

РЕКОНСТРУКЦИЯ КОС ДЛЯ УДАЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. СЮРПРИЗЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ОБЩИХ ЗАТРАТ

Доронин С.В.¹
директор

Харькин С.В.²
директор

1 - Компания «Л-Старт»
2 - Компания «Архитектура Водных Технологий»

В статье рассматриваются вопросы реконструкции существующих очистных сооружений с реализацией современных технологий удаления соединений азота и фосфора для достижения современных требований. Показаны способы проводить реконструкцию без затратного строительства новых резервуаров биологической очистки, т.е. используя существующие аэротенки и вторичные отстойники. Этого возможно добиться, увеличивая окислительную мощность существующих аэротенков, повышая рабочую дозу активного ила до расчетных значений. Увеличение рабочей дозы активного ила в аэротенках позволяет значительно снизить капитальные затраты на строительство новых аэротенков, но ведет к «перегрузке» существующих вторичных отстойников. Строительство дополнительного количества вторичных отстойников технологически, экономически и эксплуатационно в этом случае не оправдано. Необходимы сооружения доочистки для достижения требуемых значений по концентрациям взвешенных веществ и значениям БПК в очищенной воде. Экономический баланс основных капитальных затрат на реконструкцию биологического блока КОС лежит между стоимостью строительства дополнительных аэротенков и стоимостью необходимого оборудования доочистки. Также рассмотрена реализация технологии МБР, что позволяет исключить из схемы построения биологического блока КОС вторичные отстойники и сооружения доочистки.

Ключевые слова: очистка сточных вод от азота и фосфора; реконструкция очистных сооружений; аэротенки; вторичные отстойники; фильтры доочистки; МБР.

Задача реконструкции существующих канализационных очистных сооружений (далее – КОС) для выполнения требований достижения качества очищенных сточных вод до нормативов сброса в водоемы рыбо-хозяйственного назначения поставлена уже достаточно давно (с утверждением современных ПДК), но до сих пор реализована на незначительной части очистных сооружений в РФ.

Причиной такого неудовлетворительного положения дел является то, что задача достижения современных требований по биогенным элементам не может быть решена без принципиального изменения существующей технологической схемы и без реализации современных технологий биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора. Даже потратив значительные средства на локальное проектирование и реконструкцию отдельных элементов очистных сооружений без изменения технологии биологической очистки, решить задачу очистки воды до требуемых значений не удастся. Замена решеток, песколовок, первичных отстойников, аэрационных систем аэротенков, системы илоразделения, обработки осадка,

обеззараживания, без принципиальной реконструкции аэротенков под технологии удаления азота и фосфора, оставит качество очищенной воды практически так же далеко от достижения современных требований, как и до начала локальных реконструкций. Полумеры, не затрагивающие изменение технологии, реализованной в биологическом блоке очистных сооружений (аэротенки и вторичные отстойники), не позволяют обеспечить достижение современных требований к очистке сточных вод от биогенных элементов (а именно, по азотной группе – аммонийный азот, азот нитратов, азот нитритов; и фосфору фосфатов). Таким образом, потратив значительные средства на замену оборудования, предприятие может оказаться в ситуации, когда штрафы за недостижение требований по очистке от соединений азота и фосфора останутся разорительными для экономики предприятия.

Причина такого состояния известна и понятна – подавляющее большинство действующих КОС запроектированы и построены в те времена, когда требования предъявлялись к достижению показателей биологической очистки сточных вод только по органическим загрязнениям и взвешенным

Ставки оплаты за негативное воздействие на окружающую среду

Таблица 1

Параметр	Ставка платы, руб./т
БПК _{полн}	243
Аммоний-ион	1190,2
Нитрат-анион	14,9
Нитрит-анион	7439
Фосфаты (по фосфору)	3679,3

Суммы оплаты за негативное воздействие на окружающую среду при условии достижения современных ПДК

Таблица 2

Параметр	ПДК, мг/л	Фактическое значение на выходе КОС, мг/л	Разница между фактическим значением и ПДК, мг/л	Ставка платы, руб./т	Сумма платы, руб./год, К=1
БПК _{полн}	3,0	3,0	0	243	2 661
Аммоний-ион	0,5	0,5	0	1190,2	2 172
Нитрат-анион	40	40	0	14,9	2 175
Нитрит-анион	0,08	0,08	0	7439	2 172
Фосфаты (по фосфору)	0,2	0,2	0	3679,3	2 686

веществам. Блоки биологической очистки этих КОС были рассчитаны под проектные расходы и качество поступающих сточных вод, а размеры (объемы) построенных аэротенков и вторичных отстойников соответствовали тому, чтобы реализовывать проектные биохимические процессы (только окисление органических загрязнений) для достижения нужного качества очистки. Воздуховодное оборудование и аэрационные системы также закладывались исходя из принципа достаточности для обеспечения проектных биохимических процессов, то есть, только для процессов аэробного окисления органических соединений.

С тех пор принципиально изменились состав сточных вод и требования к показателям очищенной воды (в первую очередь – по биогенным элементам), а блоки биологической очистки существующих очистных сооружений остались прежними.

В таблице 1 представлены ставки оплаты за сброс загрязняющих веществ с очищенными сточными водами в водоемы (по биогенным элемен-

там и БПК), установленные на 2017-2018 гг. Постановлением правительства РФ №913 от 13.09.2016 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах».

Тогда, согласно этому Постановлению, *при достижении на КОС качества очистки по этим параметрам в соответствии с современными ПДК*, сумма годового экологического платежа для КОС производительностью $Q=10000 \text{ м}^3/\text{сут.}$ (с рассматриваемыми нами ниже характеристиками поступающих на очистку сточных вод), составит значения, указанные в таблице 2.

Итого сумма экологического платежа за негативное воздействие равна **11 866 руб./год** при соблюдении ПДК по биогенным элементам.

В случае, когда требуемое качество очистки не достигается, то для разницы между фактическим значением параметра очищенной воды и требованием ПДК, устанавливается коэффициент **K=25** для расчета дополнительной платы

Суммы дополнительной оплаты за негативное воздействие на окружающую среду при недостижении современных ПДК

Таблица 3

Параметр	ПДК, мг/л	Фактическое значение на выходе КОС, мг/л	Разница между фактическим значением и ПДК, мг/л	Ставка платы, руб./т	Сумма платы, руб./год, К=25
БПК _{полн}	3,0	13,0	10,0	243	221 737
Аммоний-ион	0,5	32	31,5	1190,2	3 421 081
Нитрат-анион	40	1,2	- 38,8	14,9	0
Нитрит-анион	0,08	2,4	2,32	7439	1 574 836
Фосфаты (по фосфору)	0,2	4,8	4,6	3679,3	1 544 386

за негативное воздействие по рассматриваемому параметру. В таблице 3 представлены суммы дополнительной платы для КОС производительностью $Q=10000$ м³/сут. (с рассматриваемыми нами ниже характеристиками поступающих на очистку сточных вод), **которые реализуют только очистку от органических загрязнений.**

Итого сумма **дополнительного** экологического платежа равна **6 762 041 руб./год**. Т.е. для существующих КОС с рассматриваемыми характеристиками суммарный годовой платеж за негативное воздействие на окружающую среду составит **6,774 млн. руб.**

Понимание того, что достижение современных требований РФ к очищенной воде требует реализации технологий не только окисления органических загрязнений, но и удаления биогенных элементов, приводит к необходимости реконструкции, прежде всего, основного блока КОС – блока биологической очистки. И вот здесь ответственных за результат работы реконструируемых КОС ждут сюрпризы.

