

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.33/.34.033(1-17)-047.37 DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163

*Е.И. ВЯЛКОВА¹, Е.С. ГЛУЩЕНКО¹, Т.С. ВЕЛИЖАНИНА¹,
Е.Ю. ОСИПОВА²,*

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД СЕВЕРНЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Значительная часть территории Российской Федерации находится в арктическом и субарктическом климатическом поясе, что обуславливает специфику проектирования, строительства и эксплуатации сетей и сооружений системы водоотведения в этих населенных пунктах.

На сегодняшний день большая часть малых населенных пунктов в этих регионах либо не оборудованы канализационными очистными сооружениями, либо действующие станции биологической очистки работают неудовлетворительно. В качестве альтернативы рассматривается вариант устройства физико-химической очистки, которая более устойчива к суровому климату и залповым сбросам стоков, чем биологическая очистка.

В статье представлены результаты исследования по полной замене блока биологической очистки на физико-химическую в составе канализационных очистных сооружений. В качестве основных ступеней очистки выбраны коагуляция, фильтрование на механических фильтрах, окисление с последующей двухступенчатой доочисткой на механических и сорбционных фильтрах.

В результате проведенного лабораторного эксперимента были достигнуты следующие эффекты снижения концентрации проблемных загрязнений: 90,8 % – по ХПК, 74 % – по аммонии, 82,5 % – по нитратам.

Ключевые слова: северные населенные пункты; сточные воды; физико-химическая очистка; биологическая очистка бытовых сточных вод; коагуляция; окисление; эффекты очистки сточных вод.

Для цитирования: Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Велижанина Т.С., Осипова Е.Ю. Анализ физико-химических методов очистки бытовых сточных вод северных населенных пунктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 152–163.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163

E.I. VIALKOVA¹, E.S. GLUSHCHENKO¹, T.S. VELIZHANINA¹,
E.Y. OSIPOVA²,

¹Tyumen State Oil and Gas University

²Tomsk State University of Architecture and Building

ANALYSIS OF PHYSICOCHEMICAL WASTEWATER TREATMENT IN ARCTIC ZONES

The large part of the Russian Federation locates in arctic and subarctic climatic zones, which determine the specificity of design, construction and operation of sewage systems of these regions. Nowadays, the most part of small Arctic towns has no wastewater treatment facilities, while the available biological treatment facilities do not work properly. An alternative way is physicochemical treatment, which is more resistant to severe climate and volley wastewater discharge than biological treatment. The paper presents the research results of total change the biological into physicochemical treatment. The main stages of such a treatment include coagulation, filtration, oxidation and two-stage filtration (mechanical and absorption). The experiments show a 90.8% decrease in the concentration of chemical oxygen and a 74% and 82.5% decrease in nitrates and ammonium.

Keywords: Arctic zone; wastewater; physicochemical treatment; coagulation; oxidation; wastewater treatment.

For citation: Vialkova E.I., Glushchenko E.S., Velizhanina T.S., Osipova E.Y. Isledovanie fiziko-khimicheskikh metodov ochistki bytovykh stochnykh vod severnykh naselennykh punktov [Analysis of physicochemical wastewater treatment in Arctic zones]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 1. Pp. 152–163. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163

Достаточно большая часть территории России находится в арктических (или приближенных к арктическим) условиях, в том числе и север Западной Сибири, где расположена Тюменская область – самая большая область в России. Суровые климатические условия, мерзлые подвижные грунты, болотистая местность создают серьезные проблемы при проектировании, строительстве и эксплуатации различных объектов. В Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах имеется более 100 небольших муниципальных образований, расположенных в отдалении от крупных центров, имеющих децентрализованную систему водоотведения. Хозяйственно-бытовые сточные воды накапливаются в септиках и периодически вывозятся и сливаются на рельеф или в водные объекты без всякой очистки. Такой подход отрицательно влияет на состояние окружающей природной среды.

Эксплуатация малогабаритных канализационных очистных сооружений в небольших поселениях северной климатической зоны весьма проблематична. Низкие температуры поступающих на сооружения стоков зимой (от +2 до +7 °С) существенно влияют на биохимические процессы очистки. Ситуация осложняется тем, что исходные стоки имеют повышенную концентрацию органических веществ по причине низкой нормы водоотведения на одного жителя (80–90 л/сут) и инфильтрации воды из негерметичных септиков в грунт в процессе накопления. Средняя эффективность действующих очистных сооружений существенно зависит от производительности станции и составляет в лучшем случае от 70 до 90 % [1].

