



Автоматизация и пусконаладка очистных сооружений с биологическим удалением азота и фосфора

Андрей Эпов, Марина Канунникова

Задачи установки контрольных приборов на сооружениях

В настоящий момент разработано и эксплуатируется на очистных сооружениях большой спектр приборов контроля. В принципе можно утверждать, что любой выбранный технологический параметр, характеризующий физическую или химическую величину, влияющую на процесс, может быть измерен в on-line режиме. Поэтому для выбора приборов важно определить основные типовые задачи их установки.

Для этого предлагается разделить задачи на три основные группы контроля:

Контроль поступающей воды.

Контроль поступающей воды, как правило, не используется для дальнейшей автоматизации технологических процессов, но занимает важное место в общей схеме контроля сооружений. Расчет всех основных технологических показателей работы сооружений ведется с использованием данных, получаемых в ходе контроля количества и качества поступающей воды.

Контроль технологических параметров процессов. Для этой группы количество и тип приборов полностью определяется задачами контроля технологического процесса и автоматического управления для его поддержания.

Контроль качества очищенной воды. Также, как правило, не используется при управлении технологическими процессами, но дает технологю дополнительную информацию о работе сооружений. Постоянный контроль качества очищенной воды позволяет выявлять наличие залповых выбросов в отдельные часы суток, приветствуется контролирующими органами и в ряде случаев имеет имиджовое значение для водоканалов.

Контроль поступающей воды

Для контроля и наладки биологических процессов удаления азота и фосфора важны:

- общая гидравлическая нагрузка и ее неравномерность;
- соотношение содержания орга-

Сооружения биологической очистки с совместным биологическим удалением азота и фосфора и вариантами данной технологии с добавлением реагентов или предварительной ацидофикацией приняты как основные наилучшие доступные технологии в представленном на широкое обсуждение справочнике по наилучшим доступным технологиям [1]. Нет сомнений, что внедрение данных технологий, уже происходящие на наиболее прогрессивных сооружениях очистки городских стоков, будет определять развитие сооружений биологической очистки в ближайшие 5-10 лет. Проведенный в ходе разработки справочника анализ работы более 200 станций очистки сточных вод [2] показал, что технологии совместного удаления азота и фосфора внедрены только на 10% рассмотренных сооружений и не всегда достигают проектных показателей. Это связано с недостаточным опытом в проектировании, последующей пусконаладке и контроле работы сооружений. При этом проектирование систем автоматизации, рассмотренное в [3], существенно влияет на стабильность очистки стоков, позволяет более качественно проводить пусконаладочные работы и облегчает процесс технологического контроля.

Целью данной статьи является рассмотрение основных возможностей оснащения современных сооружений очистки городских стоков приборами и автоматическим управлением, рассмотрение их роли в пусконаладке и последующем контроле сооружений.

Ключевые слова: фосфор, азот, биологическое удаление фосфора, наилучшие доступные технологии, автоматическое управление.

нических загрязнений азота и фосфора, которое определяет возможную эффективность биологического удаления биогенных элементов;

- температура стоков и pH, которые существенно влияют на нитрификацию;

- концентрация взвешенных веществ, влияющая на прирост и возраст ила;

- наличие залповых поступлений промстоков, которые способны нарушать процесс биологической очистки;

- токсичность воды, в первую очередь, для процесса нитрификации.

Основные параметры, которые можно контролировать в поступающей воде, представлены в таблице 1.

Таким образом, применяя современные приборы, можно проконтролировать все основные параметры в поступающей воде. Конкретная комплектация данной точки контроля за-

висит от размеров станции, наличия поступления промстоков, особенно залповых, особенностей режима эксплуатации сооружений.

Наиболее простым, практически обязательным составом системы контроля для небольших муниципальных очистных сооружений можно считать наличие расходомера, датчика измерения температуры и автоматического пробоотборника. В этом случае основные сведения о концентрациях и их соотношениях технолог получает по данным лабораторного анализа, причем имеется возможность анализировать как величины концентраций в среднесуточных пробах, так и отдельные величины в часовых пробах. Величина pH для городских стоков меняется в узком диапазоне и, как правило, не требует on-line измерения.

В случае, если на небольшие сооружения периодически поступают

Эпов Андрей Николаевич, главный технический специалист ООО «Домкопстрой». Россия, г. Москва, Проспект мира, д. 68, стр.3, этаж 6, офис 610. E-mail: epov@treatmentwater.ru

Канунникова Марина Александровна, кандидат технических наук, директор направления очистки воды ООО «Домкопстрой». Россия, г. Москва, Проспект мира, д. 68, стр.3, этаж 6, офис 610. E-mail: marina.kanunnickova2013@yandex.ru



промстоки с переменным значением рН и/или высокими концентрациями загрязнений (характерно для многих предприятий АПК, например молокозаводов), система контроля качества поступающей воды должна быть дополнена. Наиболее экономичным вариантом является установка датчика рН с его подключением к автоматическому пробоотборнику для отбора дополнительных проб в часы залповых поступлений. Такой вариант целесообразен, если поступление промстоков вызывает существенные изменения рН. Следующим вариантом является установка оптического датчика общего органического углерода ООУ, также с подключением к автоматическому пробоотборнику. В этом случае дополнительный отбор проб будет происходить при заданном превышении величины ООУ. Наиболее надежным вариантом является установка обоих датчиков, в этом случае технолог при пусконаладке и последующей эксплуатации выбирает показатель для дополнительного пробоотбора.

Такую систему, включающую расходомер, автоматический пробоотборник, датчик температуры, датчик рН и оптический датчик ООУ, с возможностью связи автоматического пробоотборника с одним из датчиков, можно рекомендовать для

сооружений средней производительности, на которые, как правило, поступают промстоки с нескольких предприятий. При этом система позволяет контролировать в автоматическом режиме гидравлическую нагрузку, нагрузку по органическим веществам, температуру и рН, залповые поступления промстоков, если они вызывают изменения рН и/или концентрации органических загрязнений, и проводить управляемый автоматизированный пробоотбор.

Если опыт многолетней эксплуатации показал, что величина рН меняется в узком диапазоне, то датчик рН может оказаться не рационален.

Для более крупных очистных сооружений производительностью от 50 до 200 тыс. м³/сутки система может дополняться ионселективным датчиком концентрации аммонийного азота. Кроме вышеперечисленных параметров в автоматическом режиме также контролируется соотношение азота и органических веществ, важное для прохождения процесса денитрификации, нагрузка по азоту и его залповые поступления. Однако при этом следует учитывать:

- ионселективные датчики обладают меньшей точностью, чем лабораторный анализ в силу наличия мешающего влияния других ионов;

- ООУ, измеряемое оптическим датчиком, характеризует изменения общего количества органических веществ, вызывающих поглощение света при длине волны 254 нм, а не величину БПК или биоокисляемого ХПК.