Прежде чем обнаружить эти сюрпризы, четко конкретизируем задачу, которую мы рассматриваем в этой статье. Лицам, управляющим проектом реконструкции КОС, необходимо обеспечить **оптимальные** (необходимые и достаточные) затраты на реализацию проекта с обязательным условием достижения требуемого качества

очистки и с учетом объективно существующих ограничений. Объем затрат на реконструкцию существенно зависит как от качества постановки задачи, так и от выбранного способа её реализации.

Начнем с постановки задачи. Следует отметить, что вообще правильно поставленная задача, с четко прописанными начальными условиями и конечным требуемым результатом, позволяет не только оценить предлагаемые к рассмотрению технико-коммерческие предложения (ТКП), но и юридически требовать от исполнителя достижения заявленных им в ТКП качественных показателей очищенной воды.

Правильно поставленная задача реконструкции КОС предполагает соблюдение трех главных условий:

1. Должны быть четко указаны качественные и количественные параметры поступающих сточных вод.

2. Должны быть четко сформулированы требования по необходимым значениям требуемых параметров качества очистки сточных вод.

3. Заказчик должен принять решение о допустимом для него соотношении необходимых и достаточных капитальных и эксплуатационных затрат, а также указать существующие ограничения в части площадей под новое строительство.

В соответствии с этими критериями заказчик сможет более адекватно оценить технические предложения кандидатов на выполнение работ, поставив всех их в одинаковые исходные условия.

Например, техническое задание (ТЗ) на реконструкцию или новое строительство очистных сооружений, не должно допускать манипулирования качественными и количественными значениями характеристик сточных вод, поступающих на очистку. Этим сразу можно устранить заведомо некорректные технологические решения, чтобы не тратить потом время и силы на устранение недостатков реализованного проекта, вызванного неточностью постановки задачи по качеству поступающих сточных вод.

Корректно составленное ТЗ должно содержать четкие параметры поступающих сточных вод, такие как:

- минимальная и максимальная температура сточных вод;
- ХПК;
- БПК₅/БПК_{полн};
- концентрация взвешенных веществ;
- концентрация азота аммонийного ($N-NH_4$);
- концентрация общего азота;
- концентрация фосфора фосфатов ($P-PO_4$);
- концентрация специфических веществ, характерных для конкретных сточных вод (например, нефтепродукты, фенолы, сульфиды и т.д.).

Кроме того, в ТЗ должны быть приведены следующие количественные характеристики сточных вод, такие как:

- среднесуточный расход поступающих сточных вод;
- максимальный суточный расход поступающих сточных вод;
- максимальный месячный расход поступающих сточных вод;
- максимальный часовой расход поступающих сточных вод.

Если задача на реконструкцию КОС поставлена корректно, заказчика ждут следующие «сюрпризы»:

1. Необходимость увеличения требуемых объемов аэротенков для решения задачи очистки сточных вод при использовании различных технологий очистки воды от биогенных элементов (неприятный сюрприз).

2. Необходимость сооружений доочистки для достижения современных требований по таким показателям очищенной воды как БПК_{полн} и взвешенные вещества (неприятный сюрприз).

3. Существует возможность достижения требуемых существующими нормами параметров очистки без увеличения существующего объема аэротенков (приятный сюрприз).

Соотношение между требуемым объемом аэротенков для решения задачи очистки сточных вод при использовании различных технологий очистки воды

Рассмотрим действующие городские (муниципальные) канализационные очистные сооружения. Они были запроектированы на определенный расход (производительность) и качественные характеристики поступающих сточных вод. В существующем виде они реализуют технологию биологической очистки только от органических загрязнений и удаления взвешенных веществ. Таких городских КОС в РФ – подавляющее большинство. Блок биологической очистки в этих КОС построен по «классической» схеме – аэротенки + вторичные отстойники.

Задача состоит в том, чтобы оценить, какие затраты – капитальные и эксплуатационные – необходимы (и достаточны) для реконструкции существующих КОС, чтобы результат их работы после реконструкции гарантированно достигал нормативов действующего на сегодняшний день природоохранного законодательства. При этом необходимо максимально использовать возможности существующих очистных сооружений, т.е. объемы и количество основных резервуаров, оборудование, сети и пр.

Для достижения современных ПДК в реконструированных КОС помимо технологии окисления органических загрязнений должны быть реализованы технологии удаления биогенных элементов, т.е. соединений азота и фосфора. А значит в аэротенках блока биологической очистки нужно обеспечить прохождение следующих биохимических процессов:

- окисление органических соединений (до достижения требуемого значения БПК_{полн});
- нитрификация (до достижения требуемого значения по азоту аммонийному и азоту нитритов);

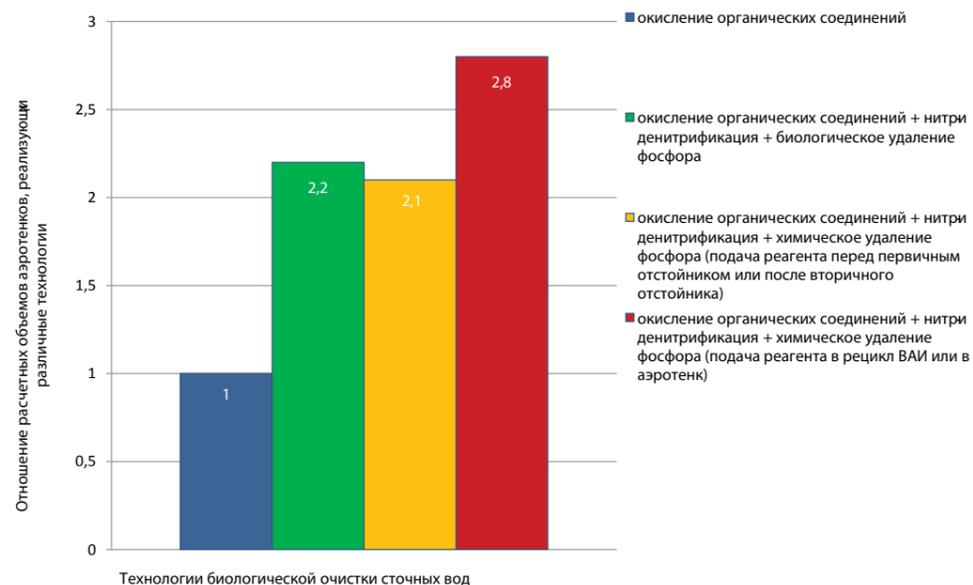


Рисунок 1
Соотношения объемов аэротенков при реализации различных технологий очистки сточных вод.

