DOI 10.35776/VST.2021.04.03
УДК 628.35:661.5

Особенности очистки сточных вод больницы

М. М. Пукемо[1], А. А. Кулаков[2], Р. В. Желтухин[3]

М. М. Пукемо

А. А. Кулаков

Р. В. Желтухин

[1] *Пукемо Михаил Михайлович, кандидат технических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, член Экспертно-технологического совета РАВВ, председатель совета директоров Alta Group 115487, Россия, Москва, Нагатинская ул., 16, этаж 1, пом. X, ком. 24, тел.: +7 (985) 233-61-22, e-mail: 2336122@alta-group.ru*
[2] *Кулаков Артем Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, член Экспертно-технологического совета РАВВ 119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78, тел.: +7 (921) 534-58-48, e-mail: artem.a.kulakov@gmail.com*
[3] *Желтухин Роман Владимирович, старший инженер АСУ, Alta Group 115487, Россия, Москва, Нагатинская ул., 16, этаж 1, пом. X, ком. 24, тел.: +7 (926) 629-66-09, e-mail: r.zheltukhin@alta-group.ru*

При высоких концентрациях азотных соединений и низком содержании органических веществ в сточных водах денитрификация протекает не в полной мере, что приводит к высокому содержанию нитратов в очищенной воде. Описан опыт применения дополнительного субстрата для обеспечения денитрифицируемого азота нитратов требуемым органическим веществом. Выявлено глубокое угнетение биоценоза при высоких концентрациях хлорпроизводных в поступающих на очистку сточных водах. При концентрации общего хлора 5,4–6,8 мг/л процессы биологической очистки практически не протекали, а биопленка на поверхности загрузки не формировалась. Отмечено, что состав сточных вод больничного комплекса отличается низким содержанием органических веществ ($БПК_5$ в среднем 42,3 мг/л, ХПК в среднем 128,9 мг/л) при концентрации общего азота 43,4 мг/л. Экспериментально подтверждена эффективность применения сахарозы в качестве субстрата для денитрификации сточных вод больничного комплекса. Расход сахара составил 0,17 кг/м^3 при соотношении $БПК_5$/азот общий 0,95 в поступающих на очистку сточных водах.

Ключевые слова: очистные сооружения, сточные воды больницы, дополнительный субстрат, сахароза, денитрификация.

Features of hospital wastewater treatment

M. M. Pukemo[1], A. A. Kulakov[2], R. V. Zheltukhin[3]

[1] *Pukemo Mikhail, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Member of the Expert and Technological Council of RAWW, Chairman of the Board of Directors of Alta Group 1st floor, room X, office 24, 16 Nagatinskaia St., 115487, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (985) 233-61-22, e-mail: 2336122@alta-group.ru*
[2] *Kulakov Artem, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Member of the Expert and Technological Council of RAWW 78 Vernadskogo Ave., 119454, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (921) 534-58-48, e-mail: artem.a.kulakov@gmail.com*

[3] *Zheltukhin Roman, Senior ACS Engineer, Alta Group*
1st floor, room X, office 24, 16 Nagatinskaia St., 115487, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (926) 629-66-09,
e-mail: r.zheltukhin@alta-group.ru

At high concentrations of nitrogen compounds and low concentrations of organic substances in wastewater, the process of denitrification does not proceed in full, resulting in a high concentration of nitrates in the effluent. The experience of using an extra substrate to supply the denitrified nitrate nitrogen with the required organic matter is described. Deep suppression of biocenosis at high concentrations of chlorine derivatives in raw wastewater was revealed. At a total chlorine concentration of 5.4–6.8 mg/l, neither biological treatment processes proceeded, nor a biofilm formed on the media surface. It is noted that the composition of the hospital wastewater is characterized by a low concentration of organic matter (BOD_5 was on average 42.3 mg/l, COD – on average 128.9 mg/l) with a total nitrogen concentration of 43.4 mg/l. The effectiveness of using sucrose as a substrate for the denitrification of hospital wastewater has been experimentally confirmed. The sugar consumption was 0.17 kg/m^3 at the ratio of BOD_5/total nitrogen of 0.95 in the incoming wastewater.
Key words: treatment facilities, hospital wastewater, extra substrate, sucrose, denitrification.

Канализационные очистные сооружения с удалением азота проектируются с учетом глубокого окисления аммонийного азота (нитрификация) и восстановления образующегося нитратного азота (денитрификация). Однако состав поступающих на очистку сточных вод не всегда позволяет применять традиционные технологические решения по удалению азотных соединений. Высокие концентрации азота на входе в очистные сооружения при низких значениях ХПК и БПК (соотношение БПК/азот может достигать 1) являются проблемой для денитрификации. Подобным составом характеризуются сточные воды больничного комплекса.

Технологические решения

На этапе проектирования очистных сооружений больничного комплекса данных по фактическому составу сточных вод не было, поэтому были приняты стандартные для хозяйственно-бытовых стоков показатели согласно СП 32.13330.2012. Поправка была сделана на возможное наличие в поступающем потоке хлорсодержащих соединений.

Проектная производительность сооружений составила 1200 м^3/сут, предусмотрено шесть линий биологической очистки по 200 м^3/сут для возможности поэтапного запуска. Технологическая схема сооружений приведена на рис. 1.

Сточные воды от больницы подаются насосами на ступень механической очистки от крупных примесей и песка в комбинированную установку. Далее поступают в усреднитель с максимальным объемом 800 м^3 (рабочий уровень поддерживается автоматикой очистных сооружений на уровне 50% от общего объема усреднительного резервуара). В усреднительном резервуаре, при необходимости, обеспечивается снижение концентрации остаточного хлора, контроль за содержанием которого осуществляется автоматически в распределительной камере.