Поэтому для оптимальной эксплуатации такой системы контроля при пусконаладочных работах и в ходе дальнейшей эксплуатации технолог должен определить путем периодической тарировки погрешность измерения аммонийного азота (ни в коем случае не требуя полного совпадения лабораторных данных и показаний датчика) и корреляцию между ООУ и БПК или биоокисляемым ХПК. В этом случае он сможет удовлетворительно оценивать соотношение доступных для денитрификации органических веществ и азота, как по сезонам года, так и в течение суток.

Наиболее полной системой контроля качества поступающей сточной воды можно считать систему, включающую расходомер, датчик температуры, датчик рН, оптический датчик ООУ, проточный прибор определения концентрации азота аммонийного, проточный прибор определения концентрации фосфатов и автоматический пробоотборник с возможностью связи с одним из датчиков. Такая система предоставляет наибольшие доступные возможности для контроля ка-

■ Таблица 1. Основные параметры для контроля в поступающем стоке

№	Параметр	Приборы контроля	Стоимость	Сложность в эксплуатации	Применение
1	Расход	Расходомеры	Относительно невысокая	Несложная	Повсеместно
2	Температура	Датчики температуры	Невысокая	Несложная	Рекомендуется в большинстве проектов, но чаще измеряется вручную
3	рН	Датчики рН	Невысокая	Требуется периодическое обслуживание датчика	Рекомендуется в большинстве проектов, но измеряется только в присутствии большого количества промстоков
4	Общее содержание органических веществ	Оптические датчики ООУ Приборы ООУ на основе сжигания пробы	Относительно невысокая Высокая	Несложная Достаточно сложная	Небольшой опыт внедрения Не внедряются
5	Концентрация взвешенных веществ	Оптические датчики	Относительно невысокая	Несложная	Небольшой опыт внедрения
6	Азот аммонийный	Ионселективные датчики Проточные приборы химического анализа	Относительно невысокая Высокая	Требуется периодическое обслуживание датчика Достаточно сложная	Небольшой опыт внедрения Небольшой опыт внедрения
7	Фосфор фосфатов	Проточные приборы химического анализа	Высокая	Достаточно сложная	Небольшой опыт внедрения
8	Общая токсичность	Биосенсоры Проточные респирометры	Относительно невысокая Высокая	Достаточно сложная Сложная	Существуют на уровне разработок для отдельных объектов Отечественный опыт внедрения отсутствует
9	Отбор проб на все параметры	Автоматические пробоотборники	Относительно невысокая	Не сложная	Хороший опыт внедрения



чества поступающих стоков при использовании наиболее проверенных в эксплуатации приборов и использоваться только на сооружениях производительностью от 150 тыс. м³/сутки, где имеется хорошо оснащенная и квалифицированная служба КИПиА.

Рекомендовать в настоящий момент на городских сооружениях on-line измерение токсичности нерационально, так как подобные приборы практически являются индивидуальной разработкой. При наличии подозрения на токсичность поступающих стоков более рационально установить ее наличие респирометрическими или кинетическими тестами и связать с одним из измеряемых параметров.

В заключение надо отметить, что технолог при пусконаладке и эксплуатации сооружений обладает достаточно небольшим набором средств, которые он может задействовать по результатам контроля качества поступающей воды. Имеются следующие возможности влияния на процесс:

1. Увеличение или уменьшение возраста ила в соответствии с сезонными колебаниями температуры стоков.

2. Увеличение соотношения органических веществ к азоту путем уменьшения времени первичного отстаивания, уменьшения вывода сырого осадка с частичной ацидофикацией или дополнительной настройкой процесса ацидофикации, если сооружения изначально для этого предназначены.

3. Работа с абонентами водоканала с целью предупреждения нежелательных и залповых сбросов.

Контроль качества очищенной воды

Организация контроля качества очищенной воды также зависит от размеров и возможностей станции очистки стоков. Если расход стоков контролируется на входе сооружений, то минимальная комплектация данной точки контроля может включать только автоматический пробоотборник. Оснащение точки контроля очищенных стоков автоматическими пробоотборниками не только позволяет обеспечить адекватный отбор

среднесуточных проб, но и анализировать пробы, соответствующие часам максимума, когда возможны залповые выносы ила и повышения концентраций других веществ.

Поскольку вынос ила из вторичных отстойников наиболее характерное нарушение процесса очистки в часы максимума, то дополнительная установка оптического датчика концентрации взвешенных веществ с его подключением к автоматическому пробоотборнику для отбора в часы выноса является необходимым составом приборов контроля для станций небольшой и средней производительности от 50 до 200 тыс. м³/сутки.

Дополнением может служить оптический датчик ООУ (может совмещаться с датчиком взвешенных веществ) и оптический датчик концентрации азота нитратов. Расширение системы контроля с добавлением датчика ООУ особенно полезно при сбросе на сооружения промстоков, содержащих большое количество растворенной трудноокисляемой органики. Контроль ее концентрации в очищенной воде наглядно показывает влияние таких стоков на качество очистки и, как вариант, может служить методом для разумного нормирования их сбросов в горколлектора. Датчик концентрации нитратов является надежным средством, позволяющим судить о прохождении процессов денитрификации.

Наиболее дорогие системы, иногда называемые «станциями контроля качества очистки», включают контроль всех основных показателей в очищенной воде: взвешенные вещества, ООУ, азот нитратов, аммонийный азот, азот нитритов, фосфор фосфатов. Дополнение автоматического контроля проточными анализаторами существенно удорожает такие системы и требует квалифицированной эксплуатации. Поскольку получаемая информация не имеет большого технологического значения и не всегда принимается контролирующими органами, то создание таких систем можно рекомендовать только на крупнейших станциях очистки, где постоянный контроль может являться до-

полнительным средством доказательства хорошей работы сооружений, как для контролируемых органов, так и для экологической общественности. Аналогичное значение в настоящий момент имеют и различные on-line биотесты, поскольку влиять на токсичность очищенной воды для тест-объектов, характеризующих состояние природных водоемов путем изменения технологии очистки, практически невозможно, если соблюдаются все остальные требуемые показатели.

Контроль технологических параметров процессов биологического удаления азота и фосфора

Контроль эффективности удаления фосфора - контроль работы анаэробной зоны. Известно, что рост микроорганизмов фосфат-аккумуляторов определяется их конкурентным преимуществом, возникающим при чередовании анаэробных и аэробных и/или аноксидных условий. Именно способность микроорганизмов фосфат-аккумуляторов накапливать легкоокисляемую органику в анаэробных условиях, когда она недоступна для обычных гетеротрофов с ее последующим окислением в аэробных и/или аноксидных условиях, позволяет фосфат-аккумуляторам закрепляться в биоценозе. Удельная концентрация микроорганизмов фосфат аккумуляторов, и, следовательно, количество удаленного ими фосфора, пропорциональны количеству легкоокисляемой органики, потребленной ими в анаэробной зоне. Поэтому создание и поддержание анаэробных условий в предназначенной для этого зоне является основной задачей при пусконаладке и последующей эксплуатации сооружений с биологическим удалением фосфора.

