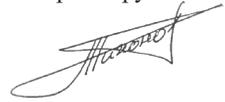


На правах рукописи



Тихонов Константин Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБРАТНОГО ОСМОСА С УТИЛИЗАЦИЕЙ
КОНЦЕНТРАТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СХЕМАХ ОЧИСТКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные
системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Первов Алексей Германович

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бутко Денис Александрович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Харькина Оксана Викторовна

кандидат технических наук, научный консультант ООО «Архитектура Водных Технологий»

Ведущая организация

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 декабря 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте https://24237705.samgtu.ru/uploads/redactor/tikhonov_diss.pdf.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тупицына Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка новых и совершенствование существующих методов и технологий очистки сточных вод является важной научно-прикладной задачей. Значимыми направлениями для исследований является повышение надежности работы очистных сооружений, уменьшение их строительных габаритов и сокращение расходов на их эксплуатацию. В мировой практике применение мембранных методов очистки сточной воды рассматривается как наиболее перспективное направление развития технологий очистки хозяйственно-бытовых, производственных сточных вод. Классические схемы очистки сточных вод, разработанные на основе биологических методов очистки, при работе в «сложных» условиях (низкие температуры, очень высокая неравномерность расхода, низкое БПК) не способны стабильно обеспечивать требуемое качество очистки. Применение физико-химических методов, основанных на дозировании в очищаемую воду химических реагентов с последующей ее фильтрацией, также не позволяет стабильно обеспечить необходимое качество очистки и сопряжено со сложной эксплуатацией. В то же время применение метода обратного осмоса способно обеспечить требуемую надежность протекания процесса и гарантировать необходимую степень очистки воды. Широкое применение этого метода сдерживается большой величиной образующегося концентрата, требующего утилизации и захоронения. В настоящей работе представлена технология, позволяющая решить такую актуальную задачу, как радикальное уменьшение объема образующегося концентрата, что позволяет сократить эксплуатационные расходы при использовании технологии обратного осмоса в технологических процессах очистки сточных вод. Разработка наилучшей доступной технологии на основе процесса обратного осмоса, позволяющей заменить собой технологии биологической и физико-химической очистки в условиях, где эти процессы являются малоэффективными, – задача чрезвычайно актуальная.

Степень разработанности темы. Применению мембранных аппаратов и их адаптации к условиям работы со сточными водами посвящены работы зарубежных ученых: Val Frenkel, Mark Wilf, Gram Pierce (США), Anthony Fane (Австралия), Manuel del Pino (Испания), а также отечественных специалистов: Ф. Н. Карелина, Ю. И. Дытнерского, Г. Г. Каграманова, А. А. Свитцова, А. Г. Перова – и многих других отечественных и зарубежных ученых. В России научный центр ОАО «Мосводоканал» проводит исследовательские работы, связанные с внедрением мембранных технологий в проекты по очистке сточных вод.

Основная часть существующих работ связана с исследованием ультрафильтрационных мембран, используемых либо для доочистки биологически очищенного стока, либо для отделения активного ила от очищаемой воды (мембранный биореактор), тогда как применение обратного осмоса для очистки сточной воды освещено крайне мало, а методики расчета установок обратного осмоса для работы в условиях очистки бытовых сточных вод на настоящий момент не существует.

Объект исследования. Процессы очистки сточных вод различного состава по технологии обратного осмоса и образование концентрата. Мембранные обратноосмотические и нанофильтрационные модули. Процесс сокращения объемов получаемого концентрата.

Предмет исследования. Проведение опытных и теоретических исследований по определению характеристик работы мембранных установок в процессе очистки

сточных вод от биогенных элементов и загрязнений, характеризующихся показателем ХПК. Прогнозирование и вычисление состава очищенной воды в зависимости от заданной величины выхода фильтрата.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является получение и анализ данных, характеризующих работу мембранных установок при их применении для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, по схемам, сокращающим объем образующегося концентрата и обеспечивающим уровень очистки до нормативов, предъявляемых к очищенным сточным водам, сбрасываемым в водный объект.