- денитрификация (до достижения требуемого значения по азоту нитратов);
- биологическое, химическое или комбинированное (биолого-химическое) удаление фосфора (до достижения требуемого значения по фосфору фосфатов).

Для определенности возьмем городские КОС со среднесуточным расходом поступающих сточных вод $Q_{ADF}=10000 \text{ м}^3/\text{сут.}$, максимальным месячным расходом $Q_{MMF}=11000 \text{ м}^3/\text{сут.}$, максимальным суточным расходом $Q_{MDF}=12500 \text{ м}^3/\text{сут.}$, максимальным часовым расходом $Q_{MHF}=830 \text{ м}^3/\text{час}$ и следующими качественными характеристиками поступающих хозяйственно-бытовых сточных вод:

- БПК_{полн} = 230 мг/л;
- концентрация взвешенных веществ (ВВ) = 210 мг/л;
- концентрация азота аммонийного $N-NH_4$ = 33 мг/л;
- концентрация фосфора фосфатов $P-PO_4$ = 6 мг/л;
- минимальная температура сточной воды $T=15^\circ\text{C}$;
- рабочая доза активного ила в аэротенках $X=3 \text{ г/л}$.

Примем объем аэротенков, в которых реализованы только процессы окисления органических загрязнений, то есть объем существующих аэротенков, за «1» (рис. 1, гистограмма 1).

Рассмотрим увеличение необходимых размеров аэротенков для разных вариантов применяемых технологий очистки в отношении к существующему объему аэротенков (рис. 1).

Для соответствия современным требованиям к очистке необходима реализация технологий нитри-денитрификации и технологий удаления фосфора. Это увеличивает расчетный объем аэротенков при реализации технологии биологического удаления фосфора в 2,2 раза (рис. 1, гистограмма 2).

При реализации технологии химического (реагентного) удаления фосфора с подачей реагента перед первичными отстойниками или после вторичных отстойников (перед сооружениями доочистки), требуемые объемы аэротенков должны быть в 2,1 раза больше существующих (рис. 1, гистограмма 3).

При реализации технологии химического (реагентного) удаления фосфора с подачей реагента в поток возвратного активного ила (ВАИ) или непосредственно в аэротенк, существующие объемы аэротенков нужно будет увеличить в 2,8 раза (рис. 1, гистограмма 4).

Отметим, что выбор точки ввода реагента принципиально влияет на величину расхода реагента, и потребление реагентов на химическое удаление фосфора при их вводе перед

первичными отстойниками или перед фильтрами доочистки, практически в 2 раза больше, чем при вводе реагентов в аэротенки или в поток возвратного активного ила. Во всех случаях на выходе из аэротенков показатели по соединениям азота и фосфора соответствуют требованиям ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения. Важно иметь в виду, что при низких температурах поступающих сточных вод все значения объемов аэротенков еще более возрастают.

Напомним, что расходные характеристики, качественные показатели поступающей на биологическую очистку сточной воды, температура и рабочая доза ила в аэротенках были приняты одинаковыми для всех приведенных результатов расчетов.

Для руководства КОС, планирующего реконструкцию существующих КОС для достижения современных ПДК, этот сюрприз увеличения требуемых объемов аэротенков может стать настоящим шоком, поскольку это ведет к существенному увеличению капитальных затрат проекта и требует места для строительства новых аэротенков.

Здесь следует отметить, что многочисленные проведенные нами обследования существующих КОС в небольших городах показывают, что текущие расходы поступающих на очистку сточных вод существенно (иногда – в разы) меньше тех расходов, на которые в свое время проектировались существующие очистные сооружения. В этом случае заказчику реконструкции таких КОС, можно сказать, повезло, поскольку при реконструкции есть шанс либо «уместиться» в существующие объемы аэротенков, либо увеличение объемов (строительство новых аэротенков) потребует относительно невысоких капитальных вложений.

Однако, в большинстве крупных городов, расходы сточных вод не только не уменьшились, но и увеличились из-за роста населения, подключения новых районов. В некоторых городах наблюдается тенденция снижения удельного водопотребления населением из-за повсеместной установки счетчиков воды. Но концентрации загрязнений в сточных водах увеличились в 1,4-1,7 раз, что также необходимо учитывать при расчетах реконструируемых сооружений. В принципе, расчеты аэротенков ведутся по нагрузкам загрязнений в сточной воде, которые представляют собой произведение концентрации соответствующего загрязнения на расход сточных вод.

Необходимость сооружений доочистки для достижения современных требований по таким показателям очищенной воды как БПК_{полн} и взвешенные вещества

Вторым, менее заметным на фоне масштаба увеличения требуемых объемов аэротенков, является вопрос о необходимости сооружений доочистки для достижения требований по БПК_{полн} и взвешенным веществам. Дело в том, что даже идеально работающие вторичные отстойники на выходе обеспечивают показатель по взвешенным веществам (ВВ) 7-9 мг/л, и, соответственно, по БПК_{полн} 6-10 мг/л (в зависимости от зольности активного ила), без дополнительных сооружений доочистки не обойтись, если нужно достигать БПК_{полн} = 3 мг/л. И доочистка тем технологичнее и дороже, чем больше показатель по взвешенным веществам на выходе из вторичных отстойников. Таким образом, для достижения современных требований к качеству очищенной воды, необходимы сооружения доочистки именно от взвешенных веществ, содержащихся в биологически очищенной в аэротенках и осветленной во вторичных отстойниках воде.

Возможности достижения требуемых параметров очистки без увеличения существующего объема аэротенков

Реконструкция существующих КОС под технологии удаления биогенных элементов (азота и фосфора) без изменения окислительной мощности аэротенков (то есть без увеличения рабочей дозы ила в аэротенках), потребует значительных капитальных затрат на строительство дополнительных сооружений (аэротенков). Однако, существуют меры, которые могут существенно уменьшить потенциальные капитальные затраты на реконструкцию КОС. Эти меры основаны на изменении дозы активного ила в аэротенках.