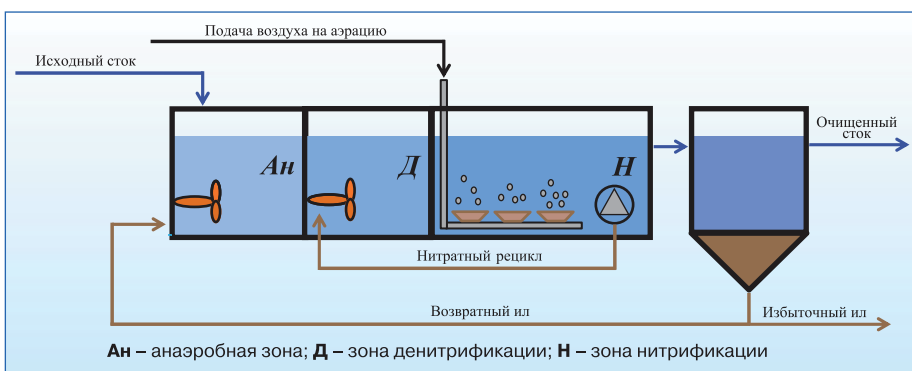
Для создания анаэробных условий необходимо отсутствие как связанного в нитратах, так и растворенного кислорода. При этом основной задачей является защита анаэробной зоны от поступления нитратов.

Защищенность анаэробной зоны от нитратов, поступающих с рециклом возвратного ила и те мероприятия, которые могут быть предприняты технологом для поддержания анаэробных условий зависят от принятого технологического процесса совместного биологического удаления азота и фосфора.

Рассмотрим процессы и возможности управления для поддержания анаэробных условий по возрастанию защищенности анаэробной зоны от воздействия нитратов.

A²/O-процесс (anaerobic/anoxic/oxic) - рис. 1. В данном процессе возвратный ил поступает непосредственно в анаэробную зону. Это случай наименее защищенной анаэробной зо-

Рис. 1. Процесс A²/O





■ **Таблица 2.** Показатели, характеризующие прохождение процесса для поддержания анаэробных условий

№	Параметр	Что характеризует	Недостатки измерения	Тип прибора	Стоимость и сложность в эксплуатации
1	Концентрация фосфатов	Количество потребленных в анаэробной зоне органических веществ	Зависит как от обеспечения анаэробных условий, так и от концентрации поступающих легкоокисляемых веществ	Проточный автоматический анализатор фосфатов	Высокая стоимость. Требуется грамотной эксплуатации
2	Концентрация нитратов	Показывает отсутствие или наличие нитратов	Потребление всех нитратов при денитрификации не гарантирует, что остался субстрат для фосфат-аккумуляторов	Оптический датчик нитратов	Средняя стоимость. Прост в эксплуатации
3	Окислительно-восстановительный потенциал	Показывает соотношение окислителей и восстановителей в среде	Без дополнительной тарировки показания они мало информативны для технолога	Датчик Eh	Низкая стоимость. Требуется периодической проверки, обслуживания или замены

ны от воздействия нитратов. Хотя такой процесс рекомендуется проектировать только при соотношении БПК₅ к азоту (более 4,5) [4], он часто внедряется при реконструкциях, так как требует минимальных переделок и оборудования. В такой технологии возникновение анаэробных условий обеспечивается после потребления всех поступивших нитратов в условиях денитрификации.

Для поддержания анаэробных условий в процессе А²/О технолог при наладке и последующей эксплуатации имеет наименьшее количество возможных воздействий на процесс:

1. Управление рециклом ила для уменьшения массы поступающих нитратов и увеличения времени пребывания в анаэробной зоне.

2. Достижение максимальной эффективности удаления нитратов в процессе денитрификации в последующих сооружениях.

3. Увеличение соотношения БПК₅ к азоту путем уменьшения времени первичного отстаивания или ацидофикации.

Управление рециклом ила в данном случае является наиболее эффективным методом при автоматизации процесса, так как достижение максимальной эффективности денитрификации является задачей управления денитрификацией, а включение/выключение первичных отстойников или изменение режима вывода сырого осадка, как правило, проводится технологом в ручном режиме.

Для реализации такого управления необходимо определять параметр управления и его целевую величину в анаэробной зоне и учитывать ограничения при управлении рециклом.

В анаэробной зоне можно определять три основные величины, которые характеризуют прохождение процесса для поддержания анаэробных условий - таблица 2.

Для качественного и экономичного контроля состояния анаэробной зоны в процессе А²/О наиболее рационально применять датчик окислительно-восстановительного потенциала. По его показаниям можно судить о потенциальном количестве восстановителя - органических веществ в отсутствие нитратов. Проблема в его использовании заключается в том, что показания датчика Eh мВ не подтверждают напрямую о наличии концентрации восстановителя и нитратов и поэтому часто непонятны технологу. Для наладки управления процессом по значению окислительно-восстановительного потенциала необходимо в процессе пуска наладки определить диапазон значений Eh, при котором наблюдается достаточное выделение фосфатов. Это можно сделать как непосредственно на действующих сооружениях путем корреляции поддерживаемого значения Eh и выделения фосфора в анаэробной зоне, так и в лабораторных условиях по результатам модифицированного фосфатного релиз-аптейк-теста при контроле Eh[5]. Значение концентрации фосфора, выделившегося в анаэробной зоне, чаще всего измеряют лабораторно. Установка прибора автоматического определения фосфатов возможна только на крупных станциях от 500 тыс. м³/сутки при оснащенной и квалифицированной службой КИПиА.

Ограничения управления рециклом ила можно разделить на технические, определяемые расход-напорной характеристикой насосов возвратного ила и их количеством и технологические. Технические ограничения, как правило, позволяют управлять расходом возвратного ила в достаточно широких пределах, изменяя его как минимум на 30-50%.

Основным технологическим ограничением является уровень стояния ила во вторичных отстойниках, увели-

чение которого при снижении коэффициента рециркуляции вызывает увеличение выноса ила и количества ила всплывающего во вторичных отстойниках в результате денитрификации. Таким образом, в процессе пуска наладки и эксплуатации технолог должен определить пределы регулирования рецикла ила по уровню его стояния и выносу ила.

Уровень стояния ила во вторичных отстойниках может определяться переносным или стационарным датчиком. Определение уровня переносным датчиком можно рекомендовать всем станциям очистки вод. Стационарные датчики являются достаточно дорогостоящим оборудованием и их имеет смысл устанавливать на наиболее крупных объектах или на одном из отстойников, используемом для отработки режимов на всей станции.

