

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЕФОСФОТАЦИИ КОММУНАЛЬНЫХ СТОКОВ НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ

Горбачева Т. Т., Евшин П. Н., Горбачев А. А., Артемкина Н. А.

REVISITING APPLICABILITY OF BIOLOGICAL METHODS FOR DEPHOSPHOTATION OF MUNICIPAL WASTEWATER IN FAR NORTH

Gorbacheva T. T., Evshin P. N., Gorbachev A. A., Artemkina N. A.

Аннотация

Введение: обсуждается вопрос ретехнологизации КОС средней мощности (26 000 м³/сут при 47 000 м³/сут, предусмотренной проектом) в условиях Крайнего Севера. В связи с поступлением очищаемых вод в водоем рыбохозяйственного назначения основные параметры осветленных сточных вод сопоставлены с оптимальными значениями, принятыми в международной практике глубокой биологической очистки коммунальных стоков от фосфора. **Методы:** для сопоставления проведена оценка многолетней (2006–2018 гг.) динамики водопотребления, а также температуры, pH, отношения БПК₅/P, ХПК/P стоков после первичных отстойников. Сделан акцент на содержание в осветленных стоках органического вещества, легкодоступного для микробиоты. **Результаты:** параметры вод после первичных отстойников благоприятны для реконструкции существующих аэротенков с добавлением в технологический процесс стадии биологического удаления фосфора. Ионный баланс осветленных стоков указывает на высокую долю анионов низкомолекулярных алифатических кислот (НАК) в их составе. Отработана методика аналитического определения НАК в осветленных стоках методом ВЭЖХ, показана доминирующая роль ацетатной фракции. **Заключение:** проведенная оценка свидетельствует о возможности и перспективности использования в северном регионе биологического метода удаления фосфора из коммунальных стоков без ацидофикации сырого осадка.

Ключевые слова: дефосфотация, осветленные стоки, биологические методы, ХПК, pH, температура, ЛЖК, НАК, ВЭЖХ.

Введение

Строительство большинства канализационных очистных сооружений (КОС) РФ производительностью 20–50 тыс. м³ в сутки пришлось на 70-е годы прошлого столетия. В упомянутый период основная цель очистки коммунальных стоков заключалась в удалении органических соединений и взвешенных веществ. Удаление некоторой части биогенных элементов (N, P) проис-

Abstract

Introduction: The article reviews retechnologization of wastewater treatment facilities of medium capacity (26,000 m³/day vs design capacity of 47,000 m³/day) under conditions of Far North. Due to the entry of purified water in a fishery reservoir, key parameters of the clarified wastewater are compared with the optimum values accepted in the international practice regarding deep biological cleaning of municipal wastewater from phosphorus. **Methods:** For the purposes of comparison, long-term (2006–2018) dynamics of water consumption as well as temperature, pH, BOD₅/P, COD/P in wastewater downstream of primary settlers were assessed. The content of organic matter available for microbiota in the clarified wastewater was prioritized. **Results:** Parameters of water downstream of primary settlers are favorable for reconstruction of the existing aerotanks and introduction of biological dephosphotation in the treatment process. The ion balance of the clarified wastewater indicates a high share of low-molecular aliphatic acids (LMAA) anions in their composition. The technique for analytical determination of LMAA in the clarified wastewater using the HPLC method was tried and tested; the dominating role of the acetate fraction was shown. **Conclusion:** The carried-out assessment shows that it is worthwhile to use the biological method for removal of phosphorus from municipal wastewater in the north without fresh sludge acidification.

Keywords: dephosphotation, clarified wastewater, biological methods, COD, pH, temperature, VFA, LMAA, HPLC.

ходило попутно — в результате микробиологической активности широкого спектра действия и соосаждения их со взвешенными веществами в первичных и вторичных отстойниках. В настоящее время такие технологии продолжают широко применяться на большинстве КОС России [7], в том числе в условиях Крайнего Севера.

В связи с миграционной убылью населения и совершенствованием политики водопотребле-

ния в северных регионах многие КОС функционируют с существенной недозагрузкой. В числе таких сооружений и КОС-3 АО «Апатитыводоканал», принимающие коммунальные стоки г. Апатиты Мурманской области. Фактическая производительность КОС-3 составляет 26 400 м³/сут, проектная 47 000 м³/сут. Сброс очищенных вод производится в реку Жемчужная, впадающую в оз. Имандра — водоем рыбохозяйственного назначения. В работе [14] на основе математической модели Фолленвайдера для плесов озера Имандра рассчитаны величины критических нагрузок по фосфору. Для снижения трофии водоема критическая фосфорная нагрузка для плеса Большая Имандра не должна превышать 41 т/год, для Йокостровской Имандры — 34 т/год, для Бабинской Имандры — 22 т/год. Сброс фосфора со сточными водами КОС-3 существенно ниже минимально допустимой критической нагрузки, и для динамики его сброса в целом отмечена статистически значимая ($R^2 > 0,7$) тенденция к снижению даже в условиях применения существующей технологии (рис. 1). Однако для достижения ПДК_{рыбхоз} по фосфору (0,2 мг/л) степень очистки поступающих сточных вод должна быть не ниже 92 %.