В европейских странах большое внимание уделено проблеме функционирования малых канализационных очистных станций, комплексной оценке их работы и разработке государственных программ по их реконструкции [2–4]. Например, в северных поселениях Канады и Норвегии широкое распространение в качестве метода очистки сточных вод получили биопруды и биоплато, которые в экстремально холодных условиях работают в режиме периодического сброса стоков. Кроме того, биоплато могут выступать в качестве доочистки после аэробных биофильтров, что способствует снижению БПК на 96 %, азота на 60 %, фосфора на 90 % [5–7]. Ряд исследователей [8–12] в качестве альтернативного варианта биологической аэробной очистке предлагают использовать аэробные технологии или биоэлектрохимическое окисление. При этом дополнительно выделяется побочный продукт – биогаз, который можно использовать в качестве источника энергии. Среди биоэлектрохимических технологий для удаления органических веществ получили распространение микробные топливные и микробные электролизные элементы, при этом было достигнуто снижение показателя ХПК на 80 %. Еще одним вариантом обработки сточных вод являются блочно-модульные станции, например, в Швеции и Норвегии. В основе работы таких станций могут лежать как биохимические аэробные процессы (SBR-реактор, аэротенк, биофильтр), так и физико-химические процессы. Однако, согласно авторам [11, 12], часто выходные концентрации основных загрязнений не соответствуют заявленным и требуемым нормативным значениям.

Значительные исследования ведутся сегодня по разработкам эффективных физико-химических методов очистки сточных вод, которые более просты в эксплуатации в северном климате [13–22]. В качестве основных окислительных технологий можно выделить: озонирование + пероксид водорода (возможно в присутствии катализатора); электрохимические методы окисления (электрокоагуляция, электрофлотация); процесс Фентона; озонирование + ультрафиолетовое излучение.

Однако при реализации вышеуказанных методов не всегда удается достичь требуемого эффекта очистки хозяйственно-бытовых стоков по органическим загрязнениям. По опубликованным данным, практически во всех технологических схемах канализационных очистных сооружений (КОС), исключая биологические методы, возникают проблемы с ХПК и азотными группами. В большей степени физико-химические способы нашли применение для доочистки промышленных стоков с низким содержанием органики. В то же время данные методы имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционной биологической очисткой: хорошая восприимчивость к залповым сбросам стоков, более простая эксплуатация, эффективность при низких температурах воды.

В связи с вышесказанным целью данной работы является исследование эффективности физико-химических методов очистки бытовых сточных вод с последующей разработкой вариантов технологической схемы канализационных очистных сооружений, рекомендуемых к применению в небольших северных поселениях.

В качестве объекта исследования принята реальная сточная вода, отобранная в приемном резервуаре сливной станции, куда привозятся стоки не-

больших поселков. В числе контролируемых показателей качества очистки воды выбраны наиболее проблемные: рН; концентрация взвешенных веществ; химическое потребление кислорода; концентрация ионов аммония NH_4^+ ; концентрация нитрат-ионов NO_3^- .

Данные показатели качества стоков определялись в исходных пробах до обработки и в пробах после каждого этапа очистки по стандартным методикам.

Водородный показатель определялся потенциометрическим методом с помощью рН метра рН-150 МИ.

Концентрация взвешенных веществ определялась гравиметрическим методом путем измерения массы веществ, задержанных на бумажном фильтре.

Определение ХПК, концентрации ионов аммония и нитрат-ионов осуществлялось фотометрическим методом по методике. При определении ХПК в стеклянные вials помещали 3 см^3 смеси бихромата калия и сернокислого серебра, растворенного в серной кислоте, $0,2 \text{ см}^3$ катализатора сульфата ртути и 2 см^3 исследуемой пробы. После чего содержимое вials выдерживали 2 ч при температуре 150°C в термореакторе «Термион», а затем после охлаждения фотометрировали на анализаторе жидкости «Флюорат-0,2М».

