

СТАТЬИ

УДК 556:681.5:519.6:628.3
DOI 10.17513/use.38290

**ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД
И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ
(НА ПРИМЕРЕ Г. МИРНЫЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ))**

Бebikhov Ю.В., Семёнов А.С., Подкаменный Ю.А., Якушев И.А.

Политехнический институт (филиал)

*ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Мирный,
e-mail: bebikhov.yura@mail.ru, sash-alex@yandex.ru, mirniy.yuriy@mail.ru, yakushevilya@mail.ru*

В настоящее время множество канализационных очистных сооружений как по всей России, так и на территории Республики Саха (Якутия) находятся в процессе модернизации или даже реконструкции. Это происходит не только по причинам морального износа устаревшего оборудования и необходимости увеличения производительности в связи с внутренней миграцией населения, но и в какой-то степени из-за изменения культуры быта и поведения человека – появились загрязнения в виде крупных частиц – остатков средств личной гигиены. Исходя из вышеизложенного, модернизация технологического процесса биологической очистки сточных вод на примере канализационных очистных сооружений г. Мирный Республики Саха (Якутия) является актуальной задачей. Поскольку сточные воды, прошедшие очистку на канализационных очистных сооружениях г. Мирный, сбрасываются в р. Ирелях, они должны соответствовать показателям характеристик нормативно допустимого сброса в водные объекты очищенных сточных вод, которые согласно недавно внесенным изменениям (СП 32.13330.2018) были ужесточены. В работе были определены фактические среднесуточные показатели расхода сточных вод за трехлетний период, среднее значение которых составило 15858 м³/сутки. Также был произведен анализ показателей качества состава сточных вод на входе канализационных очистных сооружений за трехлетний период, среди которых стоит выделить: биологическое потребление кислорода, взвешенные вещества, фосфаты, азот аммонийный, азот нитратный. Выявлены отрицательные значения показателей по концентрации на входе и выходе очистных сооружений за полугодовой период (март – август). Ни по одному из показателей качества состава сточных вод не достигается 100% эффективности очистки, а превышение уровня допустимых норм составляло от 66,5 до 180%. По результатам проведенных исследований была предложена технология очистки сточных вод путем нитриденитрификации, предусматривающая глубокое биологическое удаление азота и фосфора, а также ферментацию в первичных отстойниках.

Ключевые слова: канализационные очистные сооружения, сточные воды, процесс нитриденитрификации, показатели характеристик эффективности, концентрации загрязняющих веществ

**ASSESSMENT OF WASTEWATER QUALITY INDICATORS
AND MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS
BIOLOGICAL PURIFICATION (BY THE EXAMPLE OF THE CITY
OF MIRNY OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))**

Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Podkamenny Yu.A., Yakushev I.A.

Polytechnic Institute (branch) Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny,

e-mail: bebikhov.yura@mail.ru, sash-alex@yandex.ru, mirniy.yuriy@mail.ru, yakushevilya@mail.ru

Currently, many sewer treatment facilities, both throughout Russia and in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) are in the process of modernization or even reconstruction. These processes occur not only for the reasons for the moral wear of obsolete equipment and the need to increase productivity due to internal migration of the population, but to some extent due to a change in the culture of life and human behavior with the appearance of varieties of pollution in the form of large particles-remnants personal hygiene. Based on the foregoing, the modernization of the technological process of biological wastewater treatment using the example of sewer treatment facilities of the city of Sakha (Yakutia) is an urgent task. Since the wastewater that has undergone cleaning at the sewer treatment plants of the city of peaceful are dumped in the river Irelyakh, they must comply with the indicators of the characteristics of the normative-permanent discharge into water bodies of purified wastewater, which, according to the recently made changes (SP 32.13330.2018) were tightened. In the work, the actual average daily wastewater flow rate for a three-year period, the average value of which was 15858 m³/day. The quality of the composition of wastewater at the entrance of sewer treatment plants for a three-year period was also analyzed, among which it is worth highlighting: biological oxygen consumption, suspended substances, phosphates, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen. The negative values of the indicators were revealed by the concentration at the input and output of treatment facilities for a half-year period (March-August). None of the indicators of the quality of the composition of wastewater is 100% cleaning efficiency, and the exceeding the level of permissible norms was from 66.5 to 180%. Based on the results of the studies, the technology of wastewater purification was proposed by nitrification-denitrification, which provides for deep biological removal of nitrogen and phosphorus, as well as pre-fermentation in primary sumps.

Keywords: sewage treatment plants, wastewater, performance characteristics, nitrification-denitrification process, concentration of pollutants

Введение

В настоящее время в России большое количество канализационных очистных сооружений (КОС) находится в процессе модернизации или реконструкции [1–3]. Предпосылками для этого являются следующие факторы: увеличение производительности станций; физический износ устаревшего оборудования; нарастающее содержание загрязняющих веществ в сточных водах; применение современной химической продукции в бытовых условиях; изменение культурных привычек и образа жизни человека; остатки средств личной гигиены и др. [4–7].