В настоящее время фосфор считается ключевым биогенным элементом, определяющим процесс эвтрофикации водоемов, широко отмечаемой на территории РФ, в том числе в оз. Имандра. В последнее десятилетие на смену фосфорной парадигмы приходит парадигма N+P контроля [2], что способствует разработкам технологий совместного удаления этих двух биогенных элементов. С 2019 г. в РФ предусмотрен переход на технологическое нормирование сбросов сточных вод предприятий ВКХ, эксплуатирующих КОС производительностью более 20 тыс. м³/сут на основе наилучших доступных технологий (НДТ) удаления азота и фосфора из коммунальных стоков [15]. Применяемые в настоящее время технологии не обеспечивают глубину очистки коммунальных стоков до требований ПДК_{рыбхоз}, однако недогрузка имеющихся сооружений позволяет специалистам предприятий ВКХ планировать меры по ретехнологизации производственного процесса очистки — в рамках имеющихся площадей и функционирующих сооружений. Термин «ретехнологизация» отсутствует в словарях,

но допустимость его применения всесторонне обоснована в статьях технологической направленности, в частности, касающихся очистки сточных вод ВКХ РФ. Основным отличием реконструкции с ретехнологизацией от обычной реконструкции сооружений является введение новых технологических процессов на действующих сооружениях [11]. Этим обусловлена необходимость изменения функционального назначения отдельных блоков или их частей и (или) дополнения комплекса очистки новыми сооружениями, предназначенными для выполнения функций, ранее не предусмотренных проектом.

В 2017 г. руководством АО «Апатитыводоканал» было принято решение о проведении (первыми в регионе) всестороннего технологического аудита с выдачей рекомендаций по совершенствованию технологических схем очистки стоков на трех основных КОС, функционирующих в городах Апатиты, Кировск и поселке Умба. Технологический аудит проведен с привлечением специализированной организации АО «Гидротехнические системы» (СПб). Согласно выданным рекомендациям относительно КОС г. Апатиты (КОС-3) предполагается реконструкция имеющихся в их составе четырех секций аэротенка с изменением технологии биологической очистки, а именно с выделением аноксидной, анаэробной и аэробной зон, устройством рецикла нитрифицированной смеси и реконструкцией системы аэрации. Для глубокого осаждения фосфора предлагается реагентная обработка сточных вод путем введения раствора коагулянта в трубопровод циркулирующего ила после вторичных отстойников. При необходимости предусматривается дополнительный ввод раствора коагулянта в распределительную чашу вторичных отстойников. В качестве коагулянтов рекомендованы реагенты на основе солей алюминия в дозах 25–40 мг/л с уточнением дозы коагулянта в ходе дальнейшего проектирования. Высокая эффективность применения алюминийсодержащих коагулянтов при реагентной дефосфотации подтверждена методом пробного коагулирования осветленных стоков КОС-3 [3, 4]. Однако широко известно, что при реагентном удалении фосфора дозы коагулянта существенно превышаются по сравнению со стехиометрическими значениями, необходимыми непосредственно для осаждения

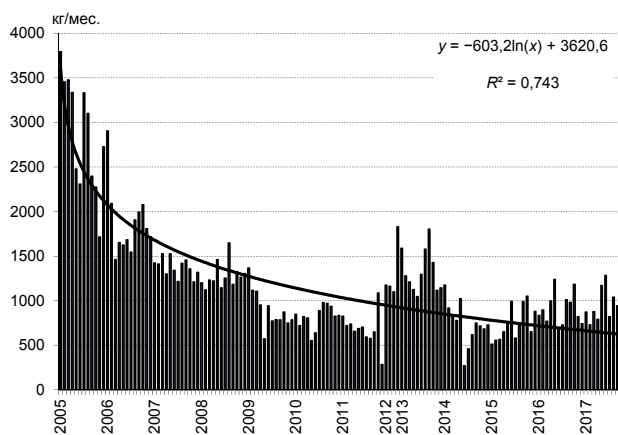


Рис. 1. Динамика сброса фосфора с КОС-3 г. Апатиты в р. Жемчужная (2005–2017 гг.)