Концентрации ионов аммония и нитрат-ионов определялись фотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ 5400ВИ. Для определения концентрации ионов аммония к 50 см^3 пробы добавляли по 1 см^3 калия-натрия виннокислого и реактива Несслера, затем перемешивали и через 10 мин измеряли концентрацию NH_4^+ . При определении концентрации нитратов 10 см^3 исходной воды смешивали с 2 см^3 салициловой кислоты и выпаривали в фарфоровой чашке на водяной бане. После охлаждения к сухому остатку добавляли 2 см^3 раствора серной кислоты, 10 см^3 дистиллированной воды и 15 см^3 смеси сегнетовой соли и гидроксида натрия. Содержимое помещали в мерную колбу и доводили объем до 50 см^3 . Полученный раствор фотометрировали.

Проба исследуемой воды отбиралась в 5-литровые бутылки, затем в исходной воде определялись все требуемые показатели. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества исходной сточной воды

Показатель	Ед. изм.	Результат измерения
рН	ед. рН	7,34
Взвешенные вещества	мг/дм ³	977
ХПК	мгО/дм ³	1220
Ион аммония	мг/дм ³	151,0
Нитрат-ионы	мг/дм ³	5,10

Согласно данным таблицы, концентрация загрязнений по ряду показателей значительно превышает значения, характерные для хозяйственно-бытовых сточных вод больших населенных пунктов.

С целью исследования физико-химических методов была предложена технологическая схема очистки сточных вод, заключающаяся в первичной коагуляции стоков (для снятия взвешенных веществ и части органических

веществ) с последующим окислением реагентами (для удаления оставшейся органики и загрязнений азотной группы).

Для выбора оптимальной дозы коагулянта было рассмотрено пять типов коагулянтов: три алюмосодержащих и два железосодержащих:

- сернокислый алюминия, 3,64%-й раствор;
- оксихлорид алюминия, 3,53%-й раствор;
- полиоксихлорид алюминия «Аква-Аурат 30», 5%-й раствор;
- сернокислое железо, 5%-й раствор;
- хлорное железо, 5%-й раствор.

В качестве флокулянтов были выбраны:

- полиакриламид, 0,5%-й раствор;
- Praestol 650 TR, 1%-й раствор.

Исходная вода помещалась в цилиндр объемом 250 см³, затем добавлялся коагулянт, а через 2 мин – флокулянт. После интенсивного перемешивания в течение 2 мин вода оставалась в покое на 20 минут для начала процесса хлопьеобразования и дальнейшего осаждения хлопьев. Для удаления взвешенных веществ пробы воды фильтровались через песчаную загрузку (диаметр фракций песка 0,8–2 мм). После фильтрования в воде определялись требуемые показатели качества. Результаты пробной коагуляции приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

**Показатели сточной воды после коагуляции с применением
в качестве коагулянта сернокислого алюминия (СА)**

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	30	50	90	200
XПК, мгО/дм ³	1078	556	440	420
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	149,5	152	151	148
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	1,79	1,38	2,13	1,56

Таблица 3

**Показатели сточной воды после коагуляции с применением
в качестве коагулянта оксихлорида алюминия (ОХА)**

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	30	50	90	200
XПК, мгО/дм ³	504	610	508	750
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	152,5	150,5	151	152,5
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	2,06	1,81	1,30	0,78

Таблица 4

**Показатели сточной воды после коагуляции с применением
в качестве коагулянта полиоксихлорида алюминия («Аква-Аурат 30»)**

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	30	50	90	200
XПК, мгО/дм ³	714	436	480	706
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	148	150,5	150,5	148
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	1,21	1,62	1,89	1,19

На рис. 1 представлен график зависимости концентрации ХПК от дозы для алюмосодержащих коагулянтов.