Мы производили расчет объемов аэротенков по общепринятой в мировой, и уже в российской, практике модели ASM, в основу которой положены уравнения ферментативной кинетики, то есть полученные удельные скорости биохимических процессов для одних и тех же сточных вод будут одинаковыми. Реальные скорости, и, как следствие, объемы сооружений, могут отличаться

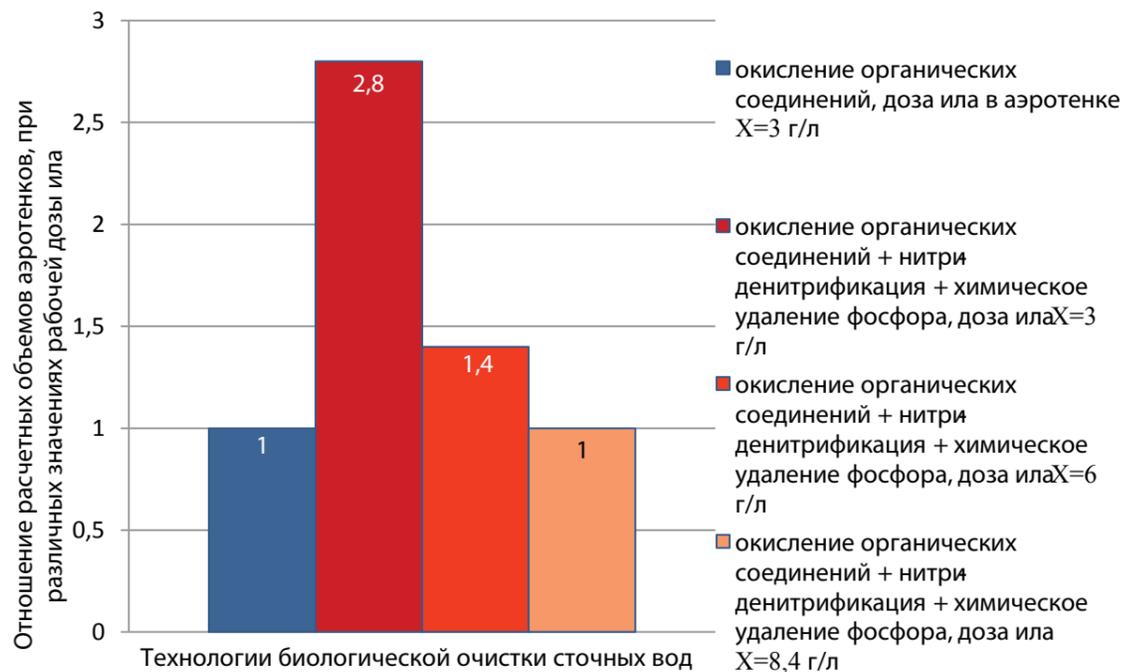


Рисунок 2
Соотношения объемов аэротенков, реализующих технологии биологического удаления азота и химического удаления фосфора с подачей реагента в поток ВАИ или в аэротенк, при различных значениях рабочей дозы активного ила в аэротенке.

только вследствие различной дозы активного ила в аэротенках. Различия расчетных объемов аэротенков в диапазоне доз активного ила 1,5-12,0 г/л будут практически пропорциональны различию в дозах активного ила. Рассмотрим влияние повышения рабочей дозы активного ила на размер аэротенков после их реконструкции по современной технологической схеме, оптимальной для качества рассматриваемых поступающих сточных вод, реализующей процессы нитри-денитрификации и различные варианты удаления фосфора.

Нами проведена оценка влияния дозы активного ила на размер аэротенков для следующих схем:

- **Схема 1.** Химическое (реагентное) удаление фосфора с подачей реагента в поток возвратного активного ила (ВАИ) или непосредственно в аэротенк.
- **Схема 2.** Биологическое удаление фосфора.

Результаты требуемых объемов аэротенков при различных значениях рабочей дозы ила для Схемы 1 показаны на рисунке 2. Расчет предусматривал соответствие показателей по соедине-

ниям азота и фосфора на выходе из аэротенков требованиям ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения.

Первая гистограмма (рис. 2) – объем существующих аэротенков, в которых реализованы только процессы окисления органических загрязнений, рабочая доза активного ила в аэротенках $X_1=3$ г/л.

Наименее привлекательным и затратным вариантом является использование технологии химического удаления фосфора при базовой дозе ила 3 г/л (рис. 2, гистограмма 2). Этот подход чреват высокими капитальными и эксплуатационными затратами.

Гистограммы 3 и 4 (рис. 2) представляют более практичные с точки зрения затрат варианты, предусматривающие различную степень рабочей дозы ила (6 г/л и 8,4 г/л соответственно). Повышение рабочей дозы ила до 8,4 г/л позволяет остаться в существующих объемах аэротенков.

Теперь сделаем аналогичные расчеты для Схемы 2 с биологическим удалением фосфора. Результаты требуемых объемов аэротенков при

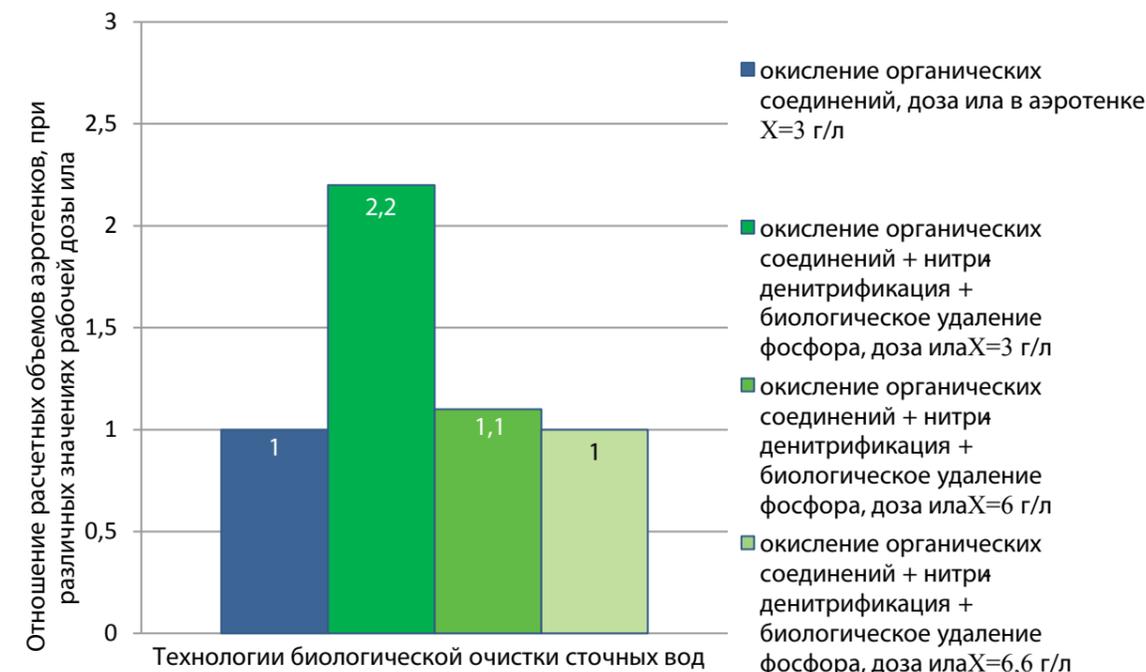


Рисунок 3
Отношения объемов аэротенков, реализующих технологии биологического удаления азота и биологического удаления фосфора, при различных значениях рабочей дозы активного ила в аэротенке.