Задачами исследования являлись:

- обзор существующих технологий очистки хозяйственно-бытовых сточных вод и основных проблем, снижающих их эффективность при использовании;
- анализ мирового опыта применения обратного осмоса для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, изучение проблемы осадкообразования на мембранах, методов предочистки и технологий уменьшения объема образующегося концентрата;
- проведение экспериментальных исследований: определение эффективности очистки хозяйственно-бытовых сточных вод; изучение процесса сокращения расхода концентрата; определение зависимостей снижения величин производительностей и селективностей мембран разного типа при очистке хозяйственно-бытовых сточных вод;
- анализ влияния состава хозяйственно-бытовых сточных вод на процесс очистки при использовании мембранных элементов;
- разработка методики расчета требуемых технических параметров мембранной установки для достижения заданной величины выхода фильтрата;
- технико-экономическое сравнение применимости исследованной технологии с широко используемыми технологиями очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в различных диапазонах производительностей и условий эксплуатации.

Научная новизна работы:

- разработана и научно обоснована технология очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, использующая метод обратного осмоса и позволяющая сократить расход концентрата до величины в 1 % от расхода обрабатываемой воды;
- получены зависимости изменения селективностей обратноосмотических и нанофильтрационных мембран по аммонийному азоту от значений коэффициента снижения объема концентрата K (соотношение расхода исходной воды и концентрата) и определены эмпирические коэффициенты, позволяющие прогнозировать требуемое количество мембранных ступеней очистки и допустимые значения коэффициента снижения объема исходной воды;
- на основании математической обработки экспериментальных зависимостей получены уравнения, позволяющие определять расчетные показатели работы мембранных установок: площадь поверхности мембран и количество мембранных аппаратов на каждой ступени обработки концентрата, требуемых для достижения заданной величины расхода концентрата.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработаны основные принципы очистки хозяйственно-бытовых сточных вод с применением метода обратного осмоса, состоящие в разделении на

очищенную воду и концентрат, расход которого составляет около 1 % от расхода обрабатываемой воды;

- теоретически и экспериментально обоснована возможность радикального сокращения расхода концентрата, образующегося при работе установок обратного осмоса, концентрация солей в котором может достигать 80 г/л;
- разработана технология обработки концентрата установок обратного осмоса, используемых для очистки и доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод, позволяющая получать «крепкий» концентрат с величиной общего солесодержания, достигающей 80 г/л при низких величинах рабочего давления;
- определены математические зависимости величины снижения производительности и селективности мембран от значения коэффициента снижения объема исходной воды в процессах очистки сточной воды и обработки концентрата;
- впервые обоснованы экономические преимущества применения технологии обратного осмоса при строительстве новых и реконструкции существующих очистных сооружений канализации в сравнении с технологией мембранных биореакторов;
- выполнен технико-экономический расчет, демонстрирующий преимущества использования разработанных блочно-модульных установок над установками, работающими на основе технологий с активным илом в условиях низких температур и низких концентраций загрязняющих веществ в обрабатываемой воде.

Методология и методы исследования. В основе научной работы лежат методы теоретического, экспериментально-теоретического и эмпирического уровней. К основным направлениям относятся сбор и обобщение научно-технической информации о предмете и объекте исследования с последующим ее анализом и построением научных гипотез. С целью решения поставленных задач использовались экспериментальные работы с применением специальных физико-химических подходов с последующей обработкой полученных данных методом математического анализа и компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- технология очистки хозяйственно-бытовых сточных вод методом обратного осмоса, обеспечивающая сокращение объема концентрата в 100 раз по сравнению с классическим методом, при низких значениях рабочего давления;
- методика расчета обратноосмотических установок, позволяющая рассчитать площадь мембранной поверхности, требуемую для достижения заданной величины выхода фильтрата, при заданном качестве очищенной воды;
- практические и теоретические результаты изучения аспектов работы установок обратного осмоса, сконструированных по схеме сокращения расхода концентрата, при очистке хозяйственно-бытовых сточных вод;
- рекомендации по эффективному проведению химических промывок мембран для удаления осадков органических веществ;
- результаты исследований по определению требуемых значений основных параметров работы мембранных установок на всех ступенях технологической схемы (рабочего давления, периодичности промывок, удельного расхода моющих реагентов и др.), позволяющие минимизировать эксплуатационные затраты.