Рассмотрим существующую технологию очистки сточных вод на примере КОС г. Мирный. Сточные воды поступают на очистные сооружения по самотечному коллектору Ø500 мм, а также нескольким напорным трубопроводам меньшего диаметра (3 Ø150 мм и Ø350 мм) в резервуар первой насосной станции [7]. Стоки, поступающие по коллектору Ø500 мм, проходят предварительную очистку на автоматизированных решетках, что обеспечивает защиту насосов. В насосной станции приемного резервуара установлены три насоса производительностью 950 м³/ч каждый. Сток автоматически перекачивается одним или двумя рабочими насосами, резервный насос срабатывает при аварии одного из рабочих. Для предотвращения образования осадка предусмотрено ежесуточное перемешивание всего объема воды в резервуаре первой насосной станции. Перемешивание производится автоматизированной мешалкой ежесуточно по достижении заданного уровня стока в емкости, в течение 15 мин. Далее стоки двумя напорными трубопроводами Ø500 направляются на автоматизированные процеживающие ступенчатые решетки. Мусор с решеток поступает на шнековый пресс, где происходит его обезвоживание и уплотнение. После решеток по самотечной линии поток направляется единым коллектором на две рабочие песколовки. Песколовки оборудованы тонкослойными модулями и автоматизированной системой разгрузки и выгрузки осадочного песка. Система автоматизированных решеток тонкой очистки и автоматизированных песколовки с тонкослойными модулями обеспечивает необходимое качество стока для его дальнейшей биологической очистки. Из песколовки сток самотеком по одному трубопроводу попадает в резервуар второй насосной

станции. Вторая насосная станция расположена в здании производственного корпуса и состоит из четырех насосов (два рабочих и два резервных) с соответствующей запорной арматурой и системой взмучивания осадка в приемном резервуаре. Работают насосы поочередно при низких расходах и одновременно при максимальных расходах поступающих сточных вод. Взмучивание осадка в резервуаре насосной станции обеспечивается гидросмывом с подачей воды от напорных линий насосов. Для учета расходов сточных вод, поступающих на биологическую очистку, на напорных трубопроводах установлены датчики расходомеров [8]. Дренажные воды в насосной станции собираются в канал и отводятся в центральный дренажный приямок корпуса биологической очистки. Сточные воды перекачивают в камеру пропорционального разделения стока. Далее сточные воды попадают в блок емкостей биологической очистки, где и происходит их дальнейшая очистка, процесс которой является объектом данного исследования [8–12].

В связи с тем, что существующая технология очистки сточных вод КОС г. Мирный была разработана в 2004 г., а также в связи с ужесточением требований к сбросу очищенных сточных вод в водные объекты, **целью настоящего исследования** станет модернизация технологического процесса биологической очистки сточных вод на примере г. Мирный Республики Саха (Якутия).

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проанализированы утвержденные допустимые концентрации нормативно допустимого сброса в водные объекты;
- произведен анализ их соответствия за три года;
- приведены графики фактического качества сточных вод на входе сооружений за три года;
- приведены средние значения анализа качества очистки сточных вод на входе-выходе очистных сооружений за март – август;
- представлены инновационные методы процесса биологической очистки, предлагаемые к внедрению на КОС г. Мирный.

Материалы и методы исследования

Сточные воды, прошедшие очистку на КОС г. Мирный, сбрасываются в р. Ирелях. Утверждены допустимые концентрации нормативно допустимого сброса по СП 32.13330.2018.