фосфора в виде малорастворимых фосфатов. Происходит это из-за сложного компонентного состава коммунальных стоков, поскольку значительная часть коагулянта расходуется на осаждение взвешенных и коллоидных частиц минерального и органического происхождения, а не на связывание растворимых форм фосфора. Это обстоятельство не позволяет обеспечить поддержание доз коагулянта на уровне рекомендуемых НДТ [15].

Необходимость введения в техпроцесс стадии реагентного удаления фосфора долгое время объяснялась невозможностью снижения концентрации фосфора ниже 1 мг/л применением одних только биологических методов. Однако такое мнение было опровергнуто успешным внедрением биологического метода дефосфотации стоков специалистами ООО «КИНЕФ» при научном сопровождении ООО «Природные системы», добившихся снижения фосфора практически до нулевых значений при применении метода A^2O [8]. В экспертной работе Даниловича [5] проведен всесторонний анализ принятых технологических решений и рекомендовано распространение накопленного опыта на существенно недогруженные очистные сооружения, особенно при условии поступления в системы очистки среднеконцентрированных стоков. КОС-3 г. Апатиты соответствует таким требованиям.

Цель данной работы — на примере КОС-3 г. Апатиты провести предварительную оценку соответствия основных параметров осветленных стоков оптимальным значениям, принятым

в международной практике биологического удаления фосфора из коммунальных стоков.

Материалы и методы

В качестве основных параметров осветленных стоков приняты температура, рН, БПК₅/Р, ХПК/Р, концентрация легкоокисляемых органических соединений и их соотношение. Оптимальные значения перечисленных параметров, принятые в международной практике глубокого биологического удаления фосфора из муниципальных стоков, обсуждаются в работах [13, 17–20] и приведены в соответствующих разделах данной статьи.

Соответствие стоков КОС-3 оптимальным значениям оценивалось по материалам ежедневного контроля, проведенного Испытательным центром качества вод АО «Апатитыводоканал» в 2013–2017 гг. Испытательный Центр аккредитован на техническую компетентность и соответствие требованиям международного стандарта ИСО/МЭК 17025–2009, имеет аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.514427 от 03 марта 2017 г.

Наличие источников углерода, необходимого для биологического удаления фосфора, в частности, анионов органических кислот, легкодоступных для микробиоты, подтверждалось результатами расчета ионного баланса осветленных стоков [21].

Анализ состава низкомолекулярных алифатических кислот (НАК), в том числе летучих жирных кислот (ЛЖК), впервые отработан с применением метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). 200 мл осветленных стоков трижды экстрагировали 100 мл этилацетата, полученные экстракты объединяли в одну пробу, растворитель отгоняли на ротационном испарителе ИР-1М2. Сухой остаток, полученный после отгонки этилацетата, растворяли в 1 мл дистиллированной воды и подкисляли 0,5М H_2SO_4 до рН ~ 2 с контролем по универсальному индикатору. Далее пробу пропускали через катионообменник (0,4 ml Bio-Rex 70, 200–400 mesh) в H^+ -форме. Первые 0,4 мл отбрасывали, остальные 0,6 мл отбирали для анализа.

Качественный и количественный анализ НАК в составе осветленных стоков проводили методом ВЭЖХ в изократическом режиме на жидкостном хроматографе «Стайер» («Аквилон», Москва) со

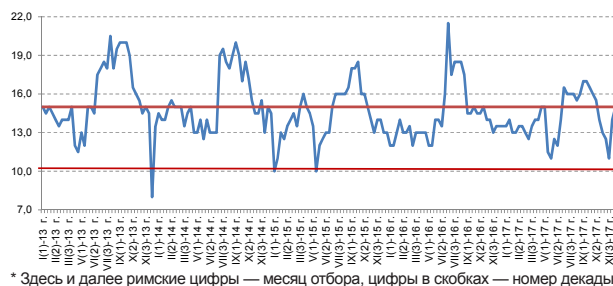
спектрофотометрическим детектором UVV-104 (при длине волны 210 нм). Использовали предколонку Carbo-H⁺ (4 × 3 мм, «Phenomenex», размер частиц 8 мкм) и колонку Rezex 8u 8 % H. Org. Acid (300 × 7,8 мм, «Phenomenex», размер частиц 5 мкм). Элюент: 0,2 % раствор H₃PO₄ (рН≈2,01). Скорость потока — 0,45 мл/мин, объем инъекции — 50 мкл, время хроматографирования — 26 мин. Хроматограммы обрабатывались с применением программного обеспечения «МультиХром». За основу разделения органических кислот была принята методика, представленная в работе [1], при этом установлены пределы обнаружения каждого отдельного компонента и проведена калибровка. Условия хроматографирования приведены в табл. 1.