различных значениях рабочей дозы ила в этом случае показаны на рисунке 3. Во всех случаях на выходе из аэротенков показатели по соединениям азота и фосфора соответствуют требованиям ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения.

По-прежнему, первая гистограмма (рис. 3) – объем существующих аэротенков, в которых реализованы только процессы окисления органических загрязнений, рабочая доза активного ила в аэротенках $X_1=3$ г/л.

Гистограммы 2-4 (рис. 3) иллюстрируют влияние изменения дозы активного ила на необходимый размер аэротенков.

При сравнении данных, представленных на рисунке 2 и рисунке 3, обращает на себя внимание возможность при прочих равных условиях остаться в существующих объемах аэротенков при варианте биологического удаления фосфора с дозой ила 6,6 г/л и при варианте химического удаления фосфора с дозой ила 8,4 г/л.

Результат является приятным сюрпризом для заказчика, демонстрируя возможность в объеме существующих аэротенков (нарастив

рабочую дозу активного ила до необходимой расчетной величины) реализовать необходимые биохимические процессы для достижения нормативов по биогенным элементам. Для этого необходимо:

- правильно «зонировать» существующие аэротенки, т.е. организовать анаэробные, аноксидные и аэробные зоны расчетных объемов;
- реализовать необходимые технологические рециклы расчетных расходов;
- реконструировать аэрационную систему (с применением управляемых воздуходувных установок для значительной экономии энергозатрат на аэрацию) для поддержания расчетной концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенков.

В этом случае капитальные затраты уменьшаются в разы (мы исключаем дорогостоящее строительство новых аэротенков), реконструкция приобретает разумные экономические параметры, результат реконструкции – очистка сточной воды от соединений азота и фосфора до законодательно требуемых значений.

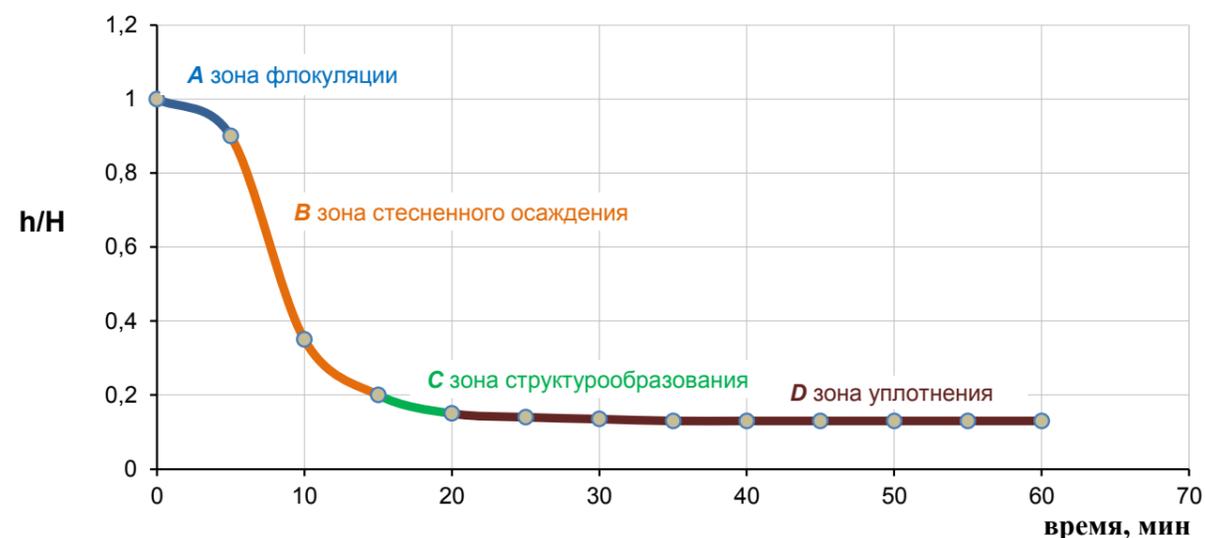


Рисунок 4
Осаждение активного ила в покое.

Все это так, но чудес, как правило, не бывает. Нет их и в этом случае. Реконструировав существующие аэротенки и в разы увеличив дозу ила в аэротенках, мы при этом в разы увеличиваем нагрузку на существующие вторичные отстойники, которые ответственны за показатели по БПК_{полн} и ВВ. В случае увеличения дозы активного ила в аэротенках с 3 г/л до 6 г/л, концентрации взвешенных веществ в очищенной воде на выходе из вторичных отстойников увеличатся с 8 мг/л (принятое в расчете) до 32 мг/л, а при увеличении дозы активного ила до 9 г/л, при эффективно работающей системе удаления ила из вторичных отстойников, до 70 мг/л. Соответственно, по взвешенным веществам и значениям БПК_{полн} на выходе, рассматриваемые качественные параметры очищенной воды будут в десятки раз больше требуемых.

Попробуем решить эту промежуточную проблему простым увеличением количества вторичных отстойников. Здесь необходимо отметить, что хорошо себя зарекомендовавшая Методика расчета вторичных отстойников, изложенная в СНиП 2.04.03-85, работает в диапазоне доз ила до 4,0 г/л, т.к. данная Методика представляет собой эмпирическую модель. При этом, данная модель не учитывает уровень заложения ила в отстойниках и не учитывает того, что активный ил

состоит из макро- и микрохлопков. Активный ил представляет собой смесь воды (99%), хлопков активного ила (0,5%) и минеральных или органических взвешенных веществ (0,5%).

При осветлении иловой смеси в градуированном цилиндре, уже после короткого промежутка времени, отчетливо видна грань между оседающим илом и осветляемой водой (рис. 4).

Процесс отстаивания начинается с коагуляции (фаза А – флокуляции) частиц активного ила. В этот момент границы раздела фаз практически не наблюдается. Затем наступает фаза В стесненного осаждения и граница раздела фаз уже видна отчетливо. В данной фазе макрочастицы активного ила осаждаются с постоянной скоростью, которая зависит от величины илового индекса и дозы активного ила, поступающего в отстойник.

В фазе С (фаза структурообразования) увеличивается концентрация макрочастиц, которые располагаются друг над другом, образуя пространственную структуру, в которой поры заполнены водой. При вытеснении из пор свободной жидкости происходит изменение структуры хлопков активного ила.

В фазе уплотнения D происходит процесс вытеснения связанной воды и при критической концентрации ила, изменение высоты слоя осадка не наблюдается.