Усредненный поток сточных вод подается насосами с частотным приводом в распределительную камеру и разделяется на технологические

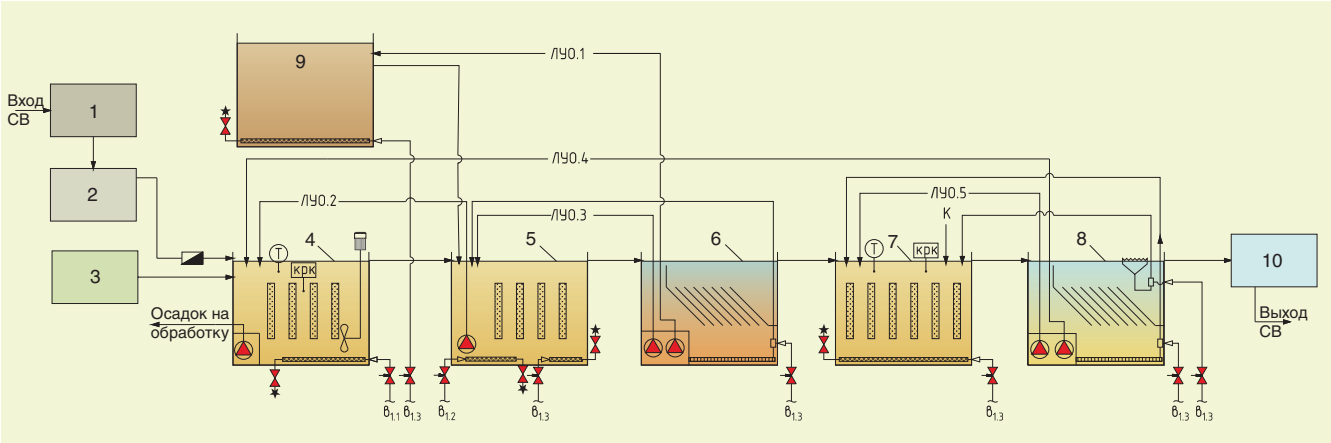

Рис. 1. Технологическая схема очистных сооружений
1 – механическая очистка; *2* – усреднение и распределение сточных вод; *3* – дополнительный субстрат; *4* – денитрификатор; *5* – аэротенк; *6* – вторичный отстойник первой ступени; *7* – аэробный биореактор; *8* – вторичный отстойник второй ступени; *9* – стабилизатор осадка; *10* – доочистка и обеззараживание сточных вод; *К* – коагулянт; подача воздуха: *в1.1* – периодически включаемая, *в1.2* – периодически выключаемая, *в1.3* – постоянная; *ЛУО* – линия удаления осадка; *Т* – датчик температуры; *КРК* – датчик растворенного кислорода

а) б)

Рис. 2. Биозагрузка
а – расположение в блоке; *б* – единичная кассета

линии биологической очистки. Контроль расхода сточных вод осуществляется автоматически на общем потоке от усреднительного резервуара и на входе в каждую технологическую линию.

Технологические линии биологической очистки включают две ступени. На первой ступени в режиме высокой нагрузки по органическим веществам обеспечивается денитрификация (аноксидный биореактор с мешалкой), а также окисление органических веществ (аэробный биореактор), на второй ступени – глубокая нитрификация (аэробный биореактор второй ступени). Для иммобилизации биопленки все биореакторы оснащены жестко закрепленной биозагрузкой, сблокированной в кассеты (рис. 2). Биоценоз очистных сооружений преимущественно представлен прикрепленной к материалу-носителю биопленкой.

Седиментация свободноплавающего биоценоза осуществляется во вторичных тонкослойных отстойниках первой и второй ступеней. В схеме предусмотрена рециркуляция нитратсодержащего потока из вторичного отстойника второй ступени в денитрификатор.

После биологической очистки сточные воды проходят доочистку на дисковых фильтрах и обеззараживаются УФ-лампами, после чего отводятся на сброс. Перед стадией обеззараживания предусмотрена дополнительная (опционально подключаемая) технологическая стадия сорбционной доочистки на напорных фильтрах, загруженных активированным углем. Эта стадия на данный момент эксплуатации не задействована.

На период пусконаладочных работ проектом предусмотрена возможность утилизации сточных вод, прошедших очистку и обеззараживание. Осадок очистных сооружений аэробно стабилизируется и обезвоживается на шнековых установках с предварительной обработкой флокулянтом. Образующиеся отбросы, песок и кек собираются в контейнеры и обеззараживаются товарным гипохлоритом натрия, после чего вывозятся для последующей утилизации.

Данные по фактическому объему технологических узлов одной линии и проектной продолжительности пребывания сточных вод в каждом узле приведены в табл. 1. Доля объема биозагрузки от объема реактора составляет 16%, удельная поверхность биозагрузки – 1993 м^2/м^3.

В ходе эксплуатации были выявлены не учтенные при проектировании особенности объекта, изменение которых уже не представлялось возможным:

низкая температура сточных вод и отсутствие способов ее корректировки;

поступление на очистные сооружения поверхностных сточных вод вместе с хозяйственно-бытовыми;

низкое содержание органических веществ при высоком содержании соединений азота в поступающих сточных водах.