Для вычисления концентрации углерода, содержащегося в органических веществах, значение ХПК (мгО/л) умножается на 0,375 (12/32) [12], что позволяет по концентрации НАК вычислить ХПК_{нак} по каждому отдельному компоненту органической части стоков с выделением ХПК_{лжк}.

Результаты и обсуждение

Температура

Температурный профиль осветленных стоков КОС-3 приведен на рис. 2. Нижняя граница варибельности температуры стоков достигает в отдельные периоды 10 °С, что могло бы являться весомым аргументом против утверждения о возможности биологического удаления фосфора в условиях Крайнего Севера. Однако международная практика показала, что при правильной организации технологического процесса понижение



* Здесь и далее римские цифры — месяц отбора, цифры в скобках — номер декады.

Рис. 2. Варибельность температуры (°С) осветленных стоков КОС-3. (2013–2017 гг.)

температуры обрабатываемых стоков до 10 °С и даже до 5 °С слабо влияет на эффективность глубокой очистки от фосфора [18]. Кроме того, пониженные температуры определяют побочный эффект — снижение до минимума скорости нитрификации, что исключает расходование части ЛЖК на восстановление нитратов, а значит, позволяет максимально эффективно использовать запас легкодоступных форм углерода при биологической дефосфотации сточных вод.

Отношение БПК₅/P и ХПК/P

Для эффективного проведения процесса биологического удаления фосфора необходимо соотношение БПК₅:P в обрабатываемой воде более 20:1, соотношение ХПК:P — более 45:1 [19]. Данные многолетней динамики этих двух показателей в осветленных стоках КОС-3, приведенные на рис. 3 и 4 соответственно, однозначно свидетельствуют о варибельности в пределах значений, оптимальных для биологической очистки.

pH

Согласно [17] сдвиг рН в кислую область оказывает ингибирующее действие и на поглощение ЛЖК, и на вытеснение фосфора на анаэробной

Таблица 1

Хроматографические параметры

Наименование кислоты	Концентрация, мМ	ПО*	t _R ** мин
Щавелевая	5, 10, 25, 50, 250, 500	0,6	11,08
Лимонная	25, 50, 250, 500	3,5	12,15
Винная	25, 50, 250, 500	3,7	14,06
Яблочная	25, 50, 250, 500	5,5	14,97
Малоновая	25, 50, 250, 500	6,0	15,88
Янтарная	25, 50, 250, 500	0,9	18,15
Молочная	—	—	18,15
Муравьиная	50, 250, 500	20,2	19,51
Уксусная	50, 250, 500	24,1	20,59
Фумаровая	2,5, 5, 25, 50	0,4	23,61

* Предел обнаружения.

** Время удерживания компонента.

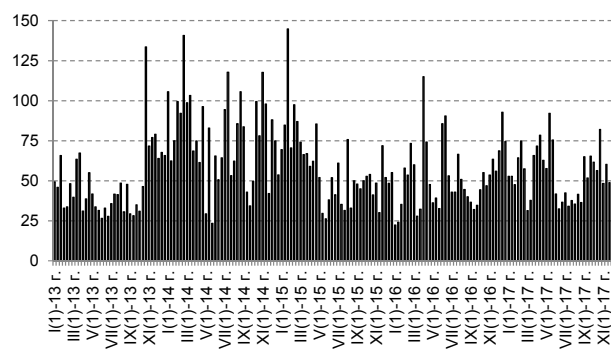


Рис. 3. Динамика отношения БПК₅/P в осветленных стоках КОС-3 (2013–2017 гг.)

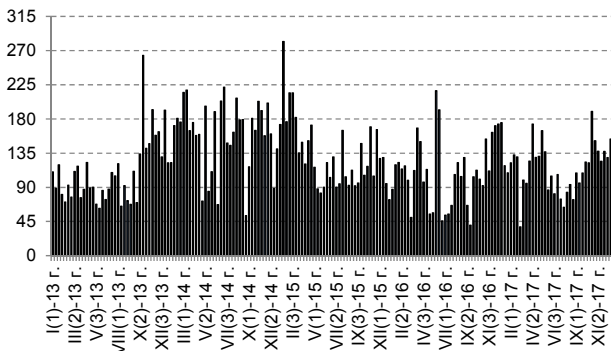


Рис. 4. Динамика отношения ХПК/Р в осветленных стоках КОС-3 (2013–2017 гг.)

стадии биологического поглощения фосфора. В свою очередь, сдвиг pH в щелочную область оказывает ингибирующее действие на поглощение ЛЖК, но стимулирующее на вытеснение фосфора, поэтому в целом рекомендуется поддерживать нейтральные значения pH на протяжении всего процесса. Для осветленных стоков КОС-3 характерна слабая вариабельность pH в пределах 7–8 единиц (рис. 5), что можно признать благоприятным показателем качества воды, близким к оптимальному.