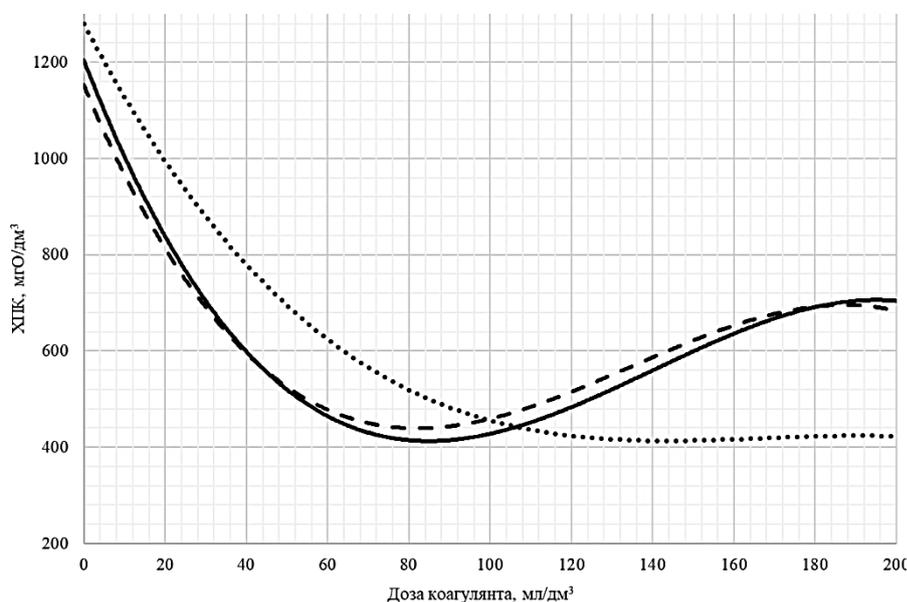


Рис. 1. График зависимости концентрации ХПК в сточной воде от дозы коагулянта для различных реагентов

Согласно полученным результатам, наибольший эффект снижения химического потребления кислорода (64,2 %) наблюдался при добавлении в сточную воду коагулянта «Аква-Аурат 30» дозой 50 мг/дм³. В этом случае наблюдалось и снижение концентрации нитратов: при оптимальной дозе коагулянта эффект удаления нитрат-ионов из воды составил 68,2 %. Концентрация ионов аммония оставалась неизменной.

При использовании железосодержащих коагулянтов (сернокислое и хлорное железо) при дозе 50 и 90 мг/дм³ в течение 20 мин не наблюдалось образования видимых хлопьев. При добавлении хлорного железа дозой 120 мг/дм³ начинали образовываться устойчивые хлопья; для образования устойчивых хлопьев при использовании сернокислого железа осуществлялось одновременное добавление коагулянта дозой 120 мг/дм³ и подкисление до pH = 4,74. Дальнейшее исследование процесса коагуляции с применением железосодержащих коагулянтов не производилось ввиду экономической нецелесообразности их применения для данных стоков.

С целью интенсификации процесса коагуляции в пробы воды добавлялись растворы флокулянтов. Выбор типа флокулянта и оптимальной его дозы осуществлялся на основе результатов эксперимента, представленных в табл. 5 и 6.

Согласно полученным данным, флокулянт способствует дополнительному снижению концентрации органических веществ в воде на 4–6 %. Наилучшее снижение ХПК наблюдалось при дозе полиакриламида 1 мг/дм³ – 70,1 %. Эффект очистки сточных вод от нитратов составил при этом 75,9 %.

Удаление взвешенных веществ произошло на 96 %. рН стоков после фильтрования равен 6,58.

Таблица 5

**Снижение ХПК в процентном соотношении
относительно исходной концентрации в сточной воде**

Флокулянт	Исходное значение ХПК, мгО/дм ³	Доза флокулянта			
		0,5 мг/дм ³		1 мг/дм ³	
		ХПК, мгО/дм ³	Эффект очистки	ХПК, мгО/дм ³	Эффект очистки
Полиакриламид	1220	429	64,8 %	365	70,1 %
Praestol 650TR	1220	392	67,9 %	403	67 %

Таблица 6

**Снижение нитратов в процентном соотношении
относительно исходной концентрации в сточной воде**

Флокулянт	Исходное значение NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	Доза флокулянта			
		0,5 мг/дм ³		1 мг/дм ³	
		NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	Эффект очистки	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	Эффект очистки
Полиакриламид	5,1	1,54	69,8 %	1,57	69,2 %
Praestol 650TR	5,1	1,25	75,5 %	1,23	75,9 %

Таким образом, на основании результатов пробной коагуляции можно сделать вывод о том, что оптимальная доза коагулянта «Аква-Аурат 30» составляет 50 мг/дм³, флокулянта полиакриламида – 1 мг/дм³.

Для удаления из сточной воды оставшейся части органических веществ, а также удаления загрязнений, обусловленных соединениями азотной группы, осуществлялось окисление профильтрованной воды. В качестве реагента-окислителя рассматривались три варианта: перманганат калия; гипохлорит натрия; пероксид водорода + озонирование (процесс «Пероксон»).