Оптимизация процесса денитрификации в представленной схеме достигается путем управления рециклом из конца нитрификатора в денитрификатор по датчику азота нитратов, расположенному в конце денитрификатора. При этом поддерживается кинетически оптимальная величина концентрации азота нитратов обычно в диапазоне 1-2 мг/л. Кинетически обоснованная величина концентрации азота нитратов в денитрификаторе зависит от влияния концентрации нитратов на скорость процесса денитрификации и в современных системах расчета определяется через K_{NO_3} - коэффициент полунасыщения скорости денитрификации по концентрации азота нитратов в многочленном уравнении Моно [8]. При этом кинетически обоснованная величина концентрации азота нитратов в идеальном смесителе составляет 4-5KN-О₃. Если концентрация нитратов больше данной величины, то общее удаление азота не увеличивается, несмотря на увеличение рецикла денитрификации. Если меньше, то



общее количество удаленного азота снижается из-за снижения скорости денитрификации и количества азота, поступающего с рециклом. Поскольку большинство аэротенков строится по коридорному типу и денитрификатор представляет собой сооружение переходного типа, кинетически обоснованная концентрация азота нитратов в конце денитрификатора может быть определена методами математического моделирования или установлена в ходе пусконаладочных работ. Для этого при наличии автоматического управления рециклом денитрификации технолог последовательно увеличивает уставку концентрации азота нитратов в конце денитрификатора от 1 мг/л до тех пор, пока общий эффект удаления азота не перестанет возрастать.

Йоханнесбургский процесс или JNB-процесс (Johannesburgprocess) и его модификации (рис. 2).

В данном процессе анаэробная зона дополнительно защищена путем введения денитрификатора возвратного ила, располагаемого перед анаэробной зоной. В простом процессе JNB в зону денитрификации поступает только возвратный ил, при этом денитрификация проходит медленно в условиях эндогенного дыхания. Эффективность удаления нитратов в основном достигается за счет более высокой дозы ила в возврате по сравнению с дозой ила в аэротенке. Модификации этого процесса заключаются в подаче части сточной воды в денитрификатор или организации рецикла иловой смеси в денитрификатор после анаэробной зоны.

Смысл подачи части воды в денитрификатор возвратного ила заключается в том, что для процесса удаления фосфора в анаэробной зоне используется только легкоокисляемая органика - около 30% ХПК, а для процесса денитрификации может использоваться вся биоокисляемая часть ХПК около 70%. То есть направляя часть стока в денитрификатор, используется максимум потенциала имеющихся в стоке органических веществ для денитрификации, а легкоокисляемая

органика, содержащаяся в стоке, направляемым в анаэробную зону, используется для роста фосфат-аккумуляторов. Такая схема удаления фосфора применяется в России и хорошо подходит для реконструкции сооружений с регенераторами и/или рассредоточенным впуском стоков.

Целевой функцией контроля поддержания анаэробных условий в процессе JNB является низкая концентрация азота нитратов в денитрификаторе ила. При этом измерение концентрации нитратов рекомендуется оптическим датчиком нитратов.

Для поддержания оптимальных условий в такой конфигурации процесса применимы все три, ранее представленных, технологических приема. При этом рецикл возвратного ила регулируется автоматически по датчику нитратов с учетом уже описанных ограничений.

В распоряжении технолога также добавляется оптимизация распределения стока. Предварительно количество стока, направляемого в денитрификатор, может быть рассчитано, исходя из того, что масса ХПК, поступающего со стоком, должна быть равна массе ХПК, необходимого для денитрификации азота в рецикле ила. С учетом того, что часть азота может денитрифицироваться в эндогенном режиме, для расчетов можно принять 5-6 мг ХПК на мг удаляемого азота. Исходя из баланса масс, соотношение подаваемого в денитрификатор и общего расхода стока может быть вычислено по формуле:

$$Qd/Q = (5,5 * C_{N-NO3} * Ri) / COD \quad (1),$$

где Qd - расход стока в денитрификатор, Q - расход всего поступающего стока, C_{N-NO3} - концентрация азота нитратов в возвратном иле, Ri - коэффициент рециркуляции, COD - ХПК поступающего стока.

Так, при коэффициенте рециркуляции 0,7, концентрации азота нитратов в возвратном иле 8 мг/л и ХПК=300 мг/л, в денитрификатор, в соответствии с формулой, надо подать 11 - 12% поступающего стока.

При пусконаладке и эксплуатации такой технологической схемы слож-

ность, как правило, заключается в том, что расход стока при его распределение на водосливах лотка поступающей воды практически невозможно измерить. Поэтому для оптимизации схемы технолог должен в ходе пусконаладочных работ сначала настроить схему автоматического управления рециклом ила, а затем путем постепенного открытия подачи воды в денитрификатор установить оптимальное распределение потока.

Другая модификация процесса JNB предусматривает рецикл иловой смеси после анаэробной зоны в начало денитрификатора ила. Смысл этой модификации заключается в том, что, во-первых, иловая смесь после анаэробной зоны содержит значительное количество биоокисляемой органики, а, во-вторых, органические вещества, потребленные микроорганизмами фосфат-аккумуляторами, также будут использоваться при денитрификации возвратного ила. По имеющимся данным обработки информации водоканалов такая схема сейчас в России не используется. Исходя из баланса масс, можно рекомендовать рециркулировать в денитрификатор ила от 20 до 50% от поступающего расхода.

При автоматизации процесса и пусконаладочных работах данная схема проще, чем распределение стока, так как позволяет в качестве дополнительного воздействия автоматическое управление по датчику нитратов рециклом иловой смеси в анаэробную зону.

Идея использования биоокисляемых органических веществ, оставшихся после анаэробной зоны и накопленных в ней фосфат-аккумуляторами, для ее защиты от нитратов получила дальнейшее развитие в процессах UCT, VIP, MUCT.

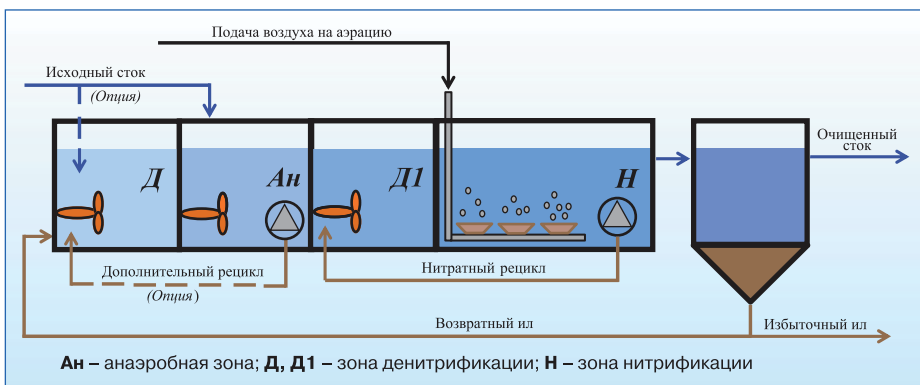
В процессах UCT- (University of Cape Town) и VIP- (Virginia Initiative Process) (рис. 3) возвратный активный ил поступает в зону денитрификации, куда также попадает иловая смесь из анаэробной зоны. Эта иловая смесь содержит как органические вещества, используемые для удаления азота нитратов, так и активный ил, содержащий микроорганизмы фосфат-аккумуляторы, уже накопившие внутриклеточные органические вещества, которые также используются при денитрификации.