Степень достоверности полученных результатов. Экспериментальная работа велась на лабораторном оборудовании, в котором использовались серийно выпускаемые мембранные аппараты и насосы; для анализа результатов использовались современные общепринятые лабораторные методики и приборы, обладающие необходимой степенью точности. Достоверность полученных результатов подтверждается многолетней практикой проведения экспериментов по описанным методикам, длительностью и большим объемом экспериментальных исследований. Полученные результаты легко воспроизводимы и продемонстрировали высокую сходимость с основными теоретическими исследованиями в данной области.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач диссертационной работы, в разработке программ и выполнении исследований, обработке и систематизации полученных данных, создании расчетной методики, позволяющей производить расчеты и строить прогнозирующие зависимости, выполнении технико-экономических расчетов и внедрении в практику проектирования разработанных схем и методов. К личному вкладу в том числе относится написание научных работ и публикаций.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на следующих научно-практических конференциях: XI научно-технической конференции «Яковлевские чтения», посвященной памяти академика РАН Сергея Васильевича Яковлева (16 марта 2016 г., Москва); научно-технической конференции «Технологии в инженерно-экологическом строительстве, механизации и жилищно-коммунальном комплексе» (19–20 декабря 2017 г., Москва); XXI Международной научной конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (25–27 апреля 2018 г., Москва); XIV Международной научно-технической конференции «Яковлевские чтения», посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ» (14–15 марта 2019 г., Москва); XV Международной научно-технической конференции «Яковлевские чтения», посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева (19 марта 2020 г., Москва).

Предложенная в работе методика расчета была представлена на конкурс научно-исследовательских работ обучающихся в области водоснабжения и водоотведения, проводимый НИУ МГСУ совместно с АО «Мосводоканал», и получила 1-е место по направлению «Очистка городских сточных вод».

Внедрение результатов работы. Результаты работы были использованы в ходе разработки концепции реконструкции канализационных очистных сооружений «Укромное» в г. Симферополе для обеспечения приема канализационных стоков от объекта «Ангар» в Международном аэропорту Симферополь. Технология очистки сточных вод на мембранах обратного осмоса положена в основу разработок типовой линейки станций для очистки низкоконцентрированных сточных вод, предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера. Данные разработки ведутся в АО «ПИНИБ ГИТЕСТ» под руководством автора.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, из которых 3 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и 4 работы – в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и WoS.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 125 страницах, включает 81 рисунок и 9 таблиц. Состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, представлены основные результаты, публикации по теме, объем и структура работы.

В первой главе представлен анализ современных подходов к очистке и доочистке хозяйственно-бытовых сточных вод, а также путей модернизации очистных сооружений, работающих по «классическим» схемам. Рассмотрены преимущества и недостатки таких направлений развития, как глубокая биологическая очистка, мембранные биореакторы и мембранные технологии.

Выявлена перспективность дальнейших научных исследований в направлении мембранных технологий и определен круг основных задач, решение которых позволит разработать технологии очистки хозяйственно-бытовых сточных вод на основе мембран обратного осмоса, адаптированных к «сложным» условиям применения и обеспечивающих требуемое качество фильтрата при снижении расхода концентрата до величины в 1 % от расхода очищаемой воды.

Представлены принципы сокращения расхода концентрата установок обратного осмоса с использованием низконапорных мембран при величинах рабочего давления, не превышающих 1,5 МПа. Применен «ступенчатый каскад» нанофильтрационных мембран (рис. 1), при котором пермеат каждой ступени направляется на вход в аппараты предыдущей ступени.