Ионный баланс осветленных стоков

Анализ ионного баланса водных растворов широко применяется в экологических исследованиях. Так, по уравнению материального баланса в нормальных концентрациях (мг-экв/л) проверяют правильность анализа состава водных вытяжек, исследуют влияние техногенных факторов на миграционную активность элементов [21]. При расчетах принимается ряд допущений, а именно предположение о присутствии доминирующих в растворе металлов (K, Na, Ca, Mg) в виде катионов, неметаллов (S, Cl, N) — в виде анионов кислородсодержащих кислот в высшей

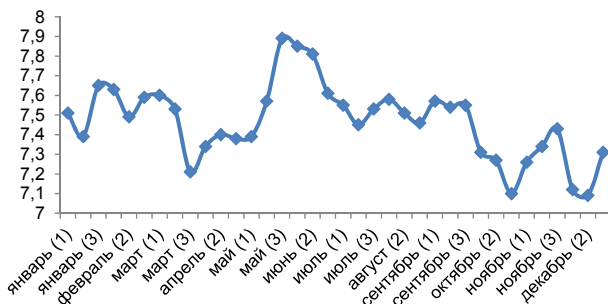


Рис. 5. Динамика pH осветленных стоков на КОС-3 (2017 г.)

степени окисления. Концентрации ионов водорода (мг-экв/л) определяются исходя из значений актуальной кислотности раствора (pH). Разница между суммой катионов и суммой анионов минеральных кислот принимается за концентрацию анионов органических кислот, связанных либо с катионами металлов, либо с ионами водорода. Ионный баланс осветленных стоков КОС-3 приведен в табл. 2. В катионной части вод доминируют ионы аммония и натрия, а в анионной (минеральной составляющей) — гидрокарбонат- и хлорид-ионы. Сумма катионов органических кислот сопоставима с суммой анионов минеральных кислот, что указывает на наличие в осветленных стоках КОС-3 компонентов органической и орвано-минеральной природы, легко доступной для микробиоты. Стоит отдельно отметить, что содержание нитрат-ионов в осветленных стоках чрезвычайно мало, а это позволяет предполагать, что вопрос их возможного негативного влияния в анаэробной зоне неактуален.

Содержание НАК в осветленных стоках

Одним из основных лимитирующих факторов, определяющих эффективность процесса биологического удаления фосфора, является содержание легкоокисляемых органических соединений в обрабатываемой воде [16]. На анаэробной стадии фосфатаккумулирующие мик-

Таблица 2

Ионный баланс осветленных стоков КОС-3

Определяемый параметр	Единицы измерения	Значение параметра
H ⁺	мкг-экв/л	0,023
NH ₄ ⁺	мкг-экв/л	1427
Ca ²⁺	мкг-экв/л	724
Mg ²⁺	мкг-экв/л	289
Na ⁺	мкг-экв/л	1304
K ⁺	мкг-экв/л	192
Сумма катионов	мкг-экв/л	3936
Cl ⁻	мкг-экв/л	883
SO ₄ ²⁻	мкг-экв/л	672
NO ₃ ⁻	мкг-экв/л	5
HCO ₃ ⁻	мкг-экв/л	400
PO ₄ ³⁻	мкг-экв/л	19
Сумма анионов минеральных кислот	мкг-экв/л	1979
Сумма анионов органических кислот	мкг-экв/л	1957

роорганизмы, содержащиеся в активном иле, поглощают легкодоступное органическое вещество, трансформируют и запасают его в виде полимерных насыщенных оксикислот. В аэробных условиях происходит рост биомассы, сопровождающийся потреблением фосфата и запасом его в виде полифосфатов, на что затрачивается энергия связи полимерных насыщенных оксикислот, формирующихся на анаэробной стадии. Опытом эксплуатации крупномасштабных сооружений биологической очистки сточных вод определено, что для удаления 1 мг фосфора необходимо 14–20 мг легкоокисляемой органики [6]. Согласно [10] концентрация легкоразлагаемого органического субстрата по ХПК, относящегося к ЛЖК, должна составлять в анаэробной зоне не менее 25 мг/л. Для достижения такого уровня содержания ЛЖК на Люберецких ОС добавлена обязательная стадия ацидофикации сырого осадка [13]. По мнению авторов работы [9] для успешной биологической очистки требуется не менее 100 мгО/л (ХПК). В работе [10] концентрация ацетата в воде, обогащенной легкоокисляемой органикой в результате ацидофикации, доведена до 106 мг/л. Как следует из данных, приведенных в табл. 3, ХПК уксусной кислоты (ЛЖК), доминирующей в стоках КОС-3, значительно превышает минимально допустимый уровень и соответствует оптимальному уровню, определенному в упомянутых выше работах.

