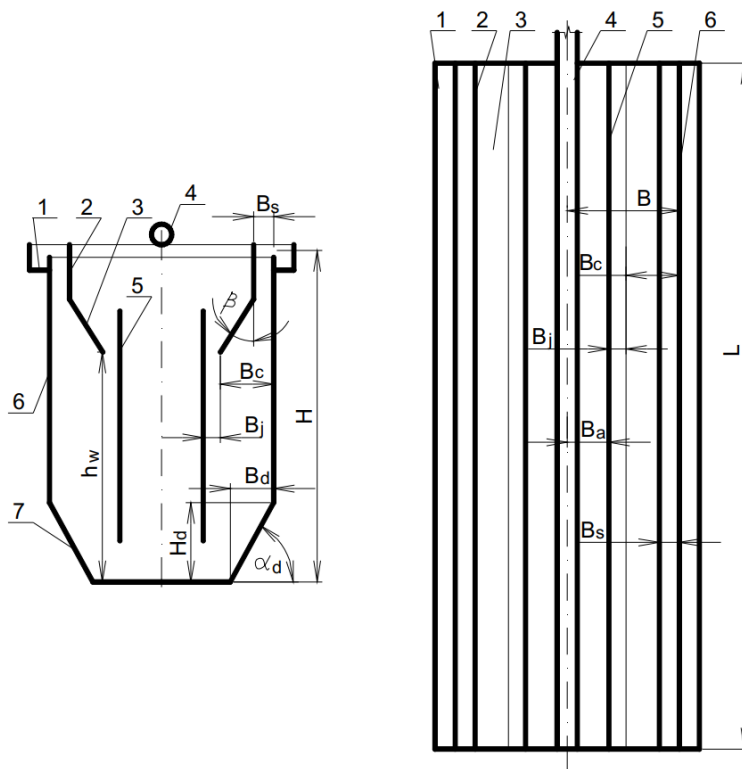


Рисунок 2. Чертежная схема аэротенка-осветлителя.

1 – сборный лоток очищенной жидкости; 2 – вертикальная разделительная перегородка; 3 – наклонный козырёк; 4 – подводящий лоток сточных вод; 5 -

затопленная перегородка; б – наружная стенка корпуса аэротенка-осветлителя;
7 – наклонная часть днища аэротенка-осветлителя.

Определяется величина циркуляционного расхода q_{cir} , м³/с:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{Q_{air}}{v_{ж}+0,34} \\ h_a - \frac{(h_a-z_1)}{\omega_a} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_{ж} \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж}+0,34)} \right) - \left[W_{ц} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_{ж} \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж}+0,34)} \right) + \frac{W_{к}-W_{ц}}{W_{к}} \right] h_a +, \\ + \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{cir}+Q_{air}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{cir}^2}{2g} \end{array} \right. \quad (11)$$

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

h_a – глубина погружения аэратора, м;

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

$W_{к}$ – 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;

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

$v_{ж}$ – 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 .

Неизвестными величинами в системе уравнений (11) являются расход иловой смеси $Q_a = q_{cir}$ и скорость течения жидкой фазы в эрлифте $v_{ж}$.

Объемы зоны насыщения кислородом ($W_{нас}$) и потребления кислорода $W_{потр}$ приведены на рис 3.

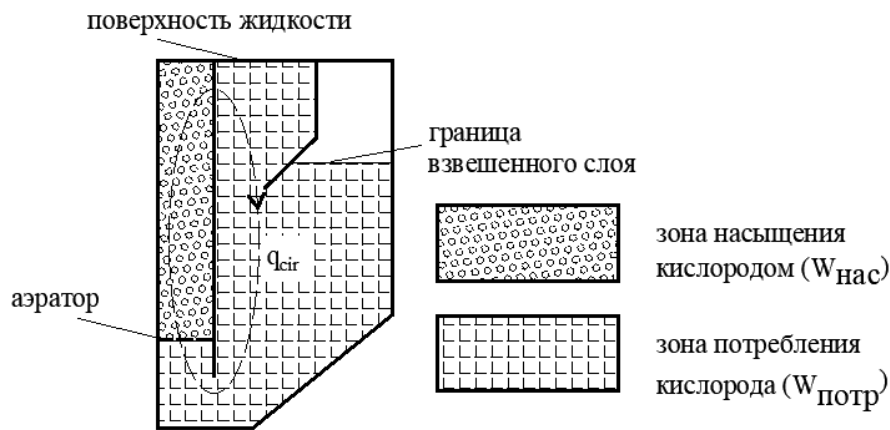


Рисунок 3. Расчетные зоны в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Определяется интенсивность циркуляции $I_{ц}$ ($м^3/м^2 \cdot ч$), по формуле:

$$I_{ц} = \frac{q_{cir}}{\omega_j}, \quad (12)$$

где: ω_j – площадь зазора между эрлифтной колонной и наклонным козырьком, м (рис. 2).

Выполняется определение границ допустимой интенсивности циркуляции. Минимальная интенсивность циркуляции определяется по формуле:

$$I_{ц,мин} = 15900 \cdot v_{ос} \cdot H^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot h_w}{B_j} + 0,41}, \quad (13)$$

где: $v_{ос}$ – скорость осаждения частиц активного ила, принимаемая около 0,0002-0,0005 м/с;

Максимальная интенсивность циркуляции:

$$I_{ц,max} = \frac{31,5 \cdot \left(\frac{h_w}{B_j}\right)^{0,844}}{(q_c + 0,29)^{0,801}}, \quad (14)$$

где: q_c – гидравлическая нагрузка на осветлитель, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Величина гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны осветлителя вычисляется по формуле:

$$q_s = 0,377 \cdot \frac{C_{в.в}^{1,19} \cdot a_i^{0,451}}{1,0078^{1,19 - I_{ц}}}, \quad (15)$$

где: $C_{в.в}$ – концентрация взвешенных веществ на выходе из осветлителя, мг/л .

Если определенная по формуле (12) интенсивность циркуляции соответствует условию $I_{ц,мин} < I_{ц} < I_{ц,max}$, геометрические параметры утверждаются. Иначе, необходимо внести корректировки в дозу ила a_i либо принятую интенсивность аэрации q_{air} в рекомендуемом диапазоне.

На основании полученных геометрических размеров сооружений выполняется *биохимическое моделирование очистки*.

Для этого решается система уравнений, описывающая изменение концентрации каждого из компонентов системы в каждом сооружении. Уравнения приведены в прил. 1. Они могут быть решены в любом математическом редакторе либо с использованием программного комплекса CellDesigner – программного комплекса разработки The Systems Biology Institute, Токио, Япония, распространяемого на бесплатной основе.

Для расчета системы в программной среде CellDesigner, к данным рекомендациям прилагается файл с моделью ЖНВ-ЭБ, в котором необходимо задать определенные по формулам (1)-(11) исходные данные.

Перечень исходных данных приведен в таблице 3.

Таблица 3. Исходные данные для моделирования.

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	Значение
			ЛНВ-ЭБ
1	2	3	5
Концентрация растворенного субстрата в исходном стоке	Ss_in	гО ₂ /м ³	ф-ла 1.
Концентрация нерастворенного субстрата в исходном стоке	Xs_in	гО ₂ /м ³	ф-ла 1.
Концентрация азота аммонийного по N в исходном стоке	SNH4_in	гN/м ³	хим.анализ
Концентрация нерастворенного инертного субстрата в исходном стоке	XI_in	гО ₂ /м ³	ф-ла 1.
Концентрация нерастворенного инертного субстрата в исходном стоке	SI_in	гО ₂ /м ³	ф-ла 1.
Концентрация фосфатов по P в исходном стоке	SPO4_in	гP/м ³	хим.анализ
Концентрация ВВ в исходном стоке	X_TSS_in	г/м ³	хим.анализ
Концентрация гидрокарбонатов в исходном стоке	SALK_in	моль/м ³	хим.анализ
Расход поступающих сточных вод	q1	м ³ /сут	
Внутренний циркуляционный расход аэротенка	qcir	м ³ /сут	ф-ла 11.
Возвратный рецикл	qr	м ³ /сут	0,6-1
Расход избыточного ила	qexc	м ³ /сут	0,02...0,03
Расход подаваемого воздуха	Qair	м ³ /час	ф-ла 4.
Коэффициент использования кислорода	kisp		0,035...0,045
Объем анаэробного реактора	W	м ³	на
Объем аноксидного реактора	W	м ³	0,5...0,75ч
Объем зоны насыщения кислородом	W1	м ³	рис. 3
Объем зоны потребления кислорода	W2	м ³	рис. 3
Коэффициент GWK*	gwk		0,002...0,003