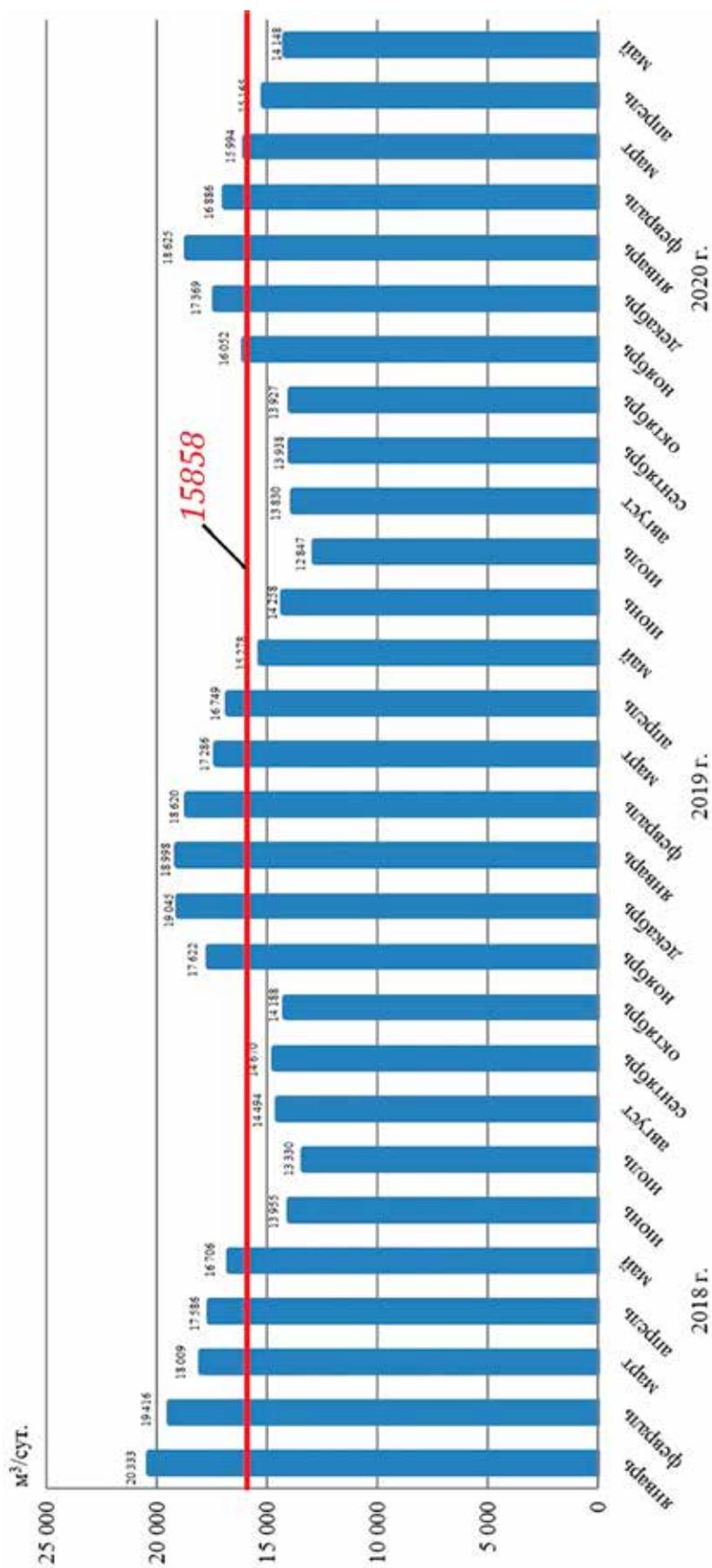


Рис. 1. График фактического среднесуточного расхода сточных вод за три года

Утвержденные допустимые концентрации имеют следующие значения: взвешенные вещества – 9,85 мг/л; биологическое потребление кислорода полное (БПК_{полн.}) – 3,05 мг/л; биологическое потребление кислорода за 5 дней (БПК₅) – 8,0 мг/л; химическое потребление кислорода (ХПК) – 50,5 мг/л; сухой остаток – 536 мг/л; хлорид-ион – 106,7 мг/л; сульфат-ион – 73,2 мг/л; калий-ион – 25,1 мг/л; кальций-ион – 47,1 мг/л; натрий-ион – 79,9 мг/л; магний-ион – 18,97 мг/л; азот общий – 10 мг/л; азот нитритный – 0,0243 мг/л; азот нитратный – 9,03 мг/л; азот аммонийный – 0,389 мг/л; фосфат-ионы – 0,2 мг/л; железо – 0,18 мг/л; нефтепродукты – 0,05 мг/л; синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) – 0,15 мг/л; фенолы – 0,001 мг/л; фосфор общий – 0,9 мг/л; жиры – 0,013 мг/л.

На основании фактических данных по среднесуточным расходам и концентрациям сточных вод на входе очистных сооружений за три года произведен анализ их соответствия. Анализ производился в учебно-научной лаборатории «Комплексного анализа техногенных нарушений среды» при Политехническом институте (филиале) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» в г. Мирном. Данная лаборатория внесена в реестр аккредитованных лиц, номер аттестата об аккредитации № RA.RU.21AE94. Лаборатория может проводить экологический контроль, а также анализ следующих объектов: природная, сточная, питьевая вода, почва, грунты, донные отложения, природный газ, нефть и нефтепродукты.

На рис. 1 приведены графики фактического среднесуточного расхода сточных вод на входе сооружений за трехлетний период по месяцам. Среднесуточный расход за 2018 г. составил 16265 м³/сут, за 2019 г. – 15767 м³/сут, за 2020 г. – 15544 м³/сут, за трехлетний период получаем среднее значение, равное 15858 м³/сут.

На рис. 2 приведены графики фактического качества сточных вод на входе сооружений за три года. Средняя фактическая концентрация БПК₅ на входе сооружений за три года составила 72 мг/л (рис. 2, а), взвешенных веществ – 111 мг/л (рис. 2, б), фосфатов – 2,3 мг/л (рис. 2, в), азота аммонийного – 18 мг/л (рис. 2, г), азота нитратного – 0,18 мг/л (рис. 2, д).

Важным этапом изменения технологии очистки сточных вод является доведение стоков на выходе КОС до концентраций согласно СП 32.13330.2018: БПК₅ – 8 мг/л,

взвешенные вещества – 9,85 мг/л, азот общий – 10 мг/л, фосфор общий – 0,9 мг/л.