В данной статье рассматриваются особенности эксплуатации построенных и запущенных

Таблица 1

Блок	Технологический узел	Объем, м^3	T^*, ч
1	Денитрификатор	18,3	2,2
2	Аэротенк	30	3,6
3	Вторичный отстойник первой ступени	15	1,8
4	Аэробный биореактор	73,3	8,8
5	Вторичный отстойник второй ступени	18,3	2,2
	Итого	154,9	18,6

* Продолжительность при проектном расходе на линию 200 м^3/сут (8,3 м^3/ч).

в работу очистных сооружений больничного комплекса, а также поиск методов решения выявленных проблем.

Характеристика поступающих сточных вод

Несмотря на имеющийся регулирующий резервуар, гидравлическая нагрузка на сооружения колеблется в широких пределах в связи с поступлением поверхностных сточных вод с территории больницы. Дождевые и талые воды влияют на расход сточных вод, поступающих на очистные сооружения, что также приводит к существенному снижению температуры стоков. Расход исходных сточных вод измерялся в постоянном режиме расходомером, колебания суточных расходов приведены на рис. 3.

В большую долю дней (59%) расход составлял от 160 до 250 м^3/сут, а в 85% случаев расход был менее 320 м^3/сут. Пикам соответствовал приток поверхностного стока в виде атмосферных осадков, а в сухую погоду расход сточных вод был стабилен и близок к средним значениям (200–230 м^3/сут).

Температура сточных вод (рис. 4) сильно коррелируется с температурой атмосферного воздуха и имеет низкие значения. Даже в летний период температура сточных вод редко поднималась выше +15 °С. При понижении температуры воздуха ниже +5 °С температура сточных вод понижалась до минимума (+7–8 °С). Предположительно, в зимний период температура поступающих на очистные сооружения сточных вод не поднимется выше +8 °С.

Направления интенсификации процессов очистки сточных вод при низких температурах будут рассматриваться в дальнейшем.

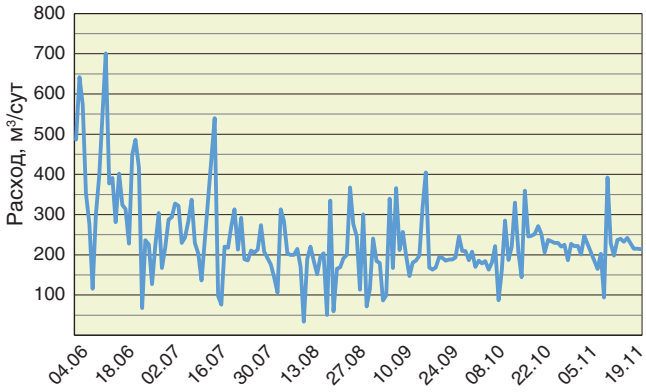

Рис. 3. Динамика расхода сточных вод

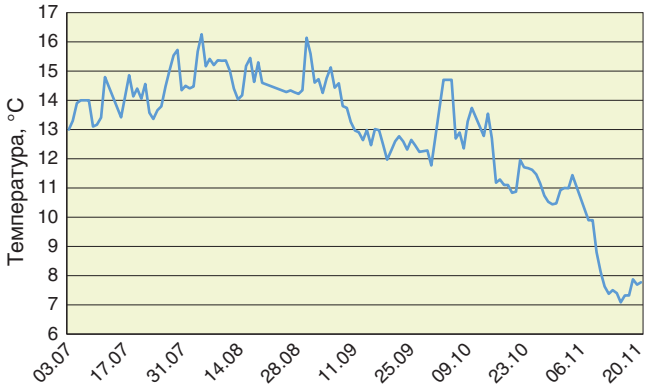

Рис. 4. Колебания температуры поступающих сточных вод

Фактический состав поступающих сточных вод значительно отличается от проектных значений. В табл. 2 приведены результаты обработки данных лабораторного контроля, включающие максимальные, минимальные и средние значения по каждому показателю, а также по каждому показателю для 15 и 85% проб (значения показателя при отбрасывании 15% проб с минимальными и максимальными значениями).

Таблица 2

Показатель	Значение				
	при доле проб без превышения		минимальное	среднее	максимальное
	15%	85%			
Водородный показатель	7,6	7,9	7	7,8	8,9
Взвешенные вещества, мг/л	22,1	66	4	48,4	140
$БПК_5$, мг/л	24,5	55	6,6	42,3	123
ХПК, мг/л	78,6	183,7	56	128,9	230
Азот общий, мг/л	33	54,2	7,7	43,4	74
Азот аммонийный, мг/л	21,6	41,4	5,7	31,2	62,1
ПАВ анионные, мг/л	0,9	1,9	1,2	12,3	27,9
$N_{общ}/N{-}NH_4$, доля	1,16	1,65	1	1,5	4,3
$ХПК/БПК_5$, доля	2,01	4,71	1,5	3,6	11,4
$БПК_5/ХПК$, доля	0,21	0,5	0,1	0,3	0,7
$БПК_5/N_{общ}$, доля	0,5	1,48	0,2	1,2	6,8

Фактически поступающие сточные воды отличаются низким соотношением $БПК_5$/азот общий (не превышает 1,48 в 85% проб), что не позволяет обеспечить надлежащую денитрификацию. Отмечается дефицит органического питания (субстрата) для денитрифицирующих бактерий, а также низкая доля легкоокисляемой органики в сточных водах (соотношение $БПК_5$/ХПК в среднем 0,3).