* - коэффициент Голдина-Уилкинсона уточняется в процессе моделирования из соотношения:

$$gwk = \frac{C_{ВВ}}{1000a_i} = \frac{X_i^{out}}{X_i^{ins}}, \quad (16)$$

где: X_i^{out} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM в осветленном очищенном стоке, мг/л;

X_i^{ins} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM в биореакторе, мг/л.

По результатам моделирования определяется качество очистки по всем компонентам на выходе из системы. В случае соответствия заявленным требованиям к очищенным сточным водам, расчет можно считать законченным.

В случае не удовлетворительного качества очистки, полученного в результате моделирования, варьируется величина расхода подаваемого воздуха в указанных выше пределах по интенсивности аэрации.

Если увеличение расхода воздуха до предельного значения не решает систему, либо на каком-то этапе наблюдается одновременное превышение концентрации загрязнений 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.

Литература

1. Smith, V. H. Eutrophication science: Where do we go from here? / V. H. Smith, D. W. Schindler // Trends Ecol. Evol., 2009, т. 24, с. 201-207.
2. Du, M. Evaluation and analysis of present water environment quality of MinJiang & TuoJiang river basins / M. Du, Q. Liu, B. Luo и D. Zhang // Sichuan Environ, 2016, т. 35, с. 20-25.
3. Васильева, М. В. Влияние сточных вод на водные объекты в Воронежской области / М. В. Васильева, А. А. Натарова // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. 2016., т. 1, № 7-1 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-stochnyh-vod-na-vodnye-obekty-v-voronezhskoy-oblasti> (дата обращения: 12.11.2022).
4. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Москва: Бюро НДТ, 2019, 416с.
5. Barnard, J. A review of biological phosphorus removal in the activated sludge process / J. Barnard // Water SA, 1976, № 2, с. 136-144.
6. Ekama, G.A. Theory, Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes / G.A. Ekama, G.R. Marias, I.P. Siebritz, A.R. Pitman, G.P. Keay Buchan / University of Cape Town, City Council of Johannesburg and the National Institute for Water Research of CSIR, Pretoria, 1984.
7. Burke, R. Biological excess phosphorus removal in short sludge age activated sludge. Research Report No. W58 / R. Burke и P. M. G. Dolb / Cape Town: University of Cape Town, S.A., 1986.
8. Levin, G. V. PhoStrip® process – a viable answer to eutrophication of lakes and coastal sea water in Italy / G. V. Levin и U. Delia Sala // Biological Phosphate Removal From Wastewaters, 1987, с.249-259.
9. Харькина, О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О.В. Харькина, – Волгоград: Панорама, 2015, 433 с.