В анаэробную зону направляется иловая смесь после денитрификатора, содержащая минимум нитратов.

Таким образом, в данных процессах достигается высокая защищенность анаэробной зоны от воздействия кислорода связанного при нитратах.

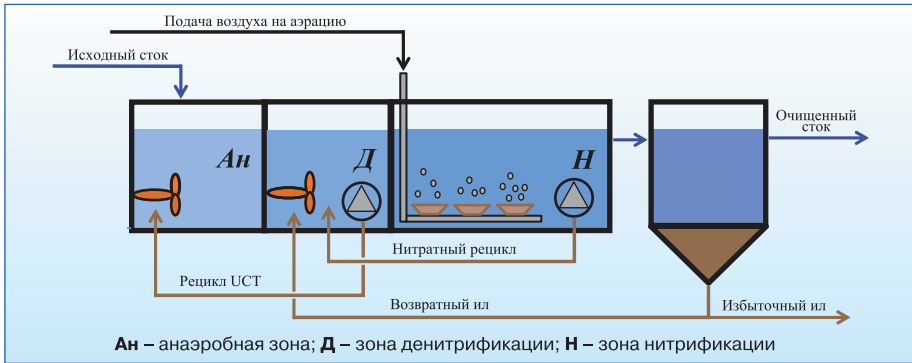
Для оптимизации удаления фосфора в этих процессах при автоматизации в первую очередь необходимо измерение концентрации азота нитратов в конце зоны денитрификации,

Рис. 2. Йоханнесбургский процесс или JNB-процесс (Johannesburgprocess) и его модификации





■ Рис. 3. Процесс UCT- (University of Cape Town) и VIP- (Virginia Initiative Process)



которое рекомендуется оптическим датчиком нитратов.

Наряду с увеличением соотношения органических веществ к азоту при пусконаладке и эксплуатации сооружений, использующим рассматриваемые процессы удаления азота и фосфора, также применяются:

- Оптимизация процесса денитрификации и концентрации азота нитратов в конце денитрификатора. В процессах, построенных по принципу UCT, достижение низких концентраций нитратов - на уровне около 1 мг/л обеспечивает одновременно как защиту анаэробной зоны, так и оптимальное прохождение процесса денитрификации. Поэтому управление рециклом денитрификации по датчику азота нитратов, расположенному в конце зоны денитрификации, является основным необходимым контуром управления как для оптимизации удаления фосфора, так и для оптимизации денитрификации.

- Оптимизация рецикла UCT дополнительно защищает анаэробную зону. Управление рециклом UCT оптимально осуществлять по датчику окислительно-восстановительного потенциала, как это ранее рассматривалось для процесса A^2/O .

Минимизация рецикла возвратного ила в данном случае имеет смысл только ради экономии энергии. При этом управление рециклом следует вести пропорционально поступающему расходу с ограничением по уровню стояния ила как это рассмотрено ранее. При управлении рециклом ила по концентрации азота нитратов в денитрификаторе возникает ситуация «двойного управления». В принципе автоматическое управление рециклом ила в этих схемах необязательно.

Наибольшая защита анаэробной зоны от воздействия связанного при нитратах кислорода достигается в процессах, построенных по технологии MUCT. Модифицированный UCT-процесс (modified UCT) (рис. 4) в отличие от ранее рассмотренного MUCT включает дополнительную зону денитрификации, куда поступает только возвратный активный ил и иловая смесь из анаэробной зоны.

Наряду с наилучшей защитой анаэробной зоны данная схема позволяет применить наибольшее количество воздействий для оптимизации и управления процессом:

- увеличение соотношения органических веществ к азоту;
- управление рециклом возвратного ила по датчику азота нитратов в зоне денитрификации ила;
- оптимизация процесса денитрификации путем управления нитратным рециклом по датчику нитратов в конце денитрификатора;
- оптимизация рецикла MUCT по датчику окислительно-восстановительного потенциала в анаэробной зоне.

Контроль процесса нитрификации. Для контроля нитрификации необходим оптимальный кислородный режим и возраст ила.

Концентрация растворенного кислорода, концентрация аммонийного азота и температура стока оказывают решающее влияние на скорость роста микроорганизмов нитрификаторов как первой, так второй фазы нитрификации. Также на скорость процесса влияют органические и неорганические ингибиторы.

Поскольку конечная концентрация аммонийного азота задана требованиями качества очистки и является целью управления, а на концентрации веществ, токсичных для нитрификации, можно влиять, только устраняя их сбросы, то для управления процессом нитрификации в условиях изменяющихся концентраций азота в поступающей воде и температуры, можно влиять только за счет кислородного режима и возраста ила.

Для аэротенка-смесителя задача поддержания кислородного режима теоретически означает автоматическое поддержание концентрации растворенного кислорода на уровне 4-5 K_{O_2} - коэффициента полу насыщения скорости реакции нитрификации по кислороду [6]. Обычно величина концентрации растворенного кислорода принимается 2 мг/л. При этом наличие надежных оптических датчиков концентрации растворенного кислорода и накопившийся опыт регулирования расхода воздуха делают под-

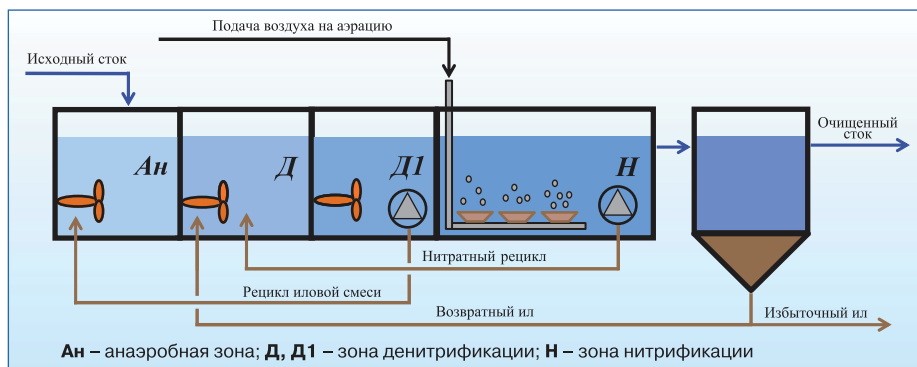
держания оптимального кислородного режима на первый взгляд несложным. Кроме того, задача поддержания оптимальных концентраций кислорода имеет большое экономическое значение и поэтому ставится как первоочередная на многих сооружениях. Однако реально большинство сооружений представляет собой аэротенки-вытеснители или аэротенки с переходным типом гидродинамики. В этих сооружениях скорость потребления кислорода существенно меняется по длине сооружения. В таких условиях задача автоматического управления концентрацией растворенного кислорода существенно усложняется и должна решаться как в процессе проектирования, так и в процессе пусконаладки и последующей эксплуатации.