Содержание взвешенных веществ в исходных сточных водах минимально, жидкость немного мутная, что характерно для низкоконцентрированных сточных вод без включения отчетливо видимых плавающих частиц. Мусора и песка нет, поэтому предназначенные для их сбора контейнеры пусты в течение 6 месяцев эксплуатации. Крупный мусор отделяется в резервуаре насосной станции на территории больницы.

Еще одна характерная особенность сточных вод – высокое содержание хлорсодержащих соединений на первом этапе пусконаладочных работ. Резкий запах хлора распространялся от сточных вод при открытии технологических горловин и крышек обслуживания линии биологической очистки. Особенно резкий запах хлора наблюдался в регулирующем резервуаре.

Согласно [1], даже при содержании остаточного хлора 0,2 мг/л процессы потребления кислорода активным илом тормозятся на более чем 80%, что непосредственно сказывается на эффективности очистки. Согласно приложению 5 Правил холодного водоснабжения и водоотведения, содержание хлора и хлораминов в сточных водах, отводимых в системы централизованного водоотведения, не должно превышать 5 мг/л.

В отобранных пробах поступающих сточных вод содержание общего хлора составляло 5,4–6,8 мг/л, свободного (остаточного) хлора – 0,65–0,95 мг/л. В данных условиях биоценоз не мог нормально развиваться. Частично окислялись органические вещества (возможно, за счет хлора), процессы нитрификации не протекали должным образом. В рамках пусконаладочных работ концентрация хлорреагентов, дозируемых на территории больницы, была оптимизирована с целью достижения требуемых санитарно-эпидемиологических показателей без негативного влияния на биоценоз очистных сооружений.

После снижения содержания хлора в поступающих сточных водах начался активный рост биомассы, а процессы очистки по органическим соединениям и азоту активизировались. Работа биологических сооружений стабилизировалась, и был обеспечен определенный эффект по нитрификации сточных вод. Однако низкое содержание органического вещества в исходных стоках не позволило обеспечить требуемую степень денитрификации.

Еще одним фактором негативного влияния на биоценоз очистных сооружений больничного комплекса может являться остаточное содержание медикаментов в поступающих сточных водах. Данный вопрос на момент написания статьи не был исследован.

Дозирование дополнительного источника органики (субстрата) для денитрификации

Для удовлетворительного протекания процессов денитрификации в поступающих на биологическую очистку сточных водах должно соблюдаться определенное соотношение $БПК_5$ и азота общего. Удельный расход органических веществ по $БПК_{полн}$ при этом составляет 3,43 г/г $N–NO_3$ [2].

В литературе также рассматривается соотношение ХПК и азота общего с точки зрения обеспечения влияния его на процесс денитрификации. Согласно [3], для протекания денитрификации рекомендуемое соотношение ХПК/азот составляет 4–5 (для органического вещества сточных вод). Большинство отобранных проб поступающих на очистные сооружения сточных вод не соответствуют данным диапазонам значений ХПК, $БПК_5$ и азота общего.

Для стабильного протекания процессов денитрификации рекомендуется корректировать состав сточных вод при помощи дозирования дополнительного источника органики (субстрата). В качестве дополнительного источника углерода можно использовать метанол, этанол, уксусную кислоту, сточные воды пивных производств, сахарозу и др.

В мировой практике широкое применение нашел метанол, обладающий высокой эффективностью. Однако для защиты персонала (метанол – смертельный яд) его использовать не рекомендуется. Применение уксусной кислоты для данного объекта привело бы к критическому снижению pH, поэтому в качестве субстрата для дополнительного источника органики был выбран сахар. Проведен расчет потребности в субстрате по двум методикам.

Согласно [2], если значение $БПК_{полн}$ в исходной сточной воде окажется недостаточным для денитрификации, необходимо дозировать в аноксидную зону дополнительный легкоокисляемый органический субстрат – этанол, уксусную кислоту, глицерин и др. Доза дополни-

тельного субстрата, мг/л, определяется по формуле:

$$d_{доп} = \frac{1{,}2K_{БПК/N_{ден}}(N_{общ.вх} - N_{общ.вых} - N_{изб.ил})}{БПК_{доп}} - \frac{(БПК_{вх} - \Delta БПК_{анаэр})}{БПК_{доп}}, \quad (1)$$

где 1,2 – коэффициент запаса; $K_{БПК/N_{ден}}$ – удельный расход БПК на денитрификацию, равный 3,43 мг/мг $N–NO_3$; $N_{общ.вх}$ – концентрация азота общего (на входе в аэротенк), мг/л; $N_{общ.вых}$ – концентрация азота общего (после вторичных отстойников), мг/л; $N_{изб.ил}$ – удаление азота с избыточным илом, мг/л; $БПК_{доп}$ – удельное $БПК_{полн}$ дополнительного субстрата, мг/мг; $БПК_{вх}$ – $БПК_{полн}$ на входе в аэротенк, мг/л; $\Delta БПК_{анаэр}$ – расход $БПК_{полн}$ на удаление фосфора, мг/л.