10. Randall, C.W. Upgrading a Municipal Activated Sludge Plant for High-Rate Biological Nutrient Removal / C.W. Randall, D. Waltrip, M.V. Wablé, // Water Science and Technology, 1990, №22, с. 21-33.
11. Seyfried, C. F. «Upgrading of wastewater treatment plants for the reduction of nitrogen and phosphorus in Schleswigholstein FRG / C. F. Seyfried, E. Daumaum // Wat. Sci. Tech., Т. 27-8, № 22, 1990, с. 69—76.
12. Кулаков, А.А. Управление работой малых канализационных очистных сооружений в условиях нестабильной нагрузки / А.А. Кулаков // НДТ, 2020, № 4, с. 46-56.
13. Козачек, А. В. Безопасность водных экосистем и проблемы реализации процесса очистки сточных вод от биогенных веществ / А. В. Козачек, Ю.В. Зеленева, Т.В. Скопинцева, А. Г. Синельников, К.А. Конькова, М. И. Михайлин // Вестник российских университетов. Математика, 2015, 20 (1), с.219-222.
14. Константинова, Т.И. Анализ эффективности работы очистных сооружений по фосфору и рекомендации по удалению фосфора / Константинова Т.И. // Евразийское научное объединение, 2019, № 10-2(56), с. 127-129.
15. Галанцева, Л. Ф. Исследования эффективности очистки сточных вод г. Чистополя от фосфатов / Галанцева, Л. Ф., Фридланд С. В. // Вестник Казанского технологического университета, 2010, № 2, с. 311-314.
16. Сапон, Е.Г. Перераспределение фосфора между фазами суспензии избыточного активного ила при аэробной и анаэробной стабилизации / Е. Г. Сапон, В.Н. Марцунь // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология, 2015, № 4(177), с.288-294.
17. Пат. 132076 Україна, B01D 21/02 (2006.01), C02F 3/02 (2006.01), C02F 103/00 Аеротенк-освітлювач / В.І. Нездоймінов, Д.В. Заворотний, В.І. Зятіна, В.С. Рожков - № 201809073; заявл. 31.08.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. №3. – 4 с.: іл

18. Нездойминов, В.И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д.В. Заворотный // Строитель Донбасса, 2018, т. 4, с.17-21.

19. Нездойминов, В.И. Концепция биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами, / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, В.Н. Чернышев // Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2018", 2018, с.220-224.

Приложение 1.

Модель активного ила 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_{FAO}	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
№	Процесс		
1	Гидролиз		
2	Аэробное накопление X_{STO}		
3	Аноксичное накопление X_{STO}		
4	Аэробный рост X_H		
5	Аноксичный рост (денитрификация)		
6	Аэробное эндогенное дыхание гетеротрофов X_H		
7	Аноксичное эндогенное дыхание гетеротрофов X_H		
8	Аэробное дыхание X_{STO}		
9	Аноксичное дыхание X_{STO}		
10	Рост автотрофов X_{AUT} (нитрификация)		
11	Аэробное эндогенное дыхание автотрофов X_{AUT}		
12	Аноксичное эндогенное дыхание автотрофов X_{AUT}		
P01	Накопление ПГА X_{PHA}		
P02	Аэробное накопление полифосфатов X_{PP}		
P03	Аноксичное накопление полифосфатов X_{PP}		
P04	Аэробный рост ФАО X_{FAO}		
P05	Аноксичный рост ФАО X_{FAO}		
P06	Аэробное эндогенное дыхание ФАО X_{FAO}		
P07	Аноксичное эндогенное дыхание ФАО X_{FAO}		
P08	Аэробное разложение полифосфатов X_{PP}		
P09	Аноксичное разложение полифосфатов X_{PP}		
P10	Аэробное дыхание ПГА X_{PHA}		
P11	Аноксичное дыхание ПГА X_{PHA}		

Продолжение приложения 1.

Стехиометрическая матрица ASM3+Bio-P (Hauduc)

Процесс	S_O2	S_S	S_NH4	S_NO	S_N2	S_PO4	S_ALK	S_I	X_I	X_S	X_H	X_STO	X_PAO	X_PP	X_PHA	X_AUT	X_TSS
1		1	0,005			0,005	0,00012	0		-1							-0,75
2	-0,20	-1	0,03			0,00	0,00214					0,80					0,48
3		-1	0,03	-0,11	0,11	0,00	0,01					0,70					0,42
4	-0,25		-0,07			-0,01	0,00				1	-1,25					0,15
5			-0,07	-0,19	0,19	-0,01	0,01				1	-1,54					-0,02
6	-0,80		0,06			0,01	0,00		0,20		-1						-0,75
7			0,06	-0,28	0,28	0,01	0,02		0,20		-1						-0,75
8	-1											-1					-0,60
9				-0,35	0,35		0,03					-1					-0,60
10	-18,05		-4,24	4,17		-0,01	-0,60									1	0,90
11	-0,80		0,06			0,01	0,00		0,20							-1	-0,75
12			0,06	-0,28	0,28	0,01	0,02		0,20							-1	-0,75
P01		-1	0,03			0,35	-0,0035							-0,35	1		-0,531
P02	-0,2					-1	0,0161							1	-0,2		3,11
P03				-0,07	0,07	-1	0,0211							1	-0,2		3,11
P04	-0,67		-0,07			-0,014	-0,0043						1		-1,67		-0,1
P05			-0,07	-0,35	0,35	-0,014	0,0207						1		-2		-0,3
P06	-0,8		0,064			0,012	0,0040		0,2				-1				-0,75
P07			0,064	-0,28	0,28	0,012	0,0240		0,2				-1				-0,75
P08						1	-0,0161							-1			-3,23
P09						1	-0,0161							-1			-3,23
P10	-1														-1		-0,6
P11				-0,35	0,35		0,0250								-1		-0,6