На рис. 3 приведены сравнительные графики изменения концентрации веществ на входе (до очистки) и выходе (после очистки) КОС за 6 месяцев (март – август) 2019 г. Оценим превышение допустимых концентраций веществ после очистки, а также эффективность очистки, определяя ее как отношение разниц среднего значения до и после очистки и среднего значения и допустимой концентрации, то есть:

$$\Theta = \frac{K_{\text{СР.до}} - K_{\text{СР.после}}}{K_{\text{СР.до}} - K_{\text{допуст.}}} \cdot 100 \%$$

На рис. 3, а, приведен график изменения концентраций БПК₅ до и после очистки. Средний показатель в поступающей сточной воде – 70,8 мг/л, средний показатель очищенной воды на выходе – 15 мг/л [13]. При нормированном показателе по БПК₅ – 8 мг/л, превышение после очистки будет составлять 87,5%, а эффективность очистки будет равна 88,8%. На рис. 3, б, приведен график изменения взвешенных веществ до и после очистки. Среднее содержание в поступающей сточной воде – 128 мг/л, средний показатель очищенной воды на выходе – 16,4 мг/л. При нормированном показателе по взвешенным веществам 9,85 мг/л, превышение после очистки будет составлять 66,5%, а эффективность очистки будет равна 94,4%. На рис. 3, в, приведен график изменения фосфатов до и после очистки. Среднее содержание в поступающей сточной воде – 2,7 мг/л, средний показатель очищенной воды на выходе – 2,52 мг/л. Оценим фосфаты по нормированным показателям для общего фосфора. При нормированном показателе по общему фосфору 0,9 мг/л превышение после очистки будет составлять 180%, а эффективность очистки будет равна 10%. На рис. 3, г и д, приведены графики изменения аммонийного и нитратного азотов до и после очистки. Среднее содержание в поступающей сточной воде – 17,8 и 2,19 мг/л, средний показатель очищенной воды на выходе – 13,5 и 3,7 мг/л соответственно для аммонийного и нитратного азотов. Оценим их по нормированным показателям общего азота. При нормированном показателе по общему азоту 10 мг/л превышение после очистки будет составлять 72%, а эффективность очистки будет равна 27,9%.

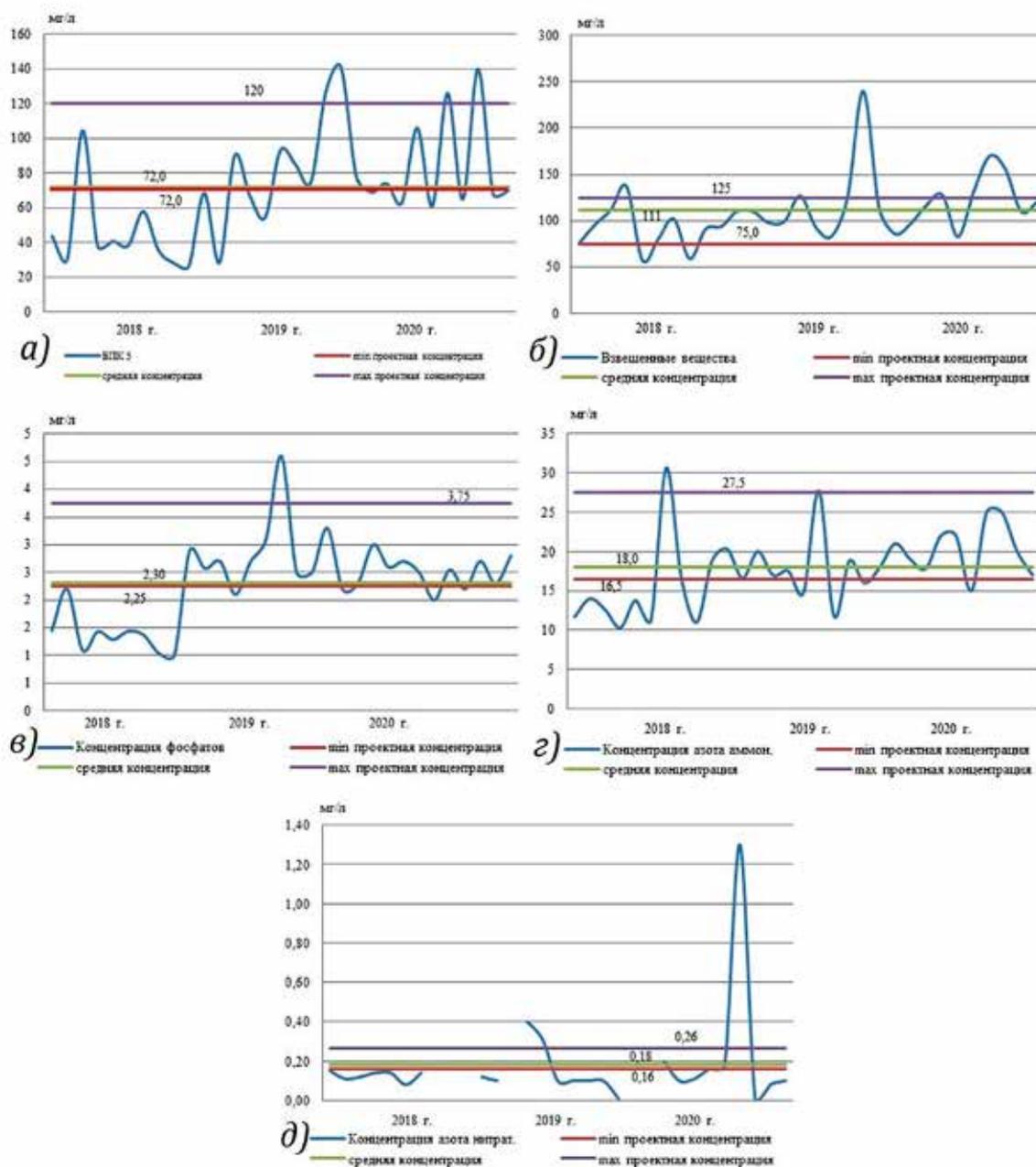


Рис. 2. Графики концентрации веществ в сточных водах на входе сооружений за три года: а) БПК₅; б) взвешенные вещества; в) фосфаты; г) азот аммонийный; д) азот нитратный