Согласно [4], расчет потребности в субстрате осуществляется с учетом обеспечения органикой нитратного азота, требующего удаления. Концентрация нитратного азота, мг/л, подлежащего удалению, определяется по формуле:

$$C_{NO_3уд} = C_{N_{вх}ББО} - C_{N_{орг.вых.ф}} - C_{NH_4вых} - C_{NO_3вых} - X_N, \quad (2)$$

где $C_{N_{вх}ББО}$ – содержание азота общего в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, мг/л; $C_{N_{орг.вых.ф}}$ – концентрация органического азота в фильтрованной пробе очищенной воды, мг/л (для рассматриваемого объекта составляет 2–4 мг/л, в дальнейших расчетах принимается равным 2 как наиболее критическое значение); $C_{NH_4вых}$ – концентрация азота аммонийного в очищенной воде, мг/л; $C_{NO_3вых}$ – расчетная концентрация азота нитратного в очищенной воде (принимаем 8 мг/л, что на 1 мг/л ниже ПДК для обеспечения технологического резерва); X_N – концентрация азота, входящего в состав прироста биомассы (активного ила), мг/л (рекомендуется 0,045 от $C_{БПК_{вх}ББО}$); $C_{БПК_{вх}ББО}$ – концентрация $БПК_5$ в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, мг/л.

Доза добавляемого внешнего субстрата, мг/л, определяется исходя из величины азота $C_{NO_3доп}$, который не может быть удален с использованием органического вещества сточных вод:

$$C_{NO_3доп} = C_{NO_3уд} - 0{,}15C_{БПКден}, \quad (3)$$

где $C_{БПКден}$ – концентрация $БПК_5$, принимаемая для расчета денитрификации, мг/л; для рядов фактических данных принимаем, что $C_{БПК_{вх}ББО} = C_{БПКден}$; 0,15 – максимальное значение соотношения концентрации денитрифицируемого азота и $БПК_5$ в поступающей в аэротенк сточной воде, при котором весь азот может быть удален с использованием органического вещества сточных вод.

Количество добавляемого вместе с дополнительным субстратом ХПК принимается равным 5 мг/мг от величины $C_{NO_3доп}$. Расход субстрата $M_{суб}$, мг/л, с учетом его ХПК составит:

$$M_{суб} = \frac{5(C_{NвхББО} - C_{N_{орг}вых.ф} - 8{,}4 - 0{,}195C_{БПКвхББО})}{C_{ХПКсуб}}, \quad (4)$$

где $C_{ХПКсуб}$ – ХПК субстрата, кг/кг.

Параметры сахарозы составляют: ХПК = = 1,12 кг/кг, $БПК_{полн}$ = 0,59 кг/кг, $БПК_5$ = 0,49 кг/кг.

Из формул (2) и (3) выведем условие, при котором необходимо начинать дозировать внешний субстрат, приняв, что $C_{NO_3доп} = 0$, и получим, что минимальная величина $БПК_5$, мг/л, для денитрификации известного содержания азота на входе составит:

$$C_{БПКвхББО} = \frac{C_{NвхББО} - C_{N_{орг}вых.ф} - 8{,}4}{0{,}195}. \quad (5)$$

Потребность во внешнем субстрате определяется как соотношением $БПК_5$/азот общий, так и содержанием общего азота в исходной сточной воде. Для рядов возможных данных получим график потребности в субстрате в зависимости от пропорции $БПК_5$/азот общий и концентрации азота в исходной воде (рис. 5). Чем меньше содержится азота в сточных водах на входе в очистные сооружения (ниже требуемая величина его удаления), тем ниже пропорция $БПК_5$/азот, достаточная для денитрификации, и ниже порог необходимости дозирования субстрата.

Результаты исследования по дозированию внешнего источника субстрата

Для оценки эффективности применения сахара в качестве дополнительного субстрата для де-

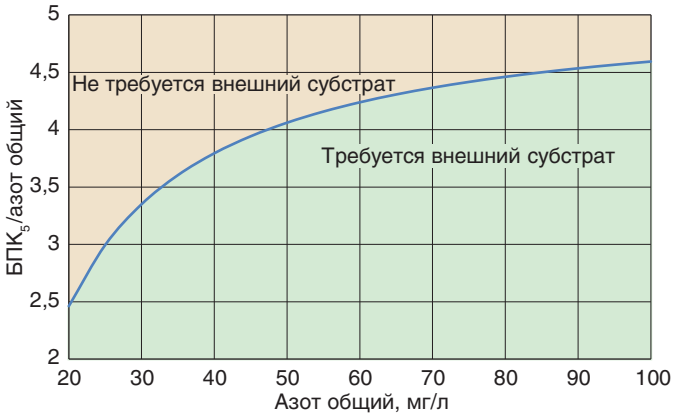

Рис. 5. Взаимосвязь минимального соотношения $БПК_5$/азот общий и содержания общего азота в поступающих сточных водах для обеспечения денитрификации без внешнего субстрата

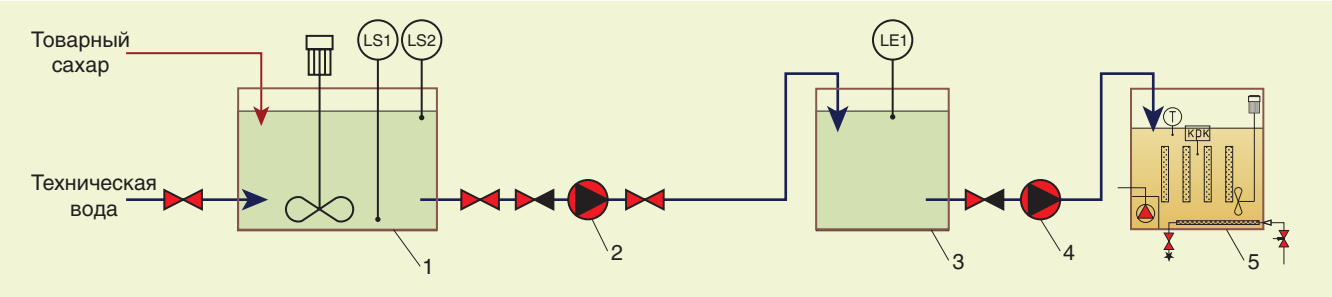

Рис. 6. Схема установки приготовления и дозирования субстрата
1 – растворный узел с мешалкой; *2* – насос перекачки раствора субстрата; *3* – расходная емкость; *4* – насос-дозатор; *5* – денитрификатор очистных сооружений

нитрификации сточных вод больничного комплекса проведены пилотные испытания. Оценивалась работа двух параллельно работающих технологических линий биологической очистки в условиях равной гидравлической нагрузки, но разной органической нагрузки по БПК: контрольная линия без дозирования субстрата; испытуемая линия с пилотной установкой дозирования раствора сахара в качестве дополнительного субстрата.