В международной практике биологического удаления фосфора из сточных вод особое внимание уделяется соотношению органических кислот в составе обрабатываемых вод [20], что весьма редко учитывается в практике предприятий ВКХ РФ. Доминирование уксусной кислоты над пропионовой и ее производными признается предпочтительным. Применение нами метода

ВЭЖХ позволило подтвердить, что в исследованных стоках КОС-3 это требование соблюдается.

Заключение

1. Поступление фосфора со сточными водами референц-объекта (КОС-3 г. Апатиты) существенно ниже максимально допустимой критической нагрузки, определенной для точек сброса в северный водоем рыбохозяйственного назначения (оз. Имандра).

2. Для многолетней (2006–2018 гг.) динамики сброса фосфора с очищенными стоками отмечена статистически значимая ($R^2 > 0,7$) тенденция к снижению в условиях применения существующей технологии, но без достижения ПДК_{рыбхоз}.

3. Температурный профиль осветленных стоков с единичными случаями понижения температуры ниже 10 °С соответствует оптимальным условиям активизации фосфатаккумулирующих организмов при ретехнологизации существующих аэротенков.

4. pH осветленных стоков варьирует в пределах 7–8 единиц, что исключает ингибирующее действие резкого изменения реакции среды на процесс их биологической очистки от фосфора.

5. Осветленные стоки референц-объекта характеризуются благоприятными для процесса биологической очистки соотношениями концентрации фосфора и растворенного органического вещества как источника углерода, легкодоступного для микробиоты: БПК₅/P > 25; ХПК/P > 45.

6. Высокое содержание в анализируемых стоках солей низкомолекулярных алифатических кислот (> 100 мг/л) с доминированием ацетатной фракции указывает на возможность ретехнологизации КОС без включения дополнительной стадии ацидофикации сырого осадка.

7. Для регулярного контроля состава органического вещества стоков разработан и рекомендован к использованию метод высокоэффектив-

Таблица 3

Концентрация НАК в осветленных стоках (1-ая декада, июнь 2018 г.)

Наименование кислоты	Формула	Концентрация,		
		µM	мг/л	ХПК _{нак} (расчет по С)
Щавелевая	HOOC-COOH	4,6	0,6	0,28
Винная	HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH	92,5	14	12,0
Молочная (2-гидрокси-пропионовая)	CH ₃ -CH(OH)-COOH	5,5	0,5	0,53
Уксусная (ЛЖК)	CH ₃ COOH	1555,0	93,0	99,2

ной жидкостной хроматографии низкомолекулярных алифатических кислот.

В целом показано, что недозагрузка имеющихся сооружений и благоприятный состав стоков после первичных отстойников позволяет специалистам предприятия ВКХ планировать меры по ретехнологизации производственного процесса очистки — в рамках имеющихся площадей и функционирующих сооружений.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области в рамках научного проекта 17-45-510205 «Дефосфотация коммунальных стоков в условиях снижения водопотребления».

Литература

1. Артемкина, Н. А., Горбачева, Т. Т. и Лукина, Н. В. (2008). Низкомолекулярные органические кислоты в почвенных водах лесов Кольского полуострова. *Лесоведение*, № 6, сс. 37–44.
2. Бульон, В. В. (2016). Новый взгляд на парадигму фосфорного контроля в лимнологии. *Успехи современной биологии*, т. 136, № 3, сс. 311–318.
3. Горбачева, Т. Т. и Майоров, Д. В. (2018). Пробное коагулирование осветленных коммунальных стоков в реактентном удалении фосфора. *Вестник современных исследований*, № 12.1 (27), сс. 504–508.
4. Горбачева, Т. Т. и Майоров, Д. В. (2018). Скорость хлопьеосаждения в осветленных коммунальных стоках при реактентном удалении фосфора. *Вестник современных исследований*, № 12.15 (27), сс. 83–87.
5. Данилович, Д. А. (2017). Биологическое удаление фосфора практически до нуля: отечественный опыт. Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения, № 2, сс. 22–27.
6. Данилович, Д. А., Козлов, М. Н., Мойжес, О. В., Шотина, К. В. и Ершов, Б. А. (2008). Результаты работы крупномасштабных сооружений биологической очистки от соединений азота и фосфора. Сборник статей и публикаций. М.: МГУП Мосводоканал.
7. Данилович, Д. А., Эпов, А. Н. и Канунникова, М. А. (2015). Анализ данных работы очистных сооружений российских городов — основа для технологического нормирования. Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения, № 3–4, сс. 18–28.
8. Келль, Л. С., Середя, М. В. и Казаков, А. В. (2016). Усовершенствованная технология биологического безреактентного глубокого удаления фосфора. Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения, № 4, сс. 10–14.
9. Коваленко, А. А., Хабарова, Е. И., Швец, В. И., Жмур, Н. С. и Саунин, Л. В. (2013). Обустройство процесса ацидификации сырого осадка и оценка его эффективности по интенсификации денитрификации, дефосфотации при очистке

сточных вод сложного промышленного состава. *Экология и промышленность России*, № 9, сс. 24–29.