Результаты анализа качества очистки сточных вод

Показатель	Средние значения, мг/л		Допустимое содержание по СП 32.13330.2018, мг/л	Превышение нормы, %	Эффективность очистки, %
	до очистки	после очистки			
БПК ₅	70,8	15	8	87,5	88,8
Взвешенные вещества	128	16,4	9,85	66,5	94,4
Общий фосфор	2,7	2,52	0,9	180	10
Общий азот	19,99	17,2	10	72	27,9

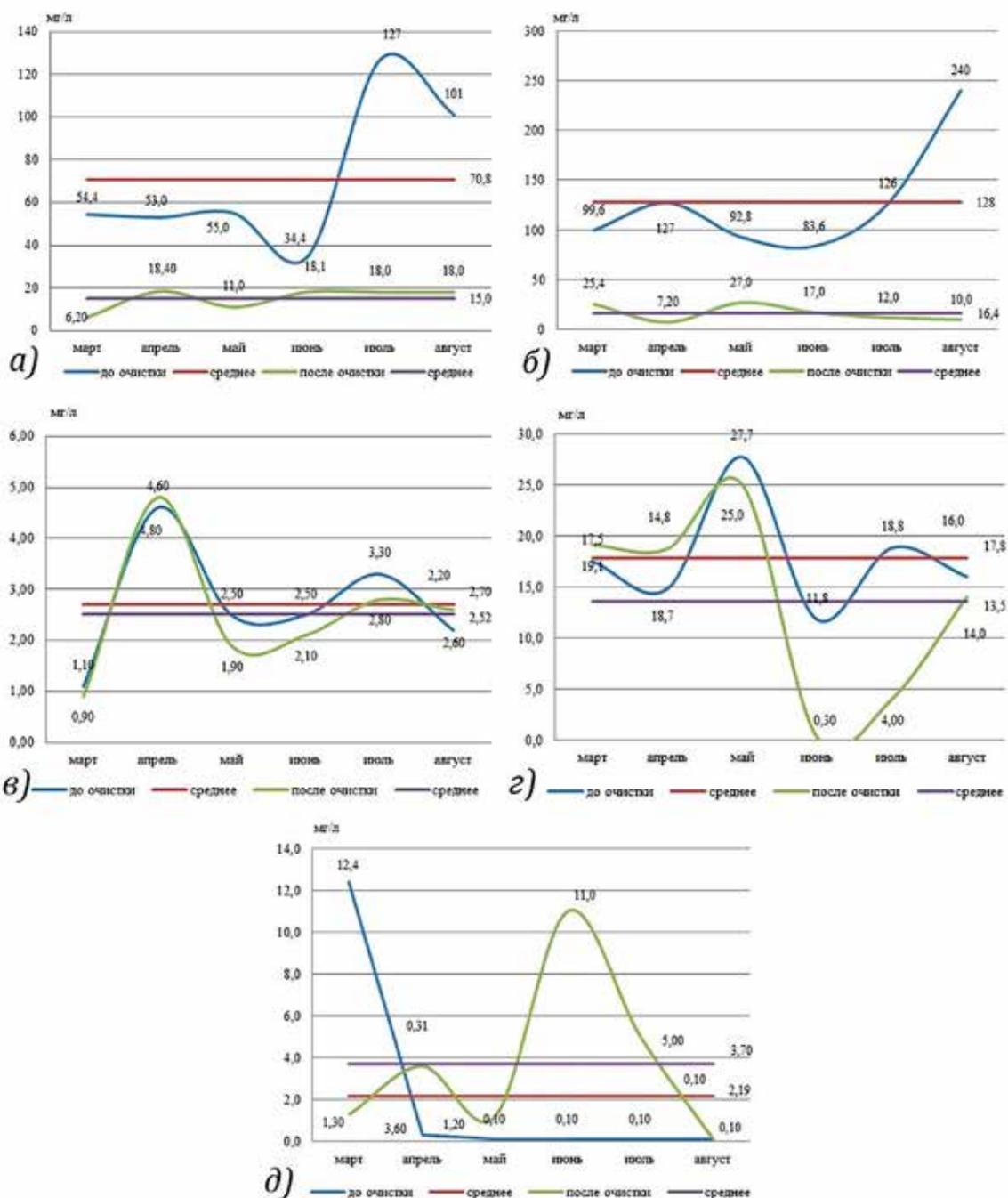


Рис. 3. Графики изменения концентрации веществ до и после очистки:
 а) БПК₅; б) взвешенные вещества; в) фосфаты; г) азот аммонийный; д) азот нитратный

Сведем полученные результаты изменения концентрации веществ до и после очистки, то есть на входе и выходе КОС за 6 месяцев (март – август) 2019 г., а также результаты оценки превышения допустимых норм согласно СП 32.13330.2018 и эффективности очистки в таблицу.