Пилотная установка по дозированию дополнительного субстрата

Установка для приготовления и дозирования субстрата (рис. 6) обеспечивает подготовку раствора субстрата (сахара) и его дозирование в денитрификатор испытуемой технологической линии.

Управление работой оборудования пилотной установки осуществляет контроллер, размещенный в отдельном шкафу управления. Оператор загружает в растворный узел требуемое количество товарного сахара, заполняет его технической водой и включает мешалку. После полного растворения сахара в технической воде раствор субстрата перекачивается насосом в расходную емкость, откуда субстрат дозируется в денитрификатор. Перекачка субстрата может проводиться как в ручном режиме, так и в автоматическом – по сигналам от дискретных емкостных датчиков уровня (LS1 и LS2) растворного узла и аналогового гидростатического датчика уровня (LE1) расходной емкости. Управление в ручном режиме осуществляется с лицевой панели шкафа управления пилотной установки (размещен на расходной емкости) или выносного пульта управления (размещен в непосредственной близости от растворного узла). Дублирование органов управления обусловлено тем, что растворный узел и расходная емкость размещены на значительном удалении друг от друга в различных местах очистных сооружений.

В установке используется насос-дозатор с цифровой системой управления и возможностью регулирования расхода внешним аналоговым сигналом. Контроллер установки несколько раз в минуту получает из АСУ очистных сооружений данные о расходе сточных вод через испытуемую линию, производит их усреднение с интервалом 15 минут, и на основе заданной дозы субстрата рассчитывает необходимый расход раствора субстрата и, соответственно, генерирует необходимый сигнал управления дозатором. Для повышения точности дозирования после монтажа пилотной установки было произведено тарирование дозатора непосредственно по месту размещения.

Результаты испытаний

Проведенные испытания показали, что дозирование субстрата в испытуемую линию обеспечивает технологический эффект в сравнении с контрольной линией по эффективности денитрификации.

При дозировании субстрата в аноксидном биореакторе испытуемой линии активно протекала денитрификация, что, наряду со снижением нитратов, подтверждалось снижением концентрации растворенного кислорода в денитрификаторе по сравнению с контрольной линией. Концентрация растворенного кислорода в период проведения эксперимента на контрольной линии изменялась от 0,5 до 3,5 мг/л, на испытуемой линии – от 0,1 до 0,5 мг/л.

По данным статистических рядов результатов анализа состава поступающих сточных вод определялась потребность во внешнем субстрате и рассчитывалась его доза (1 г сахара на 1 м^3 сточных вод). Далее вычисленная доза внешнего субстрата пересчитывалась с учетом показаний расходомера и определялся необходимый расход раствора субстрата (л/м^3).

Пример расчета необходимой дозы дополнительного субстрата. В ходе эксперимента: величина БПК$_5$ изменялась от 35 до 55 мг/л; содер-

Таблица 3

Точка	Показатель	Значение				
		минимальное	среднее	максимальное	при доле проб без превышения, %	
					15	85
Вход	Температура, °С	8,1	10,8	12,8	9,8	11,5
	Взвешенные вещества, мг/л	39	63	133	47,2	66,4
	$БПК_5$, мг/л	35	43,1	55	36,8	51,4
	ХПК, мг/л	74	154,8	200	89,7	191,4
	$N_{общ}$, мг/л	33	45,4	53	42	51,2
	$N–NH_4$, мг/л	30,2	39,7	44,8	37,7	44,2
	$БПК_5$/ХПК, доля	0,21	0,31	0,57	0,23	0,42
	$БПК_5/N_{общ}$, доля	0,8	0,99	1,21	0,81	1,2
Контрольная линия (выход)	$БПК_5$, мг/л	0,8	2,4	5,3	1,4	3,2
	ХПК, мг/л	20	28,9	35	25,4	32,3
	$N–NH_4$, мг/л	0,01	0,11	0,25	0,05	0,17
	$N–NO_2$, мг/л	0,01	0,03	0,08	0,01	0,05
	$N–NO_3$, мг/л	17,9	23,62	28,7	19,76	26,84
	$N_{общ}$, мг/л	18,18	23,75	28,72	19,94	26,9
Испытуемая линия (выход)	$БПК_5$, мг/л	0,7	2,9	6,4	1,5	4,4
	ХПК, мг/л	22	31,3	40	24,7	35,5
	$N–NH_4$, мг/л	0	0,28	0,8	0,08	0,48
	$N–NO_2$, мг/л	0,01	0,05	0,2	0,02	0,08
	$N–NO_3$, мг/л	11	14,6	20,5	11,19	16,6
	$N_{общ}$, мг/л	11,1	14,93	21,33	11,46	16,86

жание общего азота колебалось от 33 до 53 мг/л; соотношение $БПК_5$ к общему азоту составляло от 0,8 до 1,2; температура сточных вод постепенно снижалась вместе со снижением температуры воздуха и достигла минимума 8 °С.