Основное различие между контактным стационарным экспериментом и процессами, происходящими в реальных вторичных отстойниках – в снижении скорости илоотделения из-за циркуляции ила и движения потока. Независимо от конструкции сооружения, вертикальная скорость осаждаемых частиц $v_H = Q_{RS} / A_{SC}$. Отсюда результирующая скорость осаждения частиц в отстойнике представляет собой сумму вертикальной и гидравлической скоростей.

Разделение иловой смеси происходит по закономерностям процесса стесненного осаждения. Основная масса ила (макрохлопки) выпадает в осадок в течении 5...20 мин., и в этот момент отстойник работает как илонакопитель. В ходе процесса стесненного осаждения активного ила из слоя суспензии вымываются микрохлопки активного ила, концентрация которых, зависит от дозы активного ила X. Для процесса осаждения микрохлопков активного ила вторичный отстойник работает как осветлитель. При моделировании процессов илоотделения в натуральных сооружениях, базисным параметром расчета должны быть скорости осаждения макрохлопков активного ила $U_{o,F}$ и взвеси $U_{o,S}$ в реальных условиях. Скорости $U_{o,F}$ и $U_{o,S}$ представляют собой векторную сумму вертикальной составляющей турбулентности потока $\omega(v)$ и скоростей осадений макро- и микрохлопков активного ила в покое: $U_{o,F} = U_{o,F} - \omega(v)$, $U_{o,S} = U_{o,S} - \omega(v)$. Применение расчетов (модель OXID-SST), основанных на рассмотренной выше теории, позволило определить, что при увеличении дозы ила в аэротенках с 3 г/л до 6 г/л и обеспечении концентрации взвешенных веществ в очищенной воде 8 мг/л, необходимо увеличить объемы вторичных отстойников в 2,1 раза, а при дозе ила 9 г/л – в 3,2 раза.

Результат предсказуемо понятен – потратив значительные средства на строительство расчетного количества дополнительных вторичных отстойников (как альтернативу строительству дополнительных аэротенков), мы не достигнем требуемых показателей по БПК_{полн} без применения оборудования (сооружений) доочистки. К тому же, опыт специалистов по эксплуатации «классических» КОС говорит о том, что вторичные отстойники существенно «капризнее» в эксплуатации, чем аэротенки.

Тогда попробуем решать задачу «обратным способом», по-прежнему стараясь минимизировать масштабы строительства новых дополнительных резервуаров. Раз уж без дополнительных сооружений доочистки (до требуемых показателей по БПК_{полн} и ВВ) никак не обойтись, то нам надо рассчитать, до какой максимальной величины мы можем нарастить рабочую дозу ила в аэротенках (при существующих вторичных отстойниках), чтобы сооружения доочистки справились со своей задачей. После этого остается сопоставить стоимость необходимых сооружений доочистки с затратами на строительство новых резервуаров и определить «золотую середину» величины капитальных затрат на реконструкцию КОС.

Рассматривая присутствующее на рынке оборудование ответственных производителей для доочистки, мы обнаруживаем, что для решения нашей задачи – определения максимально возможной рабочей дозы ила в аэротенках – имеется принципиальное ограничение. Оно состоит в том, что для гарантированного достижения требуемых показателей по БПК_{полн} и ВВ на выходе из сооружений доочистки, на вход этих сооружений после вторичных отстойников должна поступать иловая смесь с показателем ВВ не более (это заявляется некоторыми производителями как максимально допустимое значение) 40 мг/л. Из этого показателя мы и будем исходить при расчетах максимально допустимого значения рабочей дозы ила в аэротенках и, соответственно, при определении расчетного значения требуемого объема аэротенков для биологического удаления соединений азота и следующих вариантов удаления фосфора:

- а) биологического удаления фосфора;
- б) химического (реагентного) удаления фосфора с подачей реагента перед первичными отстойниками или после вторичных отстойников (перед сооружениями доочистки);
- в) химического (реагентного) удаления фосфора с подачей реагента в поток возвратного активного ила (ВАИ) или непосредственно в аэротенк.

Результаты расчета требуемых объемов аэротенков при максимальной расчетной (X=6,7 г/л) рабочей дозе активного ила в аэротенках для разных технологий показаны на рисунке 5.

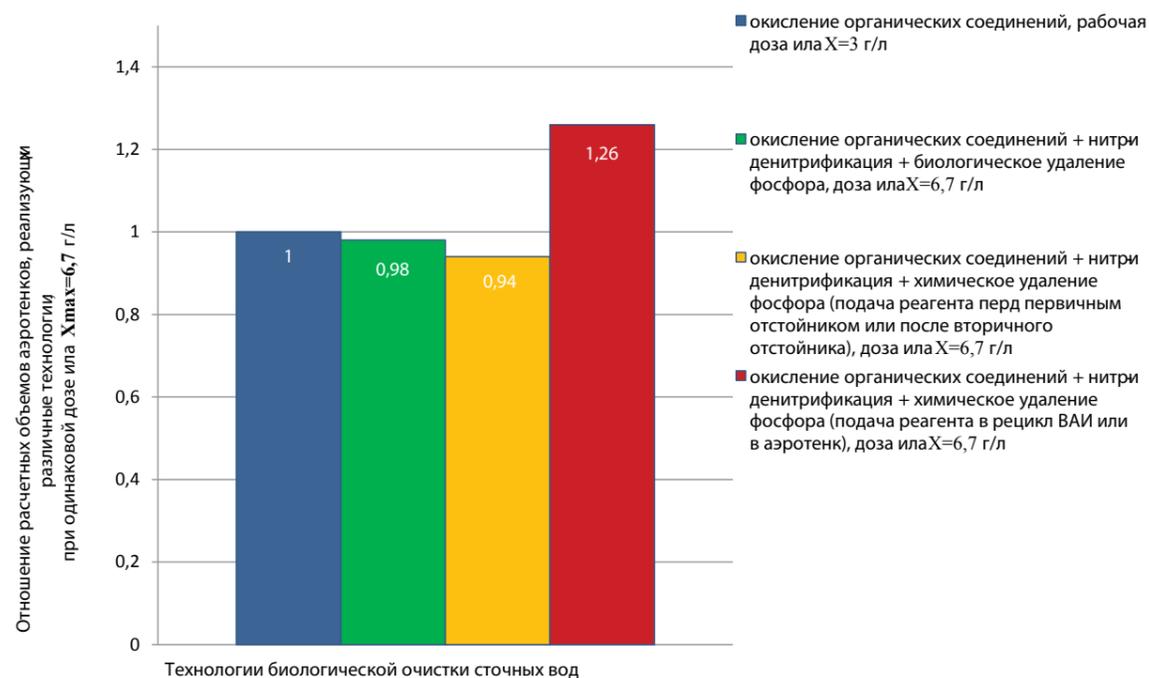


Рисунок 5

Соотношения объемов аэротенков, реализующих технологии биологического удаления соединений азота, и биологического или химического (при различных точках подачи реагента) удаления фосфора при максимальной расчетной рабочей дозе активного ила в аэротенках $X_{max} = 6,7$ г/л.