Кинетические выражения скорости процессов ASM3+Bio-P

Проц.	Кинетическое уравнение
1	$q_{XCB_SB,hyd} * [(XC_B/X_{OHO}) / (K_{XCB,hyd} + XC_B/X_{OHO})] * X_{OHO}$
2	$q_{SB_Stor} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_B / (K_{SB,OHO} + S_B)] * X_{OHO}$
3	$q_{SB_Stor} * n_{\mu OHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_B / (K_{SB,OHO} + S_B)] * X_{OHO}$
4	$\mu_{OHO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [(X_{OHO,Stor} / X_{OHO}) / (K_{Stor_OHO} + X_{OHO,Stor} / X_{OHO})] * X_{OHO}$
5	$\mu_{OHO,Max} * n_{\mu OHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [(X_{OHO,Stor} / X_{OHO}) / (K_{Stor_OHO} + X_{OHO,Stor} / X_{OHO})] * X_{OHO}$
6	$m_{OHO} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * X_{OHO}$
7	$m_{OHO} * n_{m_{OHO,Ax}} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * X_{OHO}$
8	$m_{Stor} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * X_{OHO,Stor}$
9	$m_{Stor} * n_{m_{OHO,Ax}} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * X_{OHO,Stor}$
10	$\mu_{ANO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,ANO} + S_{NHx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,ANO} + S_{Aik})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,ANO} + S_{PO4})] * X_{ANO}$
11	$b_{ANO} * [S_{O2} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * X_{ANO}$
12	$b_{ANO} * \eta_{NO,A} * [K_{O2,ANO} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * X_{ANO}$
P01	$q_{PAO,ac_PHA} * [S_B / (K_{SB,PAO} + S_B)] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PP} / X_{PAO}) / (f_{PP_PAO,Max} + X_{PAO,PP} / X_{PAO})] * X_{PAO}$
P02	$q_{PAO,PO4_PP} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,upt} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * [(K_{S,fPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})) / ((K_{I,fPP_PAO} + K_{S,fPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})))] * X_{PAO}$
P03	$q_{PAO,PO4_PP} * n_{\mu PAO} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,upt} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * [(K_{S,fPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})) / ((K_{I,fPP_PAO} + K_{S,fPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})))] * X_{PAO}$
P04	$\mu_{PAO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,PAO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,nut} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * X_{PAO}$
P05	$\mu_{PAO,Max} * n_{\mu PAO} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,PAO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,nut} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * X_{PAO}$
P06	$m_{PAO} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * X_{PAO}$
P07	$m_{PAO} * n_{m_{PAO}} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * X_{PAO}$
P08	$b_{PP_PO4} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * X_{PAO,PP}$
P09	$b_{PP_PO4} * n_{b_{PP_PO4}} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * X_{PAO,PP}$
P10	$b_{PHA_Ac} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * X_{PAO,PHA}$
P11	$b_{PHA_Ac} * n_{b_{PHA_Ac}} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * X_{PAO,PHA}$

Продолжение приложения 1.