В идеале проектирование аэрационной системы и системы автоматического управления поддержанием концентрации растворенного кислорода должно проводиться совместно. При этом, по технологическим соображениям, таким как возможное использование зон для оптимизации нитри-денитрификации, характер колебаний концентрации растворенного кислорода в течение суток, доля расхода воздуха, приходящаяся на рассматриваемый участок аэротенка выбирается, количество зон, в которых производится самостоятельное регулирование процесса подачи воздуха, и, следовательно, устанавливаются датчики кислорода, соответствующие вторичные приборы и электрофицированные задвижки. Внутри каждой зоны распределение воздуха приводится в соответствие с его расчетной скоростью потребления за счет изменения плотности раскладки аэраторов.

Также для определения эффективности регулирования и лучшей настройки его алгоритмов на стадии проектирования выбирается количество расходомеров, измеряющих расход воздуха.

Такое проектирование аэрационных систем и системы автоматики возможно на большинстве имеющихся в России сооружений, так как аэрационные системы в среднем служат 5-8 лет, а системы автоматического управления только начинают внедряться на сооружениях.

Однако для такого проектирования нужно применение расчетов, показывающих как распределение потребности в кислороде по длине аэротенка, так и колебания данной величины в течение суток. Практически для решения поставленной задачи подходят только методы математического моделирования. Но математическое моделирование в большинстве случаев не применяется по соображениям экономии средств при проектировании на средних и небольших,

**Рис. 4.** Модифицированный УСТ-процесс (modifiedUCT)

а в ряде случаев и на крупных станциях. Для этих случаев можно дать основные рекомендации по выбору зон для регулирования:

1. Зона с высокими скоростями потребления кислорода - 20-30% объема в начале аэробной зоны аэротенка. В этой зоне скорость потребления кислорода обусловлена потреблением легкоокисляемых органических соединений, гидролизуемой органики и нитрификацией. Характер колебания потребности кислорода в данной зоне существенно зависит от нагрузки по легкоокисляемым органическим соединениям. При этом данная зона может использоваться для оптимизации процесса нитри-денитрификации. Подлежит обязательному выделению при регулировании концентрации растворенного кислорода для последующей оптимизации процессов окисления и восстановления азота.

2. Основная зона аэротенка 50 - 60% объема. Здесь скорость потребления кислорода связана с окислением гидролизуемых органических веществ и нитрификацией. Регулирование концентрации кислорода в этой зоне обеспечивает поддержание скорости нитрификации и экономичный режим аэрации.

3. Зона с низкими, меняющимися в широком диапазоне скоростями потребления кислорода в конце аэротенка - около 20% объема. Здесь скорость потребления кислорода определяется эндогенным дыханием микроорганизмов гетеротрофов (или близка к эндогенному дыханию) и нитрификацией находящейся в стадии кинетического лимитирования по концентрации аммонийного азота. Регулирование концентраций кислорода в этой зоне часто невозможно в силу низких расходов воздуха, не обеспечивающих потребности перемешивания. Может регулироваться по алгоритму с ограничением минимального расхода на средних и крупных станциях.

Пусконаладка и дальнейшая эксплуатация систем автоматического управления концентрацией растворенного кислорода, выполненных с

учетом изменения потребности в кислороде по длине аэротенка в основном сводится к совместному уточнению алгоритма управления выполняемого технологом совместно с наладчиками системы автоматизации.

Если система аэрации и регулирования расхода воздуха выполнена без учета изменения потребности в воздухе по длине аэротенка, то перед технологом в ходе пусконаладочных работ при дальнейшей эксплуатации стоит задача максимально добиться оптимального распределения воздуха по длине аэротенка с помощью ручных задвижек системы аэрации и переносного кислородомера. Причем придется потратить немало времени на последовательное регулирование системы, выполняя замеры как в часы максимума, так и часы минимума, в основном приходящиеся на ночное время.

Регулирование возраста ила - процесс с медленным установлением конечного результата. Считается, что биоценоз активного ила приходит в новое псевдостационарное состояние за время, равное трем и более возрастам ила. То есть для аэробного возраста, лимитирующего рост наиболее медленно растущих микроорганизмов нитрификации за 11 - 30 суток в зависимости от температуры. Но при этом надо учитывать, что если скорость роста нитрификаторов меньше, чем обусловлено возрастом ила, их концентрация в биоценозе будет постоянно убывать вместе со скоростью нитрификации, а концентрация аммонийного азота в очищенной воде расти. Поэтому увеличение расчетного возраста ила с уменьшением температуры является необходимым условием поддержания концентрации микроорганизмов нитрификаторов в биоценозе активного ила. При этом надо учитывать, что в результате повышения общего возраста ила будет происходить более глубокое самоокисления-минерализации в иловую жидкость будет выделяться азот, содержащийся во всех микроорганизмах активного ила и взвешенных веществах, сорбированных илом, а также

фосфор, накопленный микроорганизмами фосфат-аккумуляторами. Это будет приводить к снижению эффективности удаления азота, требующегося для поддержания постоянной эффективности оптимизации процесса нитри-денитрификации и снижению эффективности удаления фосфора, которую придется поддерживать с помощью введения реагентов. Поэтому сезонное поддержание оптимального аэробного возраста ила является одной из непростых, но необходимых задач для технолога при наладке и эксплуатации сооружений, удаляющих азота и фосфор.

На рис. 5 представлены зависимости аэробного возраста ила, необходимого для процесса нитрификации от температуры в аэротенке по методике ATV[7] и М. Хенце [8]. Для использования представленных данных надо учитывать, что наименьшие величины соответствуют крупным станциям с минимальной неравномерностью по нагрузке и высокой скоростью роста микроорганизмов нитрификаторов при концентрации аммонийного азота в очищенной воде 1 мг/л, средние данные соответствуют высокой неравномерности по нагрузке и высокой скорости роста, максимальные данные для возраста ила соответствуют низкой скорости роста нитрификаторов при концентрациях аммонийного азота менее 0,4 мг/л.

Таким образом, для достижения существующих нормативов рекомендуется использовать кривую с максимальными значениями возраста. При низких температурах, когда достижение существующих требований становится мало возможным из-за нехватки объема сооружений, допускается пользоваться средними данными для возраста, и только в условиях необходимости поддержания процесса нитрификации без учета качества очистки в условиях нехватки объема кривой, дающей минимальные значения возраста ила.