На выходе из аэротенков показатели по соединениям азота и фосфора соответствуют требованиям ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения. На выходе из существующих вторичных отстойников концентрация ВВ=40 мг/л.

По-прежнему, первая гистограмма (рис. 5) – объем существующих аэротенков, в которых реализованы только процессы окисления органических загрязнений, рабочая доза активного ила в аэротенках $X=3$ г/л.

Из анализа гистограмм 2-4 (рис. 5) видно, что наиболее привлекательными с точки зрения уменьшения капитальных затрат на строительство дополнительных аэротенков являются варианты с биологическим удалением фосфора и с химическим удалением фосфора с подачей реагента перед первичным отстойником или после вторичного отстойника.

Напомним весьма значимый сюрприз – при химическом (реагентном) удалении фосфора выбор точки ввода реагента принципиально влияет на величину расхода реагента. Для

рассматриваемых нами вариантов (b: – с подачей реагента перед первичными отстойниками или после вторичных отстойников (перед сооружениями доочистки) и c: – с подачей реагента в поток возвратного активного ила (ВАИ) или непосредственно в аэротенк) различие в расходе реагента составляет $K=b/c=1,67$.

А если говорить об абсолютной величине расхода реагента при варианте химического удаления фосфора, то для рассматриваемой нами задачи (начальные условия) и реализации варианта c: – с подачей реагента в поток возвратного активного ила (ВАИ) или непосредственно в аэротенк, расчетные значения таковы:

Применение оптимального по стоимости реагента – 40% раствора $FeCl_3$ – потребует его среднесуточного расхода $Q_{FeCl_3,d} = 1400$ л/сут. Что ежегодно для рассматриваемых нами КОС составит $Q_{FeCl_3,y} = 511$ м³/год. При текущей стоимости этого реагента на рынке порядка (оптовая стоимость, данные тендеров) 20 руб. за 1 л раствора, это внесет вклад в годовые эксплуатационные издержки КОС порядка

$S_{Pc} = 10$ млн. руб. Соответственно, при выборе варианта b: – с подачей реагента перед первичными отстойниками или после вторичных отстойников (перед сооружениями доочистки), все это возрастает до $Q_{FeCl_3,y} = 853$ м³/год и $S_{Pb} = 17$ млн. руб. Помимо этих финансово неприятных сюрпризов встает вопрос транспортировки химического реагента специализированной компанией, которая может работать с химическими веществами и иметь специальную инфраструктуру (автомобильные или ж/д цистерны) для транспортировки и хранения. Что, понятно, только повышает (и существенно) конечную стоимость реагента и ежегодные эксплуатационные издержки КОС. Для КОС большой производительности финансовые и организационные издержки возрастают линейно.

Для оптимизации планируемых капитальных и эксплуатационных затрат при реконструкции КОС с достижением требуемого уровня очистки сточных вод, необходимо учитывать следующее:

- в случае выбора схемы с химическим (реагентным) удалением фосфора и с минимально возможным (при химическом методе) расходом реагента необходимо строительство новых аэротенков;
- во всех аэротенках необходимо реализовать оптимальную для состава поступающих сточных вод технологическую схему удаления биогенных элементов. При этом в каждом аэротенке должны быть организованы необходимые технологические зоны (расчетных объемов) для реализации процессов биологического, химического или комбинированного удаления фосфора, денитрификации и нитрификации;
- необходимо организовать рециклы иловой смеси (расчетных расходов) между зонами аэротенков. Все рециклы иловой смеси рекомендуется осуществлять с помощью насосов (про эрлифты следует забыть) – для минимизации поступления растворенного кислорода в «безвоздушные» (анаэробные и аноксидные) технологические зоны;
- в анаэробной и аноксидной зонах аэротенков следует воздержаться от перемешивания иловой смеси с помощью воздуха. Необходимо использовать только мешалки для исключения присутствия растворенного кислорода в этих зонах аэротенков;

• в аэробных зонах аэротенков необходимо обеспечить расчетную концентрацию растворенного кислорода по всей длине аэробной зоны. Это достигается расчетным количеством аэраторов (с требуемым показателем SOTE) и использованием управляемых воздухоподводящих машин, что позволяет значительно сократить эксплуатационные энергозатраты на необходимую аэрацию иловой смеси, и поддерживать расчетную концентрацию растворенного кислорода по всей длине аэробной зоны аэротенка независимо от изменения температуры воздуха, колебаний расхода и качества поступающих сточных вод и пр.;

• необходимо строительство резервуара (или резервуаров – в зависимости от проекта) для размещения в нем расчетного количества оборудования доочистки (после существующих вторичных отстойников), т.е. оборудования микрофильтрации, например, барабанных, дисковых фильтров, или модульных самопромывных тканевых фильтров.

Это общий алгоритм реконструкции биологического блока КОС.

Напомним, что количество существующих вторичных отстойников не изменилось.

Из этого алгоритма хорошо видно, из каких основных составляющих складывается величина капитальных затрат на реконструкцию (биологического блока) КОС. Применение управляемых воздухоподводящих машин безальтернативно и окупается (по эксплуатационным энергозатратам) через 3-4 года.

Экономический баланс, или «золотую» середину, нужно искать между стоимостью строительства новых аэротенков (их количеством) и стоимостью оборудования доочистки, которое сможет гарантированно «отработать» повышенную дозу ила в аэротенках при неизменном количестве существующих вторичных отстойников.

Следует учитывать величину последующих эксплуатационных издержек при выборе метода удаления фосфора, затраты на химические реагенты ощутимы, а для КОС большой производительности они становятся одной из основных затратных статей эксплуатации КОС.