Тем не менее в этих условиях на обеих технологических линиях протекал процесс глубокой нитрификации, содержание азота аммонийного было близко к нулю. Содержание нитратного азота на контрольной линии редко опускалось ниже 20 мг/л и постоянно превышало показания на испытуемой линии (большинство проб было ниже 17 мг/л). На испытуемой линии в период стабильной работы с максимальной эффективностью очистки содержание нитратного азота составляло 11–12 мг/л. Сумма трех показателей по азотной группе (аммонийного, нитритного и нитратного; общий азот не определялся) в очищенных сточных водах для испытуемой линии была ниже, чем для контрольной линии в среднем на 10–13 мг/л.

Доза субстрата увеличивалась в рамках эксперимента для плавного роста массовой нагрузки на биоценоз испытуемой линии. Оптимальное значение дозы дополнительного субстрата составило 0,17 кг/м^3, при котором достигалась максимальная степень денитрификации, что соответствует концентрациям, полученным расчетным путем по приведенному выше алгоритму [формулы (1) – (5)] и примеру расчета (приведен ниже). Данные экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

Сокращение дозы хлорреагентов при обеззараживании сточных вод на территории больницы и дозирование дополнительного субстрата ускоряли рост биопленки (рис. 7). Образовавшийся устойчивый слой биомассы позволил обеспечить стабильное окисление органических веществ, глубокую нитрификацию и денитрификацию (при дозировании субстрата) при меняющейся гидравлической и органической нагрузке.

После дозирования субстрата на испытуемой линии (в сравнении с контрольной линией) отмечено обильное пенообразование в аэробных биореакторах (рис. 8). Пена белого цвета характерна для высокого содержания сложно окисляемых и жестких ПАВ (моющих средств) в сточных водах [5]. Усиление пенообразования могло быть связано с параллельной дополнительной органи-

а) б)

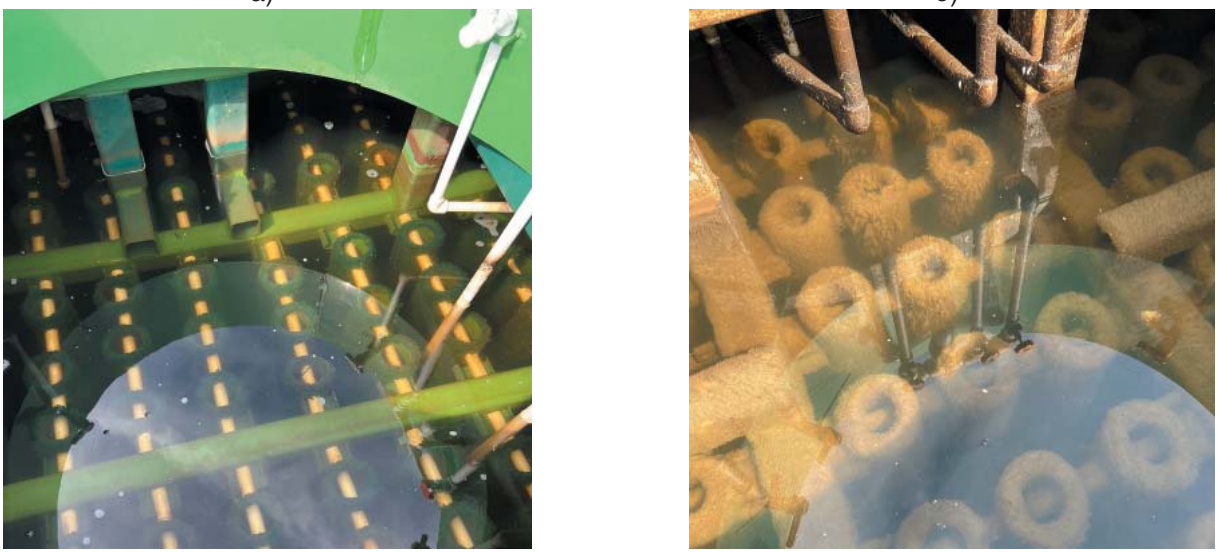

Рис. 7. Биомасса на поверхности биозагрузки
а – при высоком содержании хлора в исходной воде биомассы практически нет; *б* – после снижения негативного влияния хлора обильный устойчивый слой биопленки

а) б)

Рис. 8. Пенообразование в биореакторах
а – контрольная линия; *б* – пилотная линия (с субстратом)

ческой нагрузкой на биоценоз испытуемой линии, что могло снизить степень окисления ПАВ. Данный фактор следует учитывать при проектировании и эксплуатации, предусматривая решения по ликвидации последствий возможного интенсивного пенообразования. В сооружениях больничного комплекса образующаяся пена накапливается в технологических горловинах под крышками, не попадает во вторичный отстойник и не разносится по территории очистных сооружений.

Пример расчета расхода раствора субстрата (сахара). Алгоритм расчета потребности в растворе субстрата следующий.

1. Задаем исходные данные: расход сточных вод 320 м^3/сут, общий азот 55 мг/л (85% проб), БПК$_{5,1}$ 55 мг/л (15% проб), БПК$_{5,2}$ 25 мг/л (15% проб, самая сложная ситуация при минимуме субстрата сточных вод).

2. Определяем концентрацию азота нитратов, требующую внешнего субстрата, по формулам (2) и (3).