При проведении окисления в профильтрованную сточную воду объемом 0,5 дм³ добавлялась требуемая доза реагента и обеспечивался контакт воды и окислителя в течение 20 мин. По истечении данного времени сточная вода проходила двухступенчатое фильтрование на механических песчаных фильтрах (диаметр фракции загрузки 1 мм) и сорбционном угольном фильтре. Результаты окисления сточных вод перманганатом калия (концентрация вводимого реагента 0,02 моль/дм³) и последующего двухступенчатого фильтрования представлены в табл. 7.

Таблица 7

Окисление сточных вод перманганатом калия

Показатель	Доза, мг/дм ³			
	5	10	20	50
рН	8,87	8,87	8,85	8,82
ХПК, мгО/дм ³	205	112	178	167
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	106,7	39,3	98,3	110,6
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	5,12	0,89	0,70	1,69

Согласно таблице, оптимальной дозой перманганата калия является доза 10 мг/дм³, при которой достигается эффект снижения ХПК 90,8 %, аммония 74 %, нитратов 82,5 %. рН стоков после двухступенчатого фильтрования составил 8,87, концентрация остаточного марганца в воде 0,36 мг/дм³.

Для гипохлорита натрия и пероксида водорода + озонирование было проведено пробное исследование со следующими дозами:

– доза гипохлорита натрия по активному хлору – 20 мг/дм³, время контакта – 20 мин;

– доза пероксида водорода – 100 мг/дм³, после 10 мин контакта – озонирование (производительность по озону 400 мг/ч), время озонирования – 20 мин.

Результаты пробных исследований приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты пробного исследования гипохлорита натрия и пероксида водорода + озонирование

Окислитель	ХПК	
	Остаточная концентрация, мгО/дм ³	Эффект удаления, %
Гипохлорит натрия	208	82,9
Пероксид водорода + озонирование	258	78,8

По результатам пробного окисления эффект снижения ХПК меньше (80 %) по сравнению с окислением перманганатом калия. В дальнейшем предполагается более детальное исследование данных способов окисления.

На основании проведенного исследования предлагаются следующие технологические схемы очистки сточных вод малых населенных пунктов в арктических регионах (рис. 2 и 3).

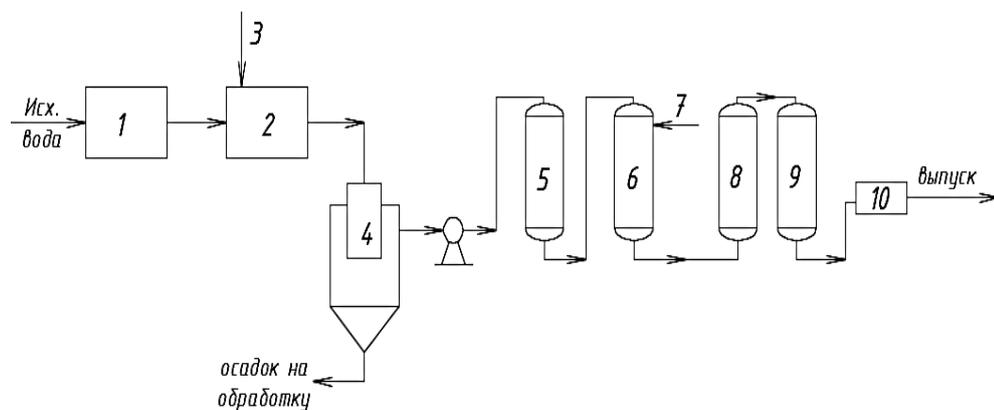


Рис. 2. Технологическая схема А (при добавлении перманганата калия/гипохлорита натрия):

1 – сливная станция; 2 – смеситель; 3 – ввод коагулянта и флокулянта; 4 – вертикальный отстойник со встроенной камерой хлопьеобразования; 5 – механический фильтр; 6 – контактная камера (для обеспечения времени контакта окислителя с водой); 7 – ввод окислителя (перманганат калия или гипохлорит натрия); 8 – механический фильтр; 9 – сорбционный угольный фильтр; 10 – обеззараживание