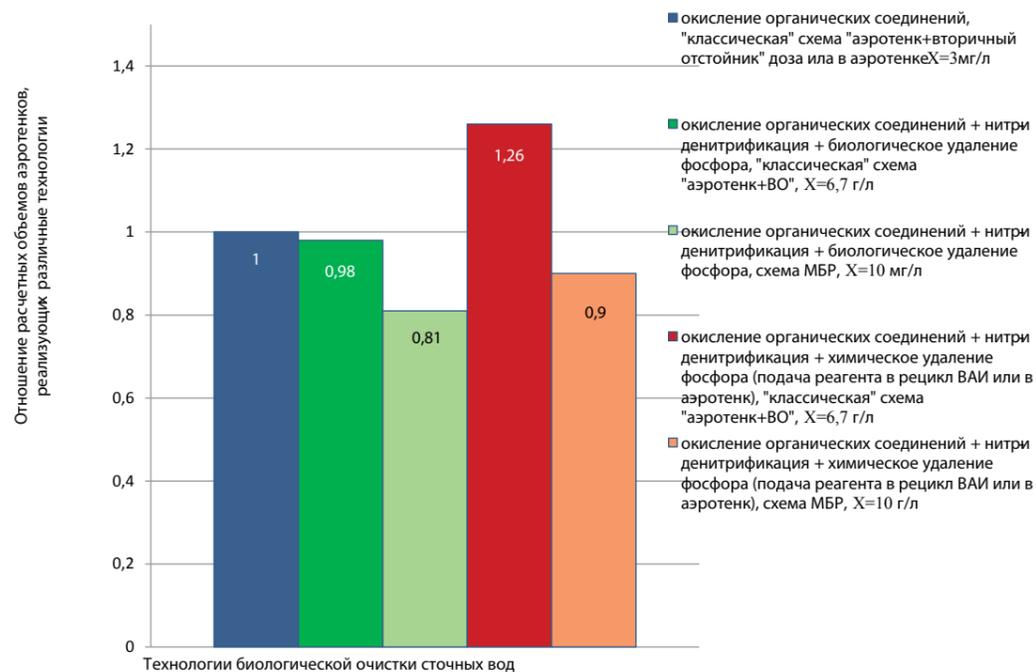


Рисунок 6
Отношения объемов аэротенков, реализующих технологии биологического удаления соединений азота, и биологического или химического удаления фосфора, при «классической» схеме «аэротенк + вторичный отстойник» и схеме МБР.

А теперь максимально усложним задачу реконструкции существующих КОС. Предположим, что нет свободной площади для строительства не только дополнительных аэротенков, но и резервуаров для оборудования доочистки, обработки осадка, обеззараживания и пр. В этом случае принципиально важно в периметре существующей площадки и в существующих объемах аэротенков достигнуть на выходе КОС качества очистки, удовлетворяющего современным требованиям.

Как мы убедились выше, при любых построениях биологического блока КОС по «классической» схеме – «аэротенки + вторичные отстойники + доочистка», это невозможно в принципе. Но – на этот раз приятный сюрприз – это становится возможным с применением технологии мембранного биореактора (т.н. МБР), которая схематично представляет собой совокупность аэротенка с высокой рабочей дозой активного ила (8-12 г/л) и блока с ультрафильтрационными мембранными модулями расчетной площади фильтрующей поверхности мембран для илоразделения.

Результаты требуемых объемов аэротенков для «классической» схемы и схемы МБР, показаны на рисунке 6.

Первая гистограмма (рис. 6) – объем существующих аэротенков, в которых реализованы только процессы окисления органических загрязнений, рабочая доза активного ила в аэротенках $X=3 \text{ г/л}$. Классическая схема построения биологического блока КОС – «аэротенки + вторичные отстойники».

Гистограммы 3 и 5 (рис. 6) – искомые решения, позволяющие обеспечить необходимый уровень очистки без строительства дополнительных сооружений и без использования вторичных отстойников. «Классическая» схема построения биологического блока КОС – «аэротенки + вторичные отстойники + доочистка» в этом случае трансформируется в схему «аэротенки + мембранное илоразделение» (при тех же требуемых показателях очистки на выходе).

Применив МБР, мы убиваем двух зайцев – избавляемся от вторичных отстойников (и их реконструкции или нового строительства) и от блока доочистки. При этом остаемся в объеме существующих аэротенков, а объем резервуаров для размещения мембранных модулей в разы меньше размеров (ставших ненужными) вторичных отстойников. Капитальные затраты немногим больше или сравнимы с п. 2. Но в этом случае

обратной стороной медали являются будущие эксплуатационные издержки, т.к. помимо дополнительных энергозатрат на аэрацию мембранного блока и расхода химических реагентов для плановой очистки мембранных модулей (что составляет лишь 2-4% от стоимости реагентов для химического удаления фосфора для всех технологических схем), необходимо будет учитывать затраты на замену мембран по истечении срока их эксплуатации. Ответственные производители качественных мембран гарантируют срок их службы (при штатной эксплуатации) порядка 8 лет.

Здесь «золотую» середину нужно искать между стоимостью расчетного количества (площади мембран) качественных мембранных модулей, будущими эксплуатационными издержками, – и отсутствием капитальных затрат на строительство и оборудование новых аэротенков, вторичных отстойников и оборудования доочистки.

Реализовав технологию МБР, мы гарантированно решаем задачу остаться при реконструкции КОС в размерах существующей строительной площадки КОС и достигнуть требуемого качества очистки.

Выводы

1. Реконструкция существующих КОС для достижения современных требований к качеству очистки требует реализации технологий удаления биогенных элементов. Сооружения биологической очистки должны реализовывать такие процессы как окисление органических соединений, нитрификацию, денитрификацию, биологическое или биолого-химическое удаление фосфора. Это невозможно сделать без принципиального изменения существующей технологической схемы биологической очистки, что влечет за собой значительные конструктивные изменения существующих КОС.

2. Простая реализация технологий удаления биогенных элементов, без увеличения технологической мощности (наращивания дозы активного ила) биореакторов (аэротенков), требует строительства дополнительных аэротенков.

3. Увеличение рабочей дозы активного ила в аэротенках позволяет значительно снизить капитальные затраты на строительство новых аэротенков, но ведет к «перегрузке» существующих вторичных отстойников. Строительство дополнительного количества вторичных отстойников технологически, экономически и эксплуатационно не оправдано. Требуются сооружения доочистки (микрофильтрации) для достижения требуемых значений по взвешенным веществам и БПК.

4. Экономический баланс основных капитальных затрат на реконструкцию биологического блока КОС лежит между стоимостью строительства дополнительных аэротенков и стоимостью необходимого оборудования доочистки.

5. Реализация технологии МБР позволяет исключить из схемы построения биологического блока КОС вторичные отстойники и сооружения доочистки. Не требуется строительства дополнительных аэротенков. Основная статья капитальных затрат на реконструкцию – стоимость мембранных модулей с расчетной площадью мембран, которые подлежат замене через каждые 10 лет штатной эксплуатации.

6. Принципиального снижения эксплуатационных издержек КОС можно добиться только:

- достижением требуемых показателей качества очистки (что минимизирует экологические платежи/штрафы);
- реализацией технологической схемы биологического удаления фосфора с дальнейшей грамотной и эффективной эксплуатацией этой схемы;
- внедрением управляемых воздухоудовных машин с адекватным сроком окупаемости, что значительно сокращает энергозатраты на аэрацию;
- внедрением адекватного по стоимости и эксплуатационному обслуживанию оборудования доочистки.

Литература:

1. Харькина О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод, изд. М., издательство «Панорама», 2015.
2. Мойжес О.В. Динамическая модель $OxID$ сооружений биологической очистки сточных вод, Водоснабжение и Санитарная Техника, 2008, №10.
3. Харьков С.В., Харькина О.В. Выбор корректного технико-экономического предложения: мифы и реальность, Вода Magazine, май 2016, №5 (105).