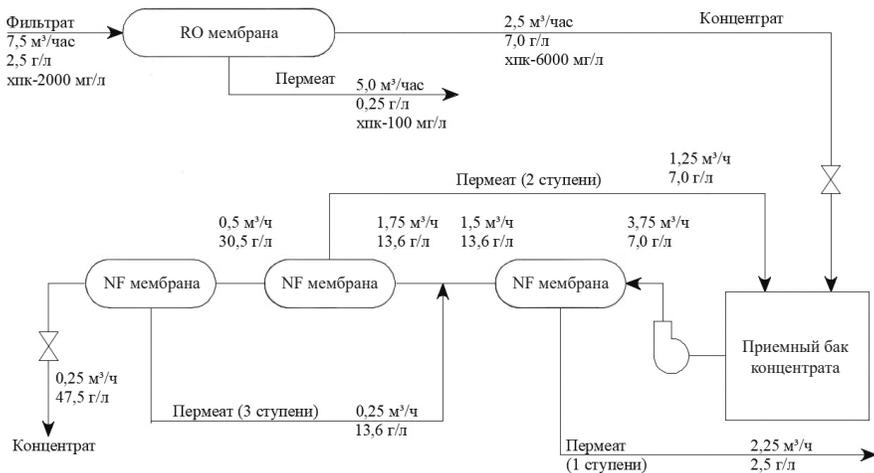


Рисунок 1. Схема сокращения расхода концентрата установок обратного осмоса путем применения мембран с низкой селективностью

Во второй главе описаны предлагаемые варианты технологических схем очистки сточных вод, использующих установки обратного осмоса. Схемы позволяют: обеспечить надежную доочистку сточной воды, очистить сточную воду без применения технологии биологической очистки и обеспечить удаление избыточного аммония из фугата, образующегося при обезвоживании осадков сточных вод (ОСВ), прошедших метановое сбраживание.

В табл. 1 представлены основные показатели качества сточных вод и воды, очищенной с применением различных мембран, исследованных в работе: воды после вторичных отстойников; воды после первичных отстойников; фильтрата после обезвоживания осадка, прошедшего анаэробное сбраживание в метантенках. Качество очищенной воды представлено в зависимости от значения коэффициента снижения объема исходной воды К (отношения расхода исходной воды к расходу концентрата мембранной установки).

Таблица 1

Основные показатели качества сточных вод, исследованных в работе

№	Загрязнение	Вода после биологической очистки						
		Исходная вода	После обработки на мембранах обратного осмоса				После обработки на НФ-мембранах	
			Перм. К=2	Перм. К=10	Конц. К=2	Конц. К=10	Перм. К=100	Конц. К=100
1	рН	7,0	6,65	6,8	7,6	7,7	7,1	8,0
2	NH ₄ , мг/л	1,27	0,15	0,5	2,6	10,1	3,5	57
3	(PO ₄) ³ , мг/л	0,17	0,02	0,18	0,33	1,6	1,5	8,32
4	ХПК, мг/л	32	32	48	220	384	-	-
5	БПК ₅ , мг/л	7,24	0,7	2,16	7,7	13,8	4,61	124,5
6	(SO ₄) ²	23	0,12	0,47	39	206	5,9	1218
7	Cl, мг/л	266	29	41,4	416	1942	735	5822
8	Неф/про, мг/л	4,1	0,02	0,1	7,7	31,1	-	-
9	СПАВ, мг/л	1,8	0,05	0,25	2,5	10,2	-	-
10	Общ. сол., мг/л	465	50	250	725	3580	1215	17 160
№	Загрязнение	Обработка сточных вод напрямую			Обработка фугата после обезвоживания осадка			
		Вода после первичных отстойников	Пермеат обратноосмотических мембран, К=2		Фугат	Пермеат обратноосмотических мембран, К=2		
1	рН	7,8	7,2		6,5–7,5		6,5	
2	NH ₄ , мг/л	55	6,3		1587		132,1	
3	(PO ₄) ³ , мг/л	0,5	0,06		137		12,4	
4	ХПК, мг/л	1120	28		1830		22,9	
5	БПК ₅ , мг/л	-	-		-		-	
6	(SO ₄) ²	100	0,46		25		0,14	
7	Cl, мг/л	300	32		320		23	
8	Неф/про, мг/л	0,3	0,04		2,0		0,01	
9	СПАВ, мг/л	2,7	0,1		1,0		0,3	
10	Общ. сол., мг/л	7,8	7,2		6,5–7,5		6,5	