3. Определяем тип субстрата (сахар), задаем концентрацию в нем ХПК ($C_{ХПКсуб}$ = 1,12 кгХПК/кг) и БПК$_{полн}$ (БПК$_{доп}$ = 0,59 кгБПК$_{полн}$/кг).

4. Находим по формулам (1) и (4) расход субстрата.

5. Задаем концентрацию раствора субстрата и определяем по справочным данным плотность раствора. Принимаем раствор сахара $C_{суб\%}$ = 30% с плотностью $\rho_{суб}$ = 1,127 т/м^3.

6. Находим удельный расход раствора субстрата $q_{суб}$, л/м^3.

7. Находим расход раствора субстрата $Q_{суб}$, л/сут.

Результаты расчета расхода раствора субстрата (для расхода сточных вод 320 м^3/сут) по формулам (1) и (4) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатель	Согласно [2]		Согласно [4]	
	1*	2**	1*	2**
Расход сточных вод, $м^3$/сут	320	320	320	320
$БПК_5$ (вход), мг/л	55	25	55	25
$БПК_{полн}$ (вход), мг/л	66	30	66	30
Азот общий, мг/л	55	55	55	55
Азот нитратов (требуется субстрат), мг/л	–	–	33,9	39,7
ХПК в растворе, г/л	378,7			
$БПК_{полн}$ в растворе, г/л	198,8			
Сахар в растворе, г/л	338,1			
Расход субстрата, г/$м^3$	146,8	208	151,2	177,3
Удельный расход раствора, л/$м^3$	0,434	0,615	0,399	0,468
Расход субстрата, л/сут	138,9	196,8	127,8	149,9

* Для 85% проб по азоту и БПК.
** Для минимального значения БПК (в 15% проб) при содержании азота в 85% проб.

Выводы

1. Результаты проведенных исследований работы сооружений очистки сточных вод больничного комплекса показали, что поступающий сток отличается сложным составом. Отмечено низкое содержание органических веществ, особенно легкоокисляемых (соотношение $БПК_5$/ХПК в среднем 0,3). В 85% проб соотношение $БПК_5$/азот общий не превышает 1,48, что не обеспечивает процесс денитрификации.
2. Подтверждено угнетение биоценоза очистных сооружений повышенным содержанием хлора (остаточного от хлорреагентов на территории больницы) в поступающих сточных водах на первом этапе пусконаладочных работ. Концентрация общего хлора составляла 5,4–6,8 мг/л, свободного (остаточного) хлора – 0,65–0,95 мг/л. До оптимизации дозы хлорреагентов биологическая очистка не осуществлялась.
3. Экспериментально подтверждена достаточно высокая эффективность использования сахара в качестве дополнительного субстрата для денитрификации в сточных водах с низким содержанием органических веществ. Сумма трех форм азота (аммонийного, нитритного и нитратного; общий азот не определялся) в очищенных сточных водах пилотной технологической линии ниже в среднем на 10–13 мг/л, чем контрольной. Для исследованных сточных вод (средние значения $БПК_5$ 43,1 мг/л, $N_{общ}$ 45,4 мг/л) получена оптимальная доза дополнительного субстрата (сахара) 0,17 кг/$м^3$.
4. Получена расчетная зависимость требуемого минимального соотношения $БПК_5$/азот общий (обеспеченности азота органическим веществом) от содержания азота общего для обеспечения денитрификации без внешнего субстрата.
5. Сформулирован алгоритм расчета и управления дозированием субстрата в зависимости от параметров (расход, БПК, азот) поступающих сточных вод. Получена кривая зависимости минимального соотношения $БПК_5$/азот общий от концентрации азота общего в поступающих сточных водах для обеспечения денитрификации без внешнего субстрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
2. Швецов В. Н., Морозова К. М., Степанов С. В. Расчет сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод в аэротенках с удалением биогенных элементов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 9. С. 26–39.
3. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод: Перевод с английского. – М.: Мир, 2009. 480 с.
4. Данилович Д. А., Эпов А. Н. Расчет и технологическое проектирование процессов и сооружений удаления азота и фосфора из городских сточных вод. – М., 2020. 225 с.
5. Жмур Н. С. Анализ причин развития и методы подавления нитчатого вспухания активного ила и пенообразования. Часть 1 // Водоснабжение и канализация. 2011. № 1–2. С. 94–106.

REFERENCES

1. Zhmur N. S. *Tehnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniiakh s aerotenkami* [Technological and biochemical processes of wastewater treatment at the facilities with aeration tanks. Moscow, AKVAROS Publ., 2003, 512 p.].
2. Shvetsov V. N., Morozova K. M., Stepanov S. V. [Designing facilities for municipal and industrial wastewater biological treatment in aeration tanks with nutrients removal]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2018, no. 9, pp. 26–39. (In Russian).
3. Henze M., Harremoes P., La Cour Jansen J., Arvin E. *Ochistka stochnykh vod* [Wastewater treatment. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 2009, 480 p.].
4. Danilovich D. A., Epov A. N. *Raschet i tekhnologicheskoe proektirovanie protsessov i sooruzhenii udaleniia azota i fosfora iz gorodskikh stochnykh vod* [Calculation and technologic design of the processes and facilities for removing nitrogen and phosphorus from municipal wastewater. Moscow, 2020, 225 p.].
5. Zhmur N. S. [Analysis of the causes of filamentous bulking and foaming of activated sludge and methods of suppression. Part 1]. *Vodosnabzhenie i Kanalizatsiia*, 2011, no. 1–2, pp. 94–106. (In Russian).