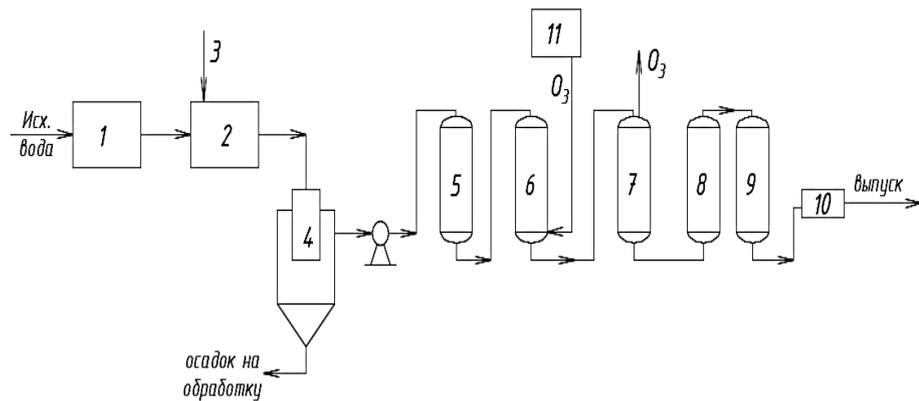


Рис. 3. Технологическая схема Б (при озонировании):

1 – сливная станция; 2 – смеситель; 3 – ввод коагулянта и флокулянта; 4 – вертикальный отстойник со встроенной камерой хлопьеобразования; 5 – механический фильтр; 6 – контактная камера (для обеспечения времени контакта озона с водой); 7 – дегазатор (для удаления избытка озона из воды); 8 – механический фильтр; 9 – сорбционный угольный фильтр; 10 – обеззараживание; 11 – блок подготовки озono-воздушной смеси

Приведенные схемы являются наиболее эффективными в отношении очистки бытовых сточных вод. Кроме этого, основываясь на результатах проведенной научно-исследовательской работы по изучению возможности замены биологического этапа очистки хозяйственно-бытовых сточных вод малых населенных пунктов физико-химическими методами, можно сделать следующие выводы:

В небольших населенных пунктах, расположенных в районах Крайнего Севера или приравненных к ним условиях, биологическая очистка сточных вод является сложно реализуемым процессом в связи с суровыми климатическими условиями, неравномерностью подачи стоков на очистку, сложностью эксплуатации, отсутствием квалифицированного персонала и другими причинами.

Опубликованные исследования отечественных и зарубежных ученых подтверждают возможность полной замены биологического этапа очистки стоков на физико-химические методы: коагуляцию, окисление и др. Это не противоречит действующим нормативам (СП 32.13330.2018).

По результатам лабораторного исследования, представленного в данной статье, предложены две возможные технологические схемы физико-химической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод:

I. Коагуляция – Осветление на механических фильтрах – Химическое окисление перманганатом калия или гипохлоритом натрия – Доочистка на механических и сорбционных фильтрах – Обеззараживание.

II. Коагуляция – Осветление на механических фильтрах – Окисление пероксидом водорода – Озонирование – Доочистка на механических и сорбционных фильтрах – Обеззараживание.

Как наиболее эффективные по результатам пробной коагуляции были приняты коагулянт полиоксихлорид алюминия «Аква-Аурат 30») (доза 50 мг/дм³) и флокулянт полиакриламид (доза 1 мг/дм³).

Снижение ХПК произошло на 90,8 % при окислении стоков перманганатом калия, на 78–83 % при окислении гипохлоритом натрия и совместном применении пероксида водорода и озона. Снижение концентрации взвешенных веществ во всех случаях достигается на 93–96 %.

Несмотря на значительное снижение содержания органических веществ в стоках, не удалось достичь концентраций, рекомендуемых для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения.