В диссертации представлены результаты исследований, направленных на изучение: процессов очистки сточных вод с применением мембран; влияния состава очищаемой воды на показатели работы мембранных установок.

Программа исследований включала в себя изучение процессов очистки: сточной воды на обратноосмотических мембранах, прошедшей как первичное, так и вторичное отстаивание; фильтрата, полученного после обезвоживания осадков, прошедшего сбраживание в метантенках; концентратов, полученных в ходе каждого из экспериментов. В работе также было проведено экспериментальное изучение процессов предочистки сточной воды с применением ультрафильтрационных мембран с целью поиска оптимальных, соответствующих минимальному значению эксплуатационных затрат, значений рабочего давления и концентрации взвешенных веществ в исходной воде, а также параметров проведения промывок мембран.

Для проведения экспериментальной части работы использовалась лабораторная установка, принципиальная схема и внешний вид которой представлены на рис. 2.

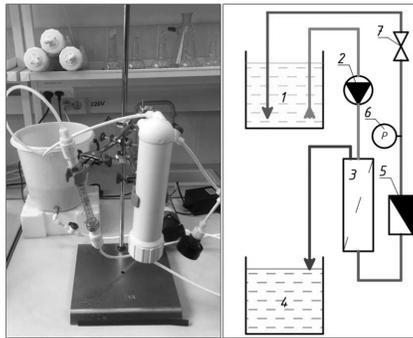


Рисунок 2. Внешний вид и принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – бак исходной воды; 2 – насос; 3 – обратноосмотическая мембрана; 4 – бак очищенной воды;
5 – расходомер; 6 – манометр; 7 – регулирующий вентиль

В ходе экспериментов исходная сточная вода из бака исходной воды 1 подавалась в мембранный модуль 3 с помощью насоса 2. В мембранном модуле 3 поток исходной воды разделялся на два потока: на очищенную воду (пермеат) и концентрат, содержащий все задержанные мембраной загрязнения. Очищенная вода направлялась в бак очищенной воды 4, в то время как концентрат возвращался в бак исходной воды 1. Расход контролировался при помощи расходомера 5, давление определялось при помощи манометра 6. Регулировка расхода осуществлялась при помощи регулирующего вентиля 7. В процессе проведения экспериментов производились измерения объемов воды в баке 1 и из бака 4 отбирались пробы. В пробах определялись: общее солесодержание, ХПК, концентрации сульфат-ионов, хлоридов, ионов аммония и фосфат-ионов. Значение коэффициента снижения объема K определялось как отношение объема воды в баке 1 в начале эксперимента к объему воды в баке 1 в заданный момент времени. На первой стадии эксперимента объем воды в баке 1 снижался для достижения значений $K = 7-10$ в зависимости от концентрации иона аммония в исходной воде. В ходе экспериментов выяснилось, что качество воды, очищенной с применением обратноосмотических

мембран низкого давления по аммонийному азоту, не соответствует требованиям, предъявляемым к воде, предназначенной для сброса в водные объекты рыбохозяйственного назначения. Поэтому было принято решение о проведении второй стадии эксперимента, на которой в качестве исходной воды использовалась вода из бака 4 (пермеат), полученная на первой стадии эксперимента.