Как видно из анализа, эффективность очистки ни по одному из показателей не до-

стигает 100%, также наблюдается превышение допустимых норм, следовательно, КОС требуют модернизации технологического процесса биологической очистки сточных вод. Несмотря на наличие активного ила, процессы биологической очистки от азота не дают должного эффекта. Аммонийный азот ввиду отсутствия бактерий-нитрификаторов практически не окисляется. Также

не отрегулированы параметры аноксидных зон и рециклов для стабильного ведения процесса денитрификации. После настройки параметров нитри-денитрификации азота концентрация БПК₅ снизится автоматически, так как органика будет окислена на стадии денитрификации.

Результаты исследования и их обсуждение

Существующая линия биологической очистки представляет собой многосекционную емкость с тремя параллельными линиями, включающими (по ходу движения потока) первичный отстойник, двухкоридорный аэротенк, вторичный отстойник, резервуар очищенной воды с размещенными в нем двумя дисковыми фильтрами доочистки [7].

Авторы предлагают модернизировать технологический процесс биологической очистки сточных вод на КОС г. Мирный по приведенной ниже схеме для достижения 100% эффективности очистки и уменьшения концентрации веществ до допустимого.

Новой технологической схемой предусматривается разделение существующих емкостей биологической очистки на функциональные зоны (сооружения): аэротенк (нитри-денитрификатор), вторичный отстойник, узел доочистки на дисковых фильтрах Хубер (используется камера очищенной воды). В существующий конструктив технологических линий вносятся изменения (перегородки в блоке доочистки). В качестве основы биологической очистки предусмотрен процесс нитри-денитрификации с глубоким химико-биологическим удалением азота и фосфора. По предыдущему проекту чистка стока осуществлялась в многокамерных прямоточных аэротенках-вытеснителях. Обеспечение необходимой концентрации кислорода будет осуществляться за счет аэрации сточной воды воз-

духом. Для подачи воздуха предусмотрено использование трех существующих воздуходувок, которые оборудуются частотными электроприводами [7].

В зонах нитрификации аэротенков монтируются 6 систем контроля растворенного кислорода (по 2 шт. на каждый аэротенк), которые посредством каскадного регулирования управляют воздуходувками. Аэротенк состоит из трех последовательных зон: 1 – первая зона нитрификации, 2 – зона денитрификации, 3 – вторая зона нитрификации. Зоны нитрификации оборудованы системой дисковых аэраторов. Зоны денитрификации оборудованы погружными мешалками для поддержания ила во взвешенном состоянии.

От того, насколько хорошо поддерживается ил во взвешенном состоянии в аноксидных зонах, насыщается кислородом в зонах аэрации, а также от того, выдержаны ли все условия протекания процессов в аноксидных (отсутствие растворенного кислорода) и оксидных (растворенный кислород больше 2 мг/л, возраст ила более 15 суток) зонах, зависит степень очистки сточных вод от биогенов.

Поскольку объема биоблока недостаточно для одновременного биологического удаления азота и фосфора, предлагается существующую схему заменить на раздельное биологическое удаление азота в аэротенках путем нитро-денитрификации и химическое осаждение фосфора в первичных отстойниках. Также остается и точка ввода реагента во вторичные отстойники, рассчитанная по предыдущему проекту. Рассредоточенный ввод коагулянта (в первичные и вторичные отстойники) позволит снизить его общую дозу и эксплуатационные затраты на реагент.

Очистка от азота по технологии нитри-денитрификации осуществляется согласно схеме, представленной на рис. 4.