На основании вышеизложенного предполагается дальнейшее более глубокое исследование динамики снижения загрязнений в сточных водах в процессе физико-химической очистки. Планируется экспериментальная проверка других способов обработки воды, а также изменение доз вводимых реагентов и очередности их введения. Необходимо отметить, что получаемый в процессе реагентной обработки осадок также подлежит исследованию на класс экологической опасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вялкова Е.И.* Моделирование процессов очистки сточных вод малых населенных пунктов // Проектирование, строительство топливно-энергетического комплекса (опыт и инновации) : материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 102–107.
2. *Кофман В.Я.* Водоснабжение и водоотведение в Арктическом регионе: Гренландия, Канада, США (обзор) // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 6. С. 56–64.
3. *Life in Greenland, and Its Supporting Infrastructure* // Journal of the Northern Territories Water and Waster Association. – URL: http://ntwwa.com/wp-content/uploads/2018/03/NTWWA_Journal_2017.pdf (дата обращения: 21.11.2019).
4. *Gunnarsdóttir R., Jenssen P.D., Jensen P.E., Villumsen A., Kallenborn R.* A review of wastewater handling in the Arctic with special reference to Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) and microbial pollution // *Ecological Engineering*. 2013. V. 50. P. 76–85.
5. *Heaven S., Lock A.C., Pak L.N., Rspaev M.K.* Waste stabilisation ponds in extreme continental climates: a comparison of design methods from the USA, Canada, northern Europe and the former Soviet Union // *Water Science & Technology*. 2003. V. 48. № 2. P. 25–33.
6. *Quiroga F.J.T.* Waste Stabilization Ponds for Waste Water Treatment, Anaerobic Pond. URL: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/Fernando%20J.%20Trevino%20Quiroga.pdf> (дата обращения: 25.11.2019).
7. *Paruch A.M., Mæhlum T., Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojski A.* Rural domestic wastewater treatment in Norway and Poland: Experiences, cooperation and concepts on the improvement of constructed wetland technology // *Water Science & Technology*. 2011. V. 63. P. 776–781.
8. *Gao H., Scherson Y.D., Wells G.F.* Towards energy neutral wastewater treatment: Methodology and state of the art // *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2014. V. 16. P. 1223–1246.
9. *Du Z., Li H., Gu T.* A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy // *Biotechnology Advances*. 2007. V. 25. P. 464–482.
10. *Liu H., Ramnarayanan R., Logan B.* Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell // *Environ. Sci. Technol.* 2004. V. 38. P. 2281–2285.
11. *Кофман В.Я.* Водоснабжение и водоотведение в Арктическом регионе: современные технические решения (обзор) // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 7. С. 56–64.
12. *LaBarge N., Yilmazel Y.D., Hong P., Logan B.* Effect of pre-acclimation of granular activated carbon on microbial electrolysis cell startup and performance // *Bioelectrochemistry*. 2007. V. 113. P. 20–25.
13. *Stasinakis A.S.* Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – a mini review // *Global NEST Journal*. 2008. V. 10. P. 376–385.

14. Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery // *Catalysis Today*. 1997. V. 53. P. 51–59.
15. Deng Y., Zhao R. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment // *Curr Pollution Rep.* 2015. V. 1. P. 167–176.
16. Oturan M.A., Aaron J. Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. V. 44. P. 2577–2641.
17. Brillas E., Casado J. Aniline degradation by Electro-Fenton and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater treatment // *Chemosphere*. 2002. V. 47. P. 241–248.
18. Chong M.N., Jin B., Chow C.W.K., Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review // *Water research*. 2010. V. 44. P. 2997–3027.
19. Желовицкая А.В., Ермолаева Е.А., Дресвянников А.Ф. Окисление органических соединений с помощью гидроксид-радикала, генерируемого в растворах химическим и электрохимическим методами // *Вестник Казанского университета*. 2008. С. 211–229.
20. Brillas E., Mur E., Sauleda R., Saánchez L., Peral J., Domeñech X., Casado J. Aniline mineralization by AOP's: anodic oxidation, photocatalysis, electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes // *Applied Catalysis B: Environmental*. 1998. V. 16. P. 31–42.
21. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment // *Separation and Purification Technology*. 2004. V. 38. P. 11–41.
22. Sarala C. Domestic Wastewater Treatment by Electrocoagulation with Fe-Fe Electrodes // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2012. V. 3. P. 530–533.