Для исследования возможности сокращения объема концентрата на третьей стадии эксперимента в качестве исходной воды использовался концентрат, полученный в баке 1 на первой стадии, а вместо рулонного элемента с обратноосмотическими мембранами использовались элементы с нанофильтрационными мембранами с низкой величиной селективности по солям. Применение нанофильтрационных мембран позволяет сократить объем уже полученного концентрата еще в 10 раз. Таким образом, в процессе обработки исходной воды значение коэффициента уменьшения объема K после второй ступени очистки составило 100.

Результатом экспериментальной работы стали данные об изменениях производительности мембран, концентрации загрязнений в фильтрате и концентрате для исследуемой области K .

Для примера, на рис. 3 представлены аппроксимирующие кривые, описывающие зависимости концентраций хлорид-ионов, сульфат-ионов и ионов аммония в фильтрате от K для первой и третьей стадий эксперимента.

На рис. 4 представлены зависимости производительности мембран от величины K и от величины общего солесодержания концентрата.

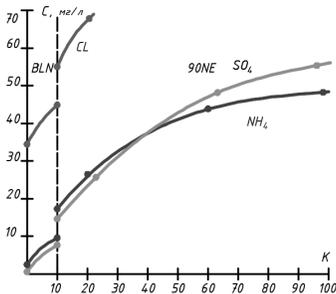


Рисунок 3. Зависимости концентраций загрязнений в фильтрате от значения K

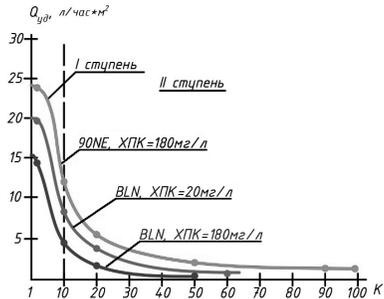


Рисунок 4. Удельная производительность мембран в зависимости от значения K

Оценено влияние концентрации содержащихся в сточных водах органических веществ на производительность мембранных элементов (рис. 4), что влияет на подбор типа мембран и определение площади их поверхности при расчете установки.

В ходе экспериментов при очистке сточной воды, взятой из первичных отстойников, было выявлено влияние высоких значений ХПК на снижение производительности мембраны в процессе обработки и концентрирования сточной воды.

Для уменьшения значения ХПК исходной воды автором были проведены эксперименты по осаждению растворенных органических веществ с использованием коагулянтов и дальнейшим сбором осадка. При этом значение ХПК обрабатываемой воды уменьшилось с 1100 до 270 мг/л.

Эксперименты, направленные на изучение работы ультрафильтрационных мембран при предварительной очистке сточной воды от активного ила, были проведены автором с целью определения параметров работы установок предочистки в зависимости от концентрации взвешенных веществ (активного ила) в воде, прошедшей биологическую очистку. Обработка полученных данных позволила предложить оптимальные режимы проведения обратных промывок (подобрать величины давлений при проведении промывок, интервала времени между промывками, продолжительности промывки), соответствующие минимуму эксплуатационных затрат и расходов воды на собственные нужды. Эксперименты проводились на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 5. Результаты определения величины оптимального рабочего давления представлены на рис. 6.

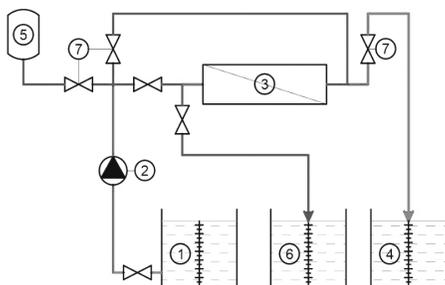


Рисунок 5. Схема экспериментальной установки ультрафильтрации

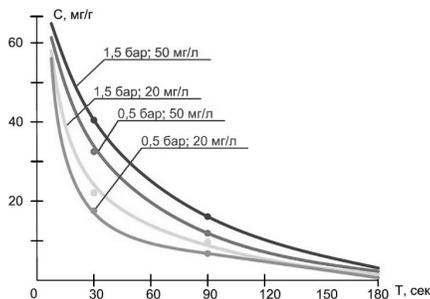


Рисунок 6. Пример обработки результатов экспериментов для выбора оптимальной величины рабочего давления при работе установки ультрафильтрации

В экспериментах использовался мембранный элемент с капиллярными ультрафильтрационными мембранами. Размер пор мембран составлял 0,05 мкм. Общая площадь фильтрующей поверхности – 0,5 м².