Кинетические константы процессов ASM3+Bio-P

Максимальная удельная скорость гидролиза	k_H	9
Коэффициент полунасыщения гетеротрофов	K_X	1
Константа скорости накопления	k_{STO}	12.5
Максимальная скорость роста гетеротрофов	μ_H	3
Понижающий коэффициент роста гетеротрофов в аноксичных усл.	$\eta_{NO,H}$	0,8
Коэффициент полунасыщения S_S	$K_{SS,H}$	10
Коэффициент полунасыщения накопленного продукта	$K_{STO,H}$	0,1
Коэффициент эндогенного дыхания гетеротрофов	b_H	0,3
Понижающий коэффициент энд.дыхания гетеротрофов в аноксичных усл.	$\eta_{NO,end,H}$	0,33
Коэффициент эндогенного дыхания накопленного продукта	b_{Sto}	0,3
Коэффициент полунасыщения S_{O_2}	$K_{O,H}$	0,2
Коэффициент полунасыщения S_{NOx}	$K_{NO,H}$	0,5
Коэффициент полунасыщения S_{NHx}	$K_{NH,H}$	0,01
Коэффициент полунасыщения S_{PO_4}	$K_{PO_4,H}$	0,01
Коэффициент полунасыщения S_{Alk}	$K_{HCO,H}$	0,1
Коэффициент скорости потребления органики ($X_{PAO,PHA}$ накопление)	q_{PHA}	6
Коэффициент скорости накопления $X_{PAO,PP}$	q_{PP}	1,5
Максимальное соотношение $X_{PAO,PP}/X_{PAO}$	$K_{PP,PAO}$	0,05
Коэффициент полунасыщения $X_{PAO,PP}/X_{PAO}$	$K_{max,PAO}$	0,2
Коэффициент полунгибирования $X_{PAO,PP}/X_{PAO}$	$K_{iPP,PAO}$	0,05
Максимальная скорость роста X_{PAO}	μ_{PAO}	1
Коэффициент снижения аноксичного роста X_{PAO}	$\eta_{NO,PAO}$	0,6
Константа насыщения $X_{PAO,PHA}/X_{PAO}$	K_{PHA}	0,1
Эндогенное дыхание X_{PAO}	b_{PAO}	0,2
Понижающий коэффициент аноксичного эндог.дыхания X_{PAO}	$\eta_{NO,end,PAO}$	0,33
Коэффициент скорости лизиса $X_{PAO,PP}$	b_{PP}	0,2
Понижающий коэффициент аноксичного лизиса $X_{PAO,PP}$	$\eta_{NO,lys,PP}$	0,33
Коэффициент скорости дыхания $X_{PAO,PHA}$	b_{PHA}	0,2
Понижающий коэффициент аноксичного дыхания $X_{PAO,PHA}$	$\eta_{NO,resp,PHA}$	0,33
Коэффициент полунасыщения S_S	$K_{SS,PAO}$	10
Коэффициент полунасыщения S_{O_2}	$K_{O,PAO}$	0,2
Коэффициент полунасыщения S_{NOx}	$K_{NO,PAO}$	0,5
Коэффициент полунасыщения S_{NHx}	$K_{NH,PAO}$	0,05
Коэффициент полунасыщения S_{PO_4} при потреблении ($X_{PAO,PP}$ накопление)	$K_{PO_4,PP}$	0,2
Коэффициент полунасыщения S_{PO_4} при отдаче (X_{PAO} рост)	$K_{PO_4,PAO}$	0,01
Коэффициент полунасыщения S_{Alk}	$K_{HCO,PAO}$	0,1
Максимальная скорость роста X_A	μ_A	0,9 - 1,8
Коэффициент разложения X_A	b_A	0,2
Коэффициент эндогенного дыхания X_A	b_A	0,2
Понижающий коэффициент аноксичного энд.дыхания X_A	$\eta_{NO,end,A}$	0,5
Коэффициент полунасыщения S_{O_2}	$K_{O,A}$	0,5
Коэффициент полунасыщения S_{NHx}	$K_{NH,A}$	1-2
Коэффициент полунасыщения S_{PO_4}	$K_{PO_4,A}$	0,01
Коэффициент полунасыщения S_{Alk}	$K_{HCO,A}$	0,5

Продолжение приложения 1.