10. Козлов, М. Н., Стрельцов, С. А., Кевбрина, М. В., Гаврилин, А. М. и Газизова, Н. Г. (2013). Ацидофикация (преферментация) как метод стабилизации сырого осадка при очистке сточных вод от биогенных элементов. *Водоснабжение и санитарная техника*, № 5, сс. 13–20.

11. Мешенгиссер, Ю. М. (2012). Ретехнологизация сооружений очистки сточных вод. М.: ООО «Издательский Дом «Вокруг цвета», 211 с.

12. Муравьев, А. Г. (2004). Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. 3-е изд. СПб: Крисмас+, 248 с.

13. Пахомов, А. Н., Стрельцов, С. А., Козлов, М. Н., Харькина, О. В., Хамидов, М. Г., Ершов, Б. А. и Белов, Н. А. (2010). Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора. *Водоснабжение и санитарная техника*, № 10-1, сс. 35–41.

14. Терентьева, И. А., Кашулин, Н. А. и Денисов, Д. Б. (2017). Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра. *Вестник Мурманского государственного технического университета*, т. 20, № 1–2, сс. 197–204. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-197-204.

15. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (2015). ИТС 10–2015). Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Бюро НДТ, 377 с.

16. Харькин, С. В. (2013). Организация процессов удаления фосфора из сточных вод. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, № 11 (71), сс. 46–52.

17. Converti, A., Rovatti, M. and Del Borghi, M. (1995). Biological removal of phosphorus from wastewaters by alternating aerobic and anaerobic conditions. *Water Research*, vol. 29, issue 1, pp. 263–269. DOI: 10.1016/0043-1354(94)E0118-P.

18. Helmer, C. and Kunst, S. (1998). Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants. *Water Science Technology*, vol. 37, issue 4–5, pp. 531–539. DOI: 10.2166/wst.1998.0714.

19. Mulkerrins, D., Dobson, A. D. W. and Colleran, E. (2004). Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters. *Environment International*, vol. 30, issue 2, pp. 249–259. DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00177-6.

20. Randall, A. A., Chen, Y. and McCue, T. (2004). The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid. *Water Research*, vol. 38, issue 1, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.watres.2003.08.025.

21. Schaaf, W., Weisdorfer, M. and Huettl, R. F. (1995). Soil solution chemistry and element budgets of three Scots pine ecosystems along a deposition gradient in north-eastern Germany. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 85, issue 3, pp. 1197–1202. DOI: 10.1007/BF00477144.

References

1. Artemkina, N. A., Gorbacheva, T. T. and Lukina, N. V. (2008) Low-molecular organic acids in soil water in forests of the Kola Peninsula. *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*, No. 6, pp. 37–44.