Рис. 4. Схема нитри-денитрификации

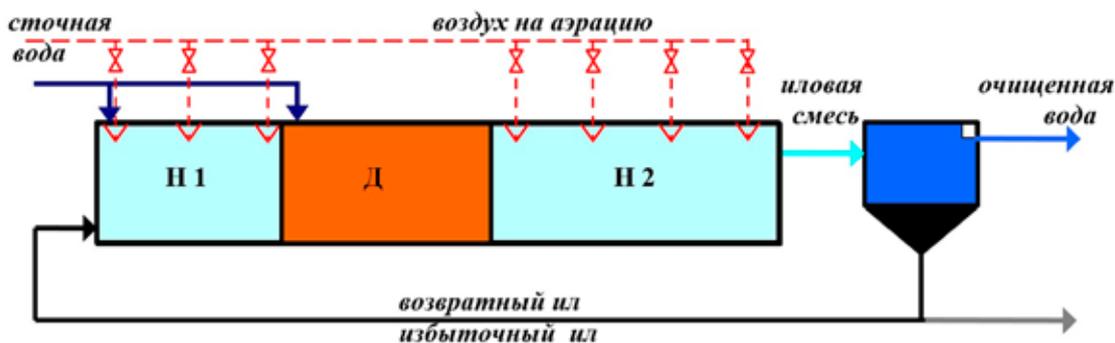


Рис. 5. Технологическая схема биологической очистки с удалением азота и фосфора

Последняя стадия в схеме очистки ведет к биовосстановлению нитритов (стадия 3а) и нитратов (стадия 3б) до молекулярного азота, который отдувается из сточной воды в атмосферу. Денитрификация осуществляется под действием группы факультативно-анаэробных гетеротрофных микроорганизмов, которые должны существовать за счет органического субстрата и использовать кислород, входящий в состав нитратов. Присутствие растворенного кислорода перестраивает их метаболизм на аэробный путь, и для окисления органических веществ денитрифицирующими бактериями используется уже не кислород нитритов и нитратов, а растворенный кислород, то есть процесс осуществляется аналогично схеме аэробной биологической очистки. Условия, когда растворенный кислород в среде отсутствует, но есть кислород химически связанный, называются анакисными [7].

Из практики биологической очистки сточных вод известны различные варианты реализации процесса нитри-денитрификации [14]. Из всего многообразия схем нитри-денитрификации, в случае КОС г. Мирный наиболее целесообразной является схема с предшествующей нитрификацией и расщепленной подачей сточной воды: 75% в начало биоблока и 25% в начало зоны денитрификации (рис. 5).

На рис. 5 зона нитрификации обозначена буквой *H* – аэробные условия, а зона денитрификации обозначена буквой *Д* – анакисные условия.

Для оптимального протекания биохимических процессов на стадии биологической очистки СП 32.13330.2018 рекомендует соотношение БПК_{полн}:N:P = 100:5:1. Фактическое соотношение 158:11,32:1,2 = 100:7:0,8, то есть наблюдается факт недостатка органики для биологического удаления азота и фосфора.

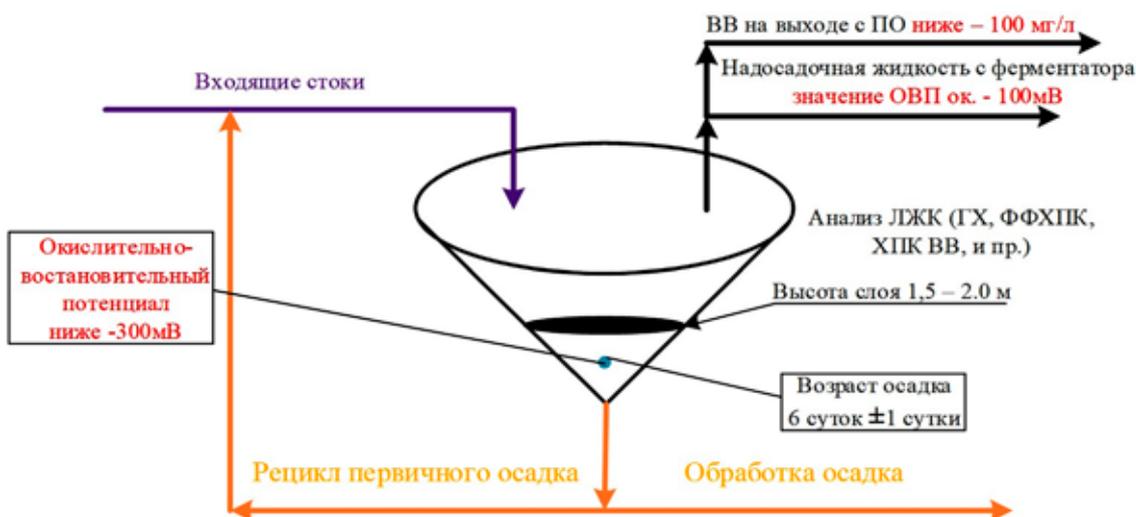


Рис. 6. Целевые параметры процесса преферментации в первичных отстойниках

Одним из самых экономичных способов повышения легкорастворимой органики является проведение преферментации осадка в первичных отстойниках. Цель проведения преферментации – увеличение количества легкоокисляемых органических веществ на входе в аэротенки, что во многом определяет эффективное проведение глубокой биологической очистки от азота и фосфора.

Целевые параметры процесса преферментации осадка в первичных отстойниках показаны на рис. 6.

Новой технологической схемой предусмотрена технология преферментации сырого осадка, позволяющая подавать его на вход первичных отстойников с целью рециркуляции и перемешивания сброженного осадка с входящим потоком сточных вод.

В существующей схеме биологической очистки сточных вод возникает проблема неэффективного удаления фосфора. Для того чтобы снизить концентрацию фосфора и фосфатов в очищенной воде, был разработан метод химического осаждения фосфора во вторичных отстойниках, основанный на тщательном подборе реагентов [7].

После определения схемы модернизации технологического процесса биологической очистки сточных вод был произведен подбор необходимого технологического оборудования, а именно: автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора – 2 ед.; шкаф автоматики – 8 ед., в том числе для управления первичными и вторичными отстойниками, управления биологической очисткой, управления установкой дозирования коагулянта; установка дозирования коагулянта – 1 ед.; автоматический пробоотборник – 4 ед.; задвижка с электроприводом – 27 ед.; кислородомер – 6 ед.; датчик уровня ила и осадка – 6 ед., расходомер избыточного ила – 6 ед.