Стехиометрические константы ASM3+Bio-P

Доля инертной органики, образующейся при гидролизе	$f_{SU_XCB,hyd}$	0
Продуктивность роста X_{OHO} на накопленном $X_{OHO,Stor}$ (Аэробн.)	$Y_{Stor_OHO,Ox}$	0,8
Продуктивность роста X_{OHO} на накопленном $X_{OHO,Stor}$ (Аноксид.)	$Y_{Stor_OHO,Ax}$	0,65
Продуктивность накопления $X_{OHO,Stor}$ на S_B (Аэробн.)	$Y_{SB_Stor,Ox}$	0,8
Продуктивность накопления $X_{OHO,Stor}$ на S_B (Аноксид.)	$Y_{SB_Stor,Ax}$	0,7
Количество инертной органики при разложении биомассы	$f_{XU_Bio,lys}$	0,2
Продуктивность роста X_{PAO} на ПГА $X_{PAO,PHA}$ (Аэробн.)	$Y_{PAO,Ox}$	0,6
Продуктивность роста X_{PAO} на ПГА $X_{PAO,PHA}$ (Аноксид.))	$Y_{PAO,Ax}$	0,5
Продуктивность накопления $X_{PAO,PP}$ (потребление S_{PO4}) на удаленное ПГА $X_{PAO,PHA}$	Y_{PHA_PP}	0,2
Продуктивность потребе $X_{PAO,PHA}$ на $X_{PAO,PP}$ (высвобождение S_{PO4}) на накопленное ПГА (утилизация ацетата)	$Y_{PP_PHA,PAO}$	0,35
Доля растворенной инертной органики при разложении X_{PAO}	$f_{SU_PAO,lys}$	0
Продуктивность роста автотрофов X_{ANO} на S_{NO3}	Y_{ANO}	0,24
Содержание N в S_B	i_{N_SB}	0,03
Содержание N в S_U	i_{N_SU}	0,01
Содержание N в X_U	i_{N_XU}	0,03
Содержание N в X_B	i_{N_XCB}	0,035
Содержание N в биомассе (X_{OHO} , X_{PAO} , X_{ANO})	i_{N_XBio}	0,07
Содержание P в S_B	i_{P_SB}	0
Содержание P в S_U	i_{P_SU}	0
Содержание P в X_U	i_{P_XU}	0,01
Содержание P в X_B	i_{P_XCB}	0,005
Содержание P в биомассе (X_{OHO} , X_{PAO} , X_{ANO})	i_{P_XBio}	0,014
Коэффициент X_U в TSS	i_{TSS_XU}	0,75
Коэффициент X_B в TSS	i_{TSS_XCB}	0,75
Коэффициент $X_{OHO,Stor}$ в TSS	$i_{TSS_XOHO,Stor}$	0,6
Коэффициент биомассы в TSS	i_{TSS_XBio}	0,9
Коэффициент $X_{PAO,PP}$ в TSS	$i_{TSS_XPAO,PP}$	3,23
Коэффициент восстановления NO_3 до N_2	$i_{NOx,N2}$	2,86
Коэффициент NO_3 в ХПК	i_{COD_NOx}	-4,57
Коэффициент N_2 в ХПК	i_{COD_N2}	-1,71
Коэффициент NH_x в заряд	i_{Charge_NHx}	0,07
Коэффициент NO_3 в заряд	i_{Charge_NOx}	-0,07
Коэффициент $X_{PAO,PP}$ ($K_{0,33}Mg_{0,33}PO_3$) _n в заряд	$i_{Charge_XPAO,PP}$	-0,03
Коэффициент PO_4 в заряд	i_{Charge_PO4}	-0,05

Биохимические уравнения ASM3+Bio-P

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dS_O}{dt} = f_1(S_S, S_{NH}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A) \\
 \frac{dS_S}{dt} = f_2(S_O, S_{NO}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PAO}, X_A) \\
 \frac{dS_{NH}}{dt} = f_3(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{NO}}{dt} = f_4(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{N2}}{dt} = f_5(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{PO4}}{dt} = f_6(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{HCO}}{dt} = f_7(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{PO4}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_I}{dt} = f_8(X_S, X_H) \\
 \frac{dX_I}{dt} = f_9(S_O, S_{NO}, X_H, X_A) \\
 \frac{dX_S}{dt} = f_{10}(X_H) \\
 \frac{dX_H}{dt} = f_{11}(S_O, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}) \\
 \frac{dX_{STO}}{dt} = f_{12}(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H) \\
 \frac{dX_{PAO}}{dt} = f_{13}(S_O, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_{PHA}) \\
 \frac{dX_{PP}}{dt} = f_{14}(S_O, S_S, S_{PO4}, S_{NO}, S_{HCO}, X_{PHA}, X_{PAO}) \\
 \frac{dX_{PHA}}{dt} = f_{15}(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_{PP}, X_{PAO}) \\
 \frac{dX_A}{dt} = f_{16}(S_O, S_{NH4}, S_{PO4}, S_{HCO}) \\
 \frac{dX_{TSS}}{dt} = f_{17} \left(\begin{array}{l} S_O, S_S, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, \\ X_{PAO}, X_A, X_{STO} \end{array} \right)
 \end{array} \right. ,$$