2. Boulion, V.V. (2016). A new insight into the paradigm of phosphorus control in limnology. *Uspekhi Sovremennoi Biologii*, vol. 136, No. 3, pp. 311–318.
3. Gorbacheva, T. T. and Mayorov, D. V. (2018). Trial coagulation of the clarified municipal sewage in reagent phosphorus removal. *Vestnik Sovremennykh Issledovaniy*, No. 12.1 (27), pp. 504–508.
4. Gorbacheva, T. T. and Mayorov, D. V. (2018). Speed of flocculation in the clarified municipal sewage during reagent phosphorus removal. *Vestnik Sovremennykh Issledovaniy*, No. 12.15 (27), pp. 83–87.
5. Danilovich, D. A. (2017). Biological phosphorus removal to near zero: Russian experience. *Best Available Technologies (NDT) Journal*, No. 2, pp. 22–27.
6. Danilovich, D. A., Kozlov, M. N., Moyzhes, O. V., Shotina, K. V. and Ershov, B. A. (2008). *Results of operation of large facilities for biological cleaning from nitrogen and phosphorus compounds. Collection of articles and publications.* Moscow: Moscow State Unitary Enterprise Mosvodokanal.
7. Danilovich, D. A., Epov, A. N. and Kanunnikova, M. A. (2015). Analysis of treatment facilities' operation in Russian cities as a basis for technological standardization. *Best Available Technologies (NDT) Journal*, No. 3–4, pp. 18–28.
8. Kell, L. S., Sereda, M. V. and Kazakov, A. V. (2016). Advanced technology for deep biological reagentless removal of phosphorus. *Best Available Technologies (NDT) Journal*, No. 4, pp. 10–14.
9. Kovalenko, A. A., Khabarova, E. I., Shvets, V. I., Zhmur, N. S. and Saunin, L. V. (2013). Arrangement of crude bottom's acidification and assessment of it efficiency on nitrification de phosphotation under waste waters treatment. *Ecology and Industry of Russia*, No. 9, pp. 24–29.
10. Kozlov, M. N., Streltsov, S. A., Kevbrina, M. V., Gavrilin, A. M. and Gazizova, N. G. (2013). Acidification (prefermentation) as a method of raw sludge stabilization in the process of nutrients removal from wastewater. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 5, pp. 13–20.
11. Meshengisser, Yu. M. (2012). *Retechnologization of waste water treatment facilities.* Moscow: OOO Publishing House "Vokrug tsвета", 211 p.
12. Muravyev, A. G. (2004). *Guide for determination of water quality indicators using field methods.* 3rd edition. Saint Petersburg: Christmas+, 248 p.
13. Pakhomov, A. N., Streltsov, S. A., Kozlov, M. N., Kharkina, O. V., Khamidov, M. G., Ershov, B. A. and Belov, N. A. (2010) Experience of operation of facilities of wastewater biological treatment for nitrogen and phosphorus compounds. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 10–1, pp. 35–41.
14. Terent'eva, I. A., Kashulin, N. A. and Denisov, D. B. (2017). Estimate of the trophic status of subarctic Imandra lake. *Vestnik of MSTU*, vol. 20, No. 1–2, pp. 197–204. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-197-204.
15. Federal Agency on Technical Regulation and Metrology (2015). *Information and Technical Reference Book ITS 10–2015). Waste water treatment using centralized water disposal systems in settlements and city districts.* Moscow: NDT Bureau, 377 p.
16. Kharkin, S. V. (2013). Arrangement of processes for phosphorus removal from sewage. *Water Purification. Water Treatment. Water Supply*, No. 11 (71), pp. 46–52.
17. Converti, A., Rovatti, M. and Del Borghi, M. (1995). Biological removal of phosphorus from wastewaters by alternating aerobic and anaerobic conditions. *Water Research*, vol. 29, issue 1, pp. 263–269. DOI: 10.1016/0043-1354(94)E0118-P.
18. Helmer, C. and Kunst, S. (1998). Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants. *Water Science Technology*, vol. 37, issue 4–5, pp. 531–539. DOI: 10.2166/wst.1998.0714.
19. Mulkerrins, D., Dobson, A. D. W. and Colleran, E. (2004). Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters. *Environment International*, vol. 30, issue 2, pp. 249–259. DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00177-6.
20. Randall, A. A., Chen, Y. and McCue, T. (2004). The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid. *Water Research*, vol. 38, issue 1, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.watres.2003.08.025.
21. Schaaf, W., Weisdorfer, M. and Huettl, R. F. (1995). Soil solution chemistry and element budgets of three Scots pine ecosystems along a deposition gradient in north-eastern Germany. *Water; Air; and Soil Pollution*, vol. 85, issue 3, pp. 1197–1202. DOI: 10.1007/BF00477144.

Авторы

Горбачева Тамара Тимофеевна, канд. биол. наук
Институт проблем промышленной экологии Севера
ФИЦ «Кольский научный центр» РАН, г. Апатиты, Россия
E-mail: gorbacheva@inep.ksc.ru

Евшин Павел Николаевич

АО «Апатитыводоканал», г. Апатиты, Россия
E-mail: pevshin@apvod.ru

Горбачев Алексей Анатольевич

АО «Апатитыводоканал», г. Апатиты, Россия
E-mail: agorbachev@apvod.ru

Артемкина Наталья Александровна, канд. хим. наук
Институт проблем промышленной экологии Севера
ФИЦ «Кольский научный центр» РАН, г. Апатиты, Россия
E-mail: artemkina@inep.ksc.ru

Authors

Gorbacheva Tamara Timofeevna, Ph. D. in Biology
Institute of North Industrial Ecology Problems, Apatity, Russia
E-mail: gorbacheva@inep.ksc.ru

Evshin Pavel Nikolaevich

АО «ApatityVodokanal», Apatity, Russia
E-mail: pevshin@apvod.ru

Gorbachev Alexey Anatol'evich

АО «ApatityVodokanal», Apatity, Russia
E-mail: agorbachev@apvod.ru

Artemkina Natalia Alexandrovna, Ph. D. in Chemistry
Institute of North Industrial Ecology Problems, Apatity, Russia
E-mail: artemkina@inep.ksc.ru