При этом особенно на крупных станциях, желательно устанавливать оптимальный возраст ила по данным многолетней эксплуатации или экспериментальным путем.

Оптимизация процесса нитри-денитрификации. Исход из скоростей роста нитрификаторов в условиях хемостатной культуры показано, что при оптимизации возраста ила и кислородного режима биоценоз активного ила способен приспосабливаться как к низким, так и к высоким концентрациям азота в поступающей воде, если скорость изменения концентрации азота в поступающей воде в 2-3 раза меньше скорости роста микроорганизмов нитрификаторов [9]. Т.е. приспособление биоценоза активного ила к изменившейся концентрации



азота в поступающей воде требует от 8 до 21 суток.

Следовательно, технолог, ни при какой системе автоматики, не может, управляя кислородом и возрастом ила, добиться устранения колебаний концентраций азота аммонийного в очищенной воде, связанных с колебаниями нагрузки по азоту как в разные сутки одного месяца, так и тем более по часам суток. Поэтому для контроля суточных и часовых колебаний концентраций необходима возможность изменения объема нитрификатора, причем изменение объема желательнее автоматизировать. При всей, на первый взгляд, сложности и даже абсурдности данной задачи (практически невозможно включать и выключать дополнительные объемы аэротенка в зависимости от часовых колебаний) есть единственно возможный путь ее решения - оптимизация соотношения нитрификатора и денитрификатора.

Логика этого решения следующая: при увеличении объема нитрификатора за счет объема денитрификатора будет повышаться концентрация азота нитратов, в то время как концентрация азота аммонийного будет оставаться на заданном уровне. Если сооружения выполнены с запасом объема в стадии денитрификации, и в часы и сутки с минимальным содержанием азота в поступающей воде концентрация азота нитратов менее требуемой, то система автоматики оптимизации денитрификации справится с этим увеличением без изменения состояния процесса. Если остающийся объем денитрификатора недостаточен для удаления азота нитратов, то часть нитратов начнет попадать в анаэробную зону, при этом концентрация нитратов в очищенной воде будет оставаться на заданном уровне, но произойдет нарушение удаления фосфора, которое можно компенсировать увеличением подачи реагентов. Таким образом, изменяя соотношение объема нитрификации и денитрификации, а также дозирование реагентов можно поддерживать стабильное качество очистки при суточных и часовых колебаниях нагрузки.

Для достижения такого эффекта наряду с оптимизацией процессов нитри-денитрификации технолог должен ограничить управление рециклами, с которыми поступает азот нитратов в анаэробную зону. Т.е. назначить минимальную величину данных рециклов, которая обеспечивает защиту анаэробной зоны в режиме хорошей денитрификации и позволяет подавать часть азота нитратов при ограничении зоны денитрификации.

В зависимости от того как выполнен проект аэротенков имеются следующие возможности для изменения

соотношения объемов нитрификатора и денитрификатора:

- Изменение кислородных условий в начале аэробной зоны. Этот прием возможен для всех сооружений коридорного типа, если предусмотрено отдельное регулирование концентрации кислорода в этой зоне. Возможность такого регулирования обусловлена тем, что в начале аэробной зоны существуют высокие скорости потребления кислорода, и уменьшая расход воздуха, можно добиться низких, субнулевых концентраций кислорода, не нарушая условий перемешивания иловой смеси. Возможность прохождения процесса денитрификации в начале аэротенков доказана опытом многих станций, где процесс денитрификации проходит без специального оборудования в схемах, не предназначенных для его проведения.

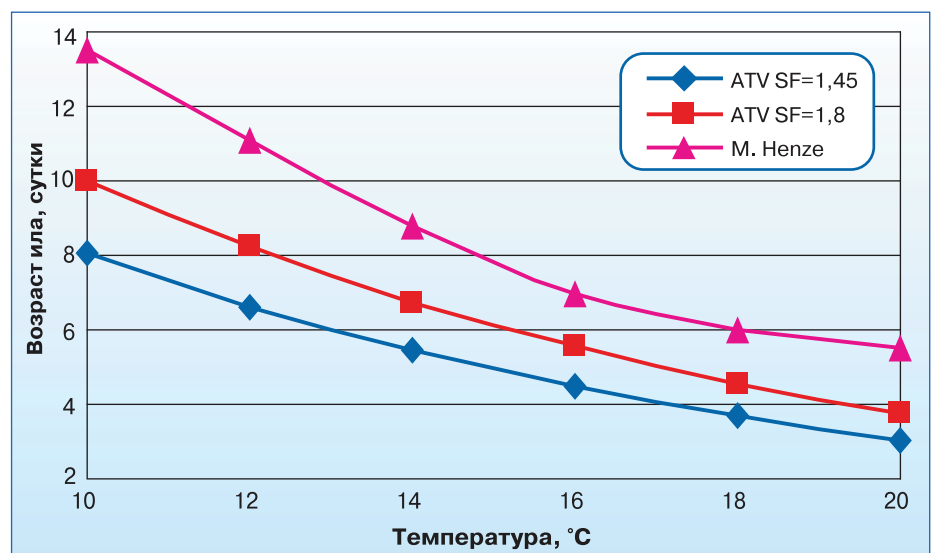
Для автоматического регулирования в этом случае необходимо двойное управление концентрацией кислорода как по датчику кислорода, так и по датчику аммонийного азота, располагаемому перед зоной с низкими скоростями процессов. Поскольку диапазон концентраций аммонийного азота в этой зоне находится на уровне 1-3 мг/л, то для измерения концентрации предпочтительно использовать проточные приборы измерения концентрации аммонийного азота. По превышению уставки концентрации аммонийного азота уставка регулирования концентрации растворенного кислорода увеличивается до отсутствия лимитирования, а при низких концентрациях аммонийного азота, наоборот, снижается до субнулевых концентраций. Таким образом, в условиях низких и средних нагрузок по азоту данная зона работает как денитрификатор (и ее объем в расчетах

должен учитываться как объем денитрификатора), а в условиях высоких нагрузок обеспечивает дополнительную нитрификацию. При пусконаладке и эксплуатации такой системы регулирования для технолога важно правильно задать уставки по аммонийному азоту и кислороду. Интересно, что такой метод регулирования может применяться и на станциях с частичной самопроизвольной денитрификацией для оптимизации данного процесса.

- Изменение соотношения объемов нитрификатора и денитрификатора за счет включения и выключения подачи воздуха в зоне с переменным режимом (зоне периодической аэрации). Наличие зоны с переменным режимом, располагаемой после основной зоны денитрификации перед аэробной зоной, верный прием при проектировании сооружений с удалением биогенных элементов, позволяющий осуществлять оптимизацию нитри-денитрификации. Регулирование в этой зоне строится по показаниям датчика аммонийного азота, находящегося в конце данной зоны и датчика растворенного кислорода. При достижении максимальной уставки по азоту аммонийному включается подача воздуха и поддерживается оптимальная концентрация кислорода, при достижении минимальной уставки по аммонийному азоту подача воздуха выключается. Высокие концентрации азота аммонийного в данной зоне, перед основной зоной нитрификации позволяют использовать ионселективные датчики концентрации азота аммонийного.