Переход от матрицы к системе уравнений производится по принципу, приведенному на рис. п.1. Динамика изменения концентрации каждого компонента описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = \sum STK \cdot V,$$

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 случае пустых ячеек, данный компонент не участвует в перекрестном процессе, стехиометрический коэффициент равен 0.

Процессы	Компоненты					Скорости
	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	
Процесс 1	STK1.1				STK5.1	V1
Процесс 2		STK2.2		STK4.2		V2
Процесс 3	STK1.3	STK2.3	STK3.3	STK4.3		V3
Процесс 4			STK3.4		STK5.4	V4
Процесс 5	STK1.5			STK4.5		V5
Процесс 6			STK3.6		STK5.6	V6

Рисунок П1. Схема применения матрицы ASM.

Показанный на рис. П1 пример описывает изменение концентрации компонента C4 в следующем виде:

$$\frac{dc_4}{dt} = STK4.2 \times V2 + STK4.3 \times V3 + STK4.5 \times V5.$$

В изменении концентрации компонента C4 принимают участие процессы 2,3,5. Компонент C1 изменяется под действием процессов 1,3,5; компонент C2 – процессов 2,3 и т.п. В процессе 1 на рис. 4.5. участвуют компоненты 1 и 5, в процессе 2 – компоненты 2 и 4, в процессе 3 – компоненты 1,2,3,4 и т.д.

Таким образом, количество уравнений в системе будет соответствовать количеству компонентов, в единицах концентрации, для ASM3+Bio-P – 17 уравнений.

Значение стехиометрического коэффициента STK может быть как положительным, так и отрицательным, что говорит о продуцировании или расходовании компонента в данном процессе.

Приведенные кинетические зависимости достаточно громоздки, а с учетом схемы на рис. П1, аналитическое написание уравнений представляет из себя достаточно сложную зависимость, что оправдывает применение матричной формы написания ASM.

В данной работе, для упрощения визуализации предлагаемых зависимостей, предлагается следующая форма написания процессов ASM (на примере органического субстрата S_S ASM3+Bio-P):

$$\begin{aligned} \frac{dS_S}{dt} = & (1 - f_{SI}) \cdot k_H \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H - 1 \cdot k_{STO} \cdot \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_{SS,H} + S_S} \cdot X_H - 1 \cdot \\ & k_{STO} \cdot \eta_{NO,H} \cdot \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO,H} + S_{NO}} \cdot \frac{S_S}{K_{SS,H} + S_S} \cdot X_H - 1 \cdot q_{PHA} \cdot \frac{S_S}{K_{SS,PAO} + S_S} \cdot \\ & \frac{S_{HCO}}{K_{HCO,PAO} + S_{HCO}} \cdot \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP,PAO} + X_{PP}/X_{PAO}} \cdot X_{PAO}. \end{aligned}$$

$$\frac{dS_S}{dt} = f(X_S, X_H, S_O, S_S, S_{NO}, S_{HCO}, X_{PAO}).$$

Четыре слагаемых в уравнении представляют из себя, соответственно, вклад процессов гидролиза, аэробного накопления питательных веществ ординарными гетеротрофами, аноксидного накопления ординарными гетеротрофами, накопления ПГА.

Рекомендации

Виталий Сергеевич Рожков

Виктор Иванович Нездойминов

Рекомендации по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников проектных строительных и научно-исследовательских организаций, преподавателей и студентов высших учебных заведений строительного профиля, магистров и аспирантов.