Новая схема технологического процесса и внедряемое оборудование помогут достичь 100% эффективности очистки сточных вод КОС г. Мирный и уменьшить концентрации веществ, сбрасываемых в р. Ирелях, до допустимых значений согласно СП 32.13330.2018.

Заключение

В ходе проведенного исследования было установлено, что КОС г. Мирный в настоящий момент не могут обеспечить 100% эффективности очистки сточных вод, сбрасываемых в р. Ирелях, которые согласно СП 32.13330.2018 должны содержать следующие концентрации веществ: БПК₅ – 8 мг/л,

взвешенные вещества – 9,85 мг/л, азот общий – 10 мг/л, фосфор общий – 0,9 мг/л.

Для улучшения показателей сброса сточных вод предлагается новая технологическая схема, включающая процесс нитри-денитрификации, который обеспечивает глубокое биологическое удаление азота и фосфора, а также процесс преферментации в первичных отстойниках. Также был произведен подбор и предложено необходимое технологическое оборудование для реализации нового технологического процесса.

В результате исследования авторами было определено необходимое технологическое оборудование для эффективного удаления азота и фосфора, а также предложены алгоритмы и системы управления, способные повысить эффективность работы очистных сооружений и улучшить их эксплуатационные характеристики, а также уменьшить платежи за негативный сброс.

Список литературы

1. Wu C., Jiang Q., Luciano P., Sun Y., Du Y., Zhang T.C., Du D. Strategy of optimizing anaerobic digestion of cassava distiller wastewater using a novel automatic biological incubation system // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 305. P. 114384. DOI: 0.1016/j.jenvman.2021.114384.
2. Chawla P., Gola D., Dalvi V., Sreekrishnan T.R., Ariyadasa T.U., Malik A. Design and development of mini-photobioreactor system for strategic high throughput selection of optimum microalgae-wastewater combination // *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 17. P. 100967. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.100967.
3. Novikov A.E., Filimonov M.I., Khadzhibi A.E., Dugin E.A. Development and simulation of the operation of a two-tier sedimentation tank for urban wastewater treatment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 786, Is. 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012033.
4. Sossalla N.A., Nivala J., Escher B.I., Schlichting R., van Afferden M., Müller R.A., Reemtsma T. Impact of various aeration strategies on the removal of micropollutants and biological effects in aerated horizontal flow treatment wetlands // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 828. P. 154423. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154423.
5. Sossalla N.A., Nivala J., Escher B.I., Reemtsma T., Schlichting R., van Afferden M., Müller R.A. Resilience of micropollutant and biological effect removal in an aerated horizontal flow treatment wetland // *Water (Switzerland)*. 2020. Vol. 12, Is. 11. P. 3050. DOI: 10.3390/w12113050.
6. Rafeenia R., Sulonen M., Mahmoud M., El-Gohary F., Rossa C.A. Integration of microbial electrochemical systems and photocatalysis for sustainable treatment of organic recalcitrant wastewaters: Main mechanisms, recent advances, and present prospects // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 824. P. 153923. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153923.
7. Бебихов Ю.В., Семёнова М.Н., Голиков В.В., Павлова С.Н. Проектирование и разработка инновационной автоматической системы биологической очистки сточных вод // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 7. С. 136–142. DOI: 10.24412/2307-180X-2021-7-136-142.
8. Стариков М.М. Актуализация схемы водоснабжения и водоотведения муниципального образования «Город Мирный» на перспективу до 2027 года с изменениями по состоянию на 2020 год. Красноярск: ООО «СибЭнергоСбережение», 2020. 134 с.

9. Van Do M., Le T.X.T., Vu N.D., Dang T.T. Distribution and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants // *Environmental Technology and Innovation*. 2022. Vol. 26. P. 102286. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102286.
10. Dubey M., Rajpal A., Vellanki B.P., Kazmi A.A. Occurrence, removal, and mass balance of contaminants of emerging concern in biological nutrient removal-based sewage treatment plants: Role of redox conditions in biotransformation and sorption // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 808. P. 152131. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152131.
11. Gaballah M.S., Abdelwahab O., Barakat K.M., Stefanakis A.I. A pilot system integrating a settling technique and a horizontal subsurface flow constructed wetland for the treatment of polluted lake water // *Chemosphere*. 2022. Vol. 295. P. 133844. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133844.
12. Ovchinnikov A.S., Bocharnikov V.S., Bocharnikova O.V., Pustovalov E.V., Denisova M.A., Repenko T.V. Disinfection of wastewater with ultraviolet light on devices of the cyclic principle of action // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 965, Is. 1. P. 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/965/1/012014.
13. Karef S., Azlaoui M., Hameurlaine A. Fodili M. Characterization and evaluation of the treated water quality from the wastewater treatment plant of the Djelfa city // *2023 1st International Conference on Renewable Solutions for Ecosystems: Towards a Sustainable Energy Transition (ICRSEtoSET)*. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICRSEtoSET56772.2023.10525286.
14. Большаков Н.Ю. Основы биотехнологии: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. 77 с.