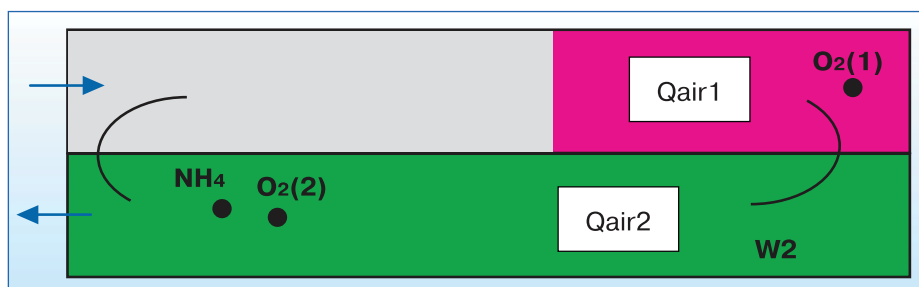
При пусконаладке и эксплуатации этой схемы технолог должен выбрать уставки минимальной и максимальной концентрации азота аммонийного так, чтобы в конце аэробной зоны

■ Рис. 5. Зависимость аэробного возраста ила, необходимого для процесса нитрификации от температуры в аэротенке по методике ATV и М. Хенце





■ **Рис. 6.** Оптимизация объемов зон нитри-денитрификатора в сооружении «карусельного» типа за счет регулирования подачи воздуха



достигалась необходимая степень нитрификации.

- Изменение соотношения зон нитри- и денитрификации в сооружениях «карусельного» типа за счет изменения зоны подачи воздуха. Если процесс нитри-денитрификации строится по «карусельному» принципу, то денитрификация начинается после потребления всего растворенного кислорода, подаваемого в начале зоны нитрификации. Если в сооружении предусматривается объем с возможностью отключения и включения подачи воздуха - (W_1 на рис. 6), то управление оптимизацией объемов нитри-денитрификатора происходит по следующему принципу:

Включение/выключение подачи воздуха (Q_{air1}) и поддержание оптимальной концентрации кислорода по датчику $O_2(1)$ происходит по концентрации аммонийного азота (NH_4), измеряемой в конце зоны нитрификации (W_2) как это было описано для зоны с периодической аэрацией. Расход воздуха во вторую постоянно аэрируемую часть «карусели» регулируется по второму датчику кислорода $O_2(2)$, установленному перед началом зоны денитрификации.

Следует отметить, что осуществление оптимизации нитри-денитрификации частично позволяет автоматически поддерживать необходимый аэробный возраст при изменении температуры. Снижение скорости нитрификации при снижении температуры приводит к повышению концентрации аммонийного азота и, следовательно, переводу регулируемых зон в аэробный режим, тем самым увеличивая общий объем аэроб-

ной зоны и аэробный возраст ила. Увеличение скорости нитрификации при повышении температуры, наоборот, приводит к снижению концентрации аммонийного азота и переводу регулируемых зон в режим денитрификации, уменьшая объем аэробной зоны и, следовательно, аэробный возраст ила.

Выводы

Установка приборов автоматического контроля на станциях очистки городских стоков выполняет три основные цели: контроль поступающей воды, контроль очищенной воды и автоматическое управление технологическими процессами.

Состав систем автоматического контроля, предназначенных для поступающей и очищенной воды, определяется наличием и характером поступления примоходов, производительностью станции, требованиями организаций, контролирующих качество очистки. При этом относительно недорогие системы способны обеспечивать решения основных задач.

Автоматизация управления сооружениями биологической очистки с внедрением процессов биологического удаления азота и фосфора решает следующие основные задачи:

- оптимизация процесса биологического удаления фосфора путем защиты анаэробной зоны от влияния нитратов;
- контроль процесса денитрификации путем автоматического поддержания оптимального количества нитратов поступающих в зону денитрификации;
- контроль процесса нитрификации путем автоматического контроля

кислородного режима и возраста ила; - стабилизация качества очищенной воды путем автоматизации оптимизации соотношения объемов нитри- и денитрификатора и управления дозированием реагента для удаления фосфора.

Состав системы автоматического управления биологическим удалением азота и фосфора, в первую очередь, зависит от выбранной технологической схемы конфигурации процесса.

Создание системы автоматического управления биологическим удалением азота и фосфора существенно влияет на возможность качественного проведения пусконаладочных работ и стабильность дальнейшей работы при эксплуатации сооружений.

Литература:

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов». Документ по стандартизации РФ. 2015 версия для открытого обсуждения.
2. Д.А. Данилович, А.Н. Эпов, М.А. Канунникова. «Применение основных технологий на сооружениях очистки сточных вод: анализ данных в целях технологического нормирования» НДТ выпуск №3-4, 2015.
3. А.Н. Эпов, М.А. Канунникова. «Разработка типовых решений по автоматизации процессов биологической очистки сточных вод с совместным удалением биогенных элементов». НДТ выпуск №3 2014.
4. «Technical Specifications for Anaerobic-Anoxic-Oxic Activated Sludge Process» HJ 576-2010. Национальный стандарт КНР.
5. P.M.J. JanassenK. Meinema H.F. van der Roest. «Biological Phosphorous Removal. Manual for design and operation» IWA Publishing 2002.
6. Эпов А.Н. Канунникова М.А. «Респиromетрическое определение кинетических коэффициентов уравнения скорости нитрификации». Водоснабжение и Канализация, 4-2009.
7. ATV-DVWK-A 131E, 2000
8. М. Хенце. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. Пер. с англ./ М. Хенце, П. Армозс, Й.Ля-Кур-Янсен, Э.Арван. - М.: Мир2004
9. М.А. Канунникова., А.Н. Эпов. «Использование возраста ила и скорости окисления при расчете процесса нитрификации» «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение», выпуск 6, 2015.

Automation and commissioning of WWTP with biological removal of nitrogen and phosphorus

The purpose of this article is to review the principal features of providing modern treatment facilities of urban wastewater instrumentation and automatic control, consideration of their role in the commissioning and subsequent control structures.

Keywords: phosphorus, nitrogen, biological phosphorus removal, the best available technology, automatic control.

Epov Andrey Nikolaevich, chief technical specialist of LLC «Domkopstroy». Russia, Moscow, Prospekt Mira, 68, building 3, floor 6, office 610. E-mail: epov@treatmentwater.ru

Kanunnikova Marina Alexandrovna, candidate of technical Sciences, Director of water treatment LLC «Domkopstroy». Russia, Moscow, Prospekt Mira, 68, building 3, floor 6, office 610. E-mail: marina.kanunnikova2013@yandex.ru