REFERENCES

1. Вялкова Е.И. Моделирование процессов очистки сточных вод малых населенных пунктов [Modeling of processes of wastewater treatment in small towns]. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции “Проектирование, строительство топливно-энергетического комплекса (опыт и инновации)” (Proc. All-Russ. Sci. Conf. ‘Design and Construction of Energy Economy (Experience and Innovations))*. 2019. Pp. 102–107. (rus)
2. Kofman V.Ia. Vodosnabzhenie i vodootvedenie v Arkticheskom regione: Grenlandiya, Kanada, SSHA (obzor) [Water supply and wastewater disposal in the Arctic region: Greenland, Canada, USA (a review)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2019. No. 6. Pp. 56–64. (rus)
3. Life in Greenland, and its supporting infrastructure. *Journal of the Northern Territories Water and Waster Association*. Available: http://ntwwa.com/wp-content/uploads/2018/03/NTWWA_Journal_2017.pdf (accessed October 21, 2019).
4. Gunnarsdóttir R., Jenssen P.D., Jensen P.E., Villumsen A., Kallenborn R. A review of wastewater handling in the Arctic with special reference to pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and microbial pollution. *Ecological Engineering*. 2013. V. 50. Pp. 76–85.
5. Heaven S., Lock A.C., Pak L.N., Rspaev M.K. Waste stabilisation ponds in extreme continental climates: a comparison of design methods from the USA, Canada, northern Europe and the former Soviet Union. *Water Science and Technology*. 2003. V. 48. No. 2. Pp. 25–33.
6. Quiroga F.J.T. Waste stabilization ponds for waste water treatment, anaerobic pond. Available: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/Fernando%20J.%20Trevino%20Quiroga.pdf> (accessed October 25, 2019).
7. Paruch A.M., Mæhlum T., Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Ostojski A. Rural domestic wastewater treatment in Norway and Poland: Experiences, cooperation and concepts on the improvement of constructed wetland technology. *Water Science and Technology*. 2011. V. 63. Pp. 776–781.
8. Gao H., Scherson Y.D., Wells G.F. Towards energy neutral wastewater treatment: Methodology and state of the art. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2014. V. 16. Pp. 1223–1246.
9. Du Z., Li H., Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*. 2007. V. 25. Pp. 464–482.
10. Liu H., Ramnarayanan R., Logan B. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. 2004. V. 38. Pp. 2281–2285.

11. *Kofman V.Ia.* Vodosnabzhenie i vodootvedenie v Arkticheskom regione: sovremennye tekhnicheskie resheniya (obzor) [Water supply and wastewater disposal in the Arctic Region: advanced technical solution (a review)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2019. No. 7. Pp. 56–64. (rus)
12. *LaBarge N., Yilmazel Y.D., Hong P., Logan B.* Effect of pre-acclimation of granular activated carbon on microbial electrolysis cell startup and performance. *Bioelectrochemistry*. 2007. V. 113. Pp. 20–25.
13. *Stasinakis A.S.* Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – a mini review. *Global NEST Journal*. 2008. V. 10. Pp. 376–385.
14. *Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R.* Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*. 1997. V. 53. Pp. 51–59.
15. *Deng Y., Zhao R.* Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*. 2015. V. 1. Pp. 167–176.
16. *Oturan M.A., Aaron J.* Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. V. 44. Pp. 2577–2641.
17. *Brillas E., Casado J.* Aniline degradation by Electro-Fenton and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater treatment. *Chemosphere*. 2002. V. 47. Pp. 241–248.
18. *Chong M.N., Jin B., Chow C.W.K., Saint C.* Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research*. 2010. V. 44. Pp. 2997–3027.
19. *Zhelovickaya A.V., Ermolaeva E.A., Dresvyannikov A.F.* Okislenie organicheskikh soedinenij s pomoshch'yu gidroksid-radikala, generiruemogo v rastvorah himicheskim i elektrohimicheskim metodami [Oxidation of organic compounds with hydroxide-radical chemically and electrochemically generated in solutions]. *Vestnik Kazanskogo universiteti*. 2008. Pp. 211–229. (rus)
20. *Brillas E., Mur E., Sauleda R., SaÁnchez L., Peral J., DomeÁnech X., Casado J.* Aniline mineralization by AOP's: anodic oxidation, photocatalysis, Electro-Fenton and Photoelectro-Fenton processes. *Applied Catalysis B: Environmental*. 1998. V. 16. Pp. 31–42.
21. *Chen G.* Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. 2004. V. 38. Pp. 11–41.
22. *Sarala C.* Domestic wastewater treatment by electrocoagulation with Fe-Fe electrodes. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2012. V. 3. Pp. 530–533.

Сведения об авторах

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, vyalkova-e@yandex.ru

Глуценко Екатерина Сергеевна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ekaterina.gluschenko.1997@mail.ru

Велижанина Татьяна Сергеевна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ya.tshmidt@yandex.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. геол.-минерал. наук., доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kyky60@bk.ru

Authors Details

Elena I. Vialkova, PhD, A/Professor, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, vyalkova-e@yandex.ru

Ekaterina S. Glushchenko, MSc, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, ekaterina.gluschenko.1997@mail.ru

Tatjana S. Velizhanina, MSc, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, ya.tshmidt@yandex.ru

Elena Y. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kyky60@bk.ru