Исходная вода помещалась в бак исходной воды, откуда рабочим насосом подавалась в мембранный аппарат. Для поддержания рабочего давления использовался расширительный бак. Фильтрат после мембранного аппарата собирался в бак очищенной воды. Величины рабочего давления в экспериментах составляли 0,5; 1; 2 и 3 Бара.

Для проведения обратной промывки использовалась вода, полученная на установке обратного осмоса, которая помещалась в бак исходной воды 1. Переключение потоков производилось с помощью шаровых кранов 7. Рабочий насос 2 подавал промывную воду в тракт фильтрата. Сбор промывной воды производился через тракт исходной воды в бак очищенной воды 4. Регулирование давления осуществлялось краном байпаса и расширительного бака промывной воды 6.

По результатам проведенных экспериментов были получены зависимости объема фильтрата от времени фильтрования при различных рабочих давлениях и концентрациях ила и зависимости объема промывной воды, профильтровавшейся через мембраны «обратным током», от времени для таких же условий фильтрования.

В зависимости от значений концентраций взвешенных веществ в очищенной сточной воде были рекомендованы значения продолжительностей фильтроцикла и времени обратной промывки, соответствующие минимальным затратам воды на собственные нужды и максимальному количеству получаемой очищенной воды.

Одновременно с определением величин селективности обратноосмотических и нанофильтрационных мембран по различным загрязнениям автором проводилось определение скорости осадкообразования на мембранах (в основном образования осадка карбоната кальция и адсорбции растворенных органических загрязнений) при работе на сточной воде, а также определение эффективностей удаления с мембран загрязнений при проведении химических промывок (рис. 7). Полученные данные легли в основу разработки инструкции по эксплуатации мембранной установки, назначению графиков проведения химических промывок и определению годового потребления сервисных реагентов. Пример проведения графиков промывок по достижении заданного количества накопленных на мембранах загрязнений показан на рис. 8.

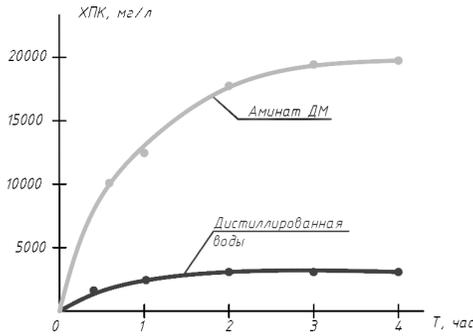


Рисунок 7. Концентрация ХПК в промывной воде в зависимости от продолжительности промывки

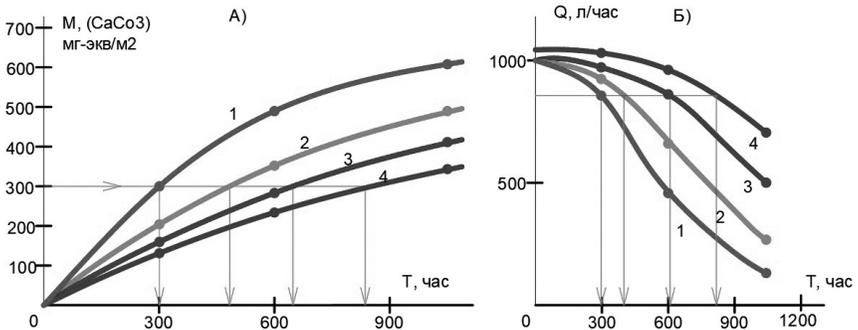


Рисунок 8. Прогнозирование снижения производительности мембран вследствие накопления осадка карбоната кальция и рекомендуемого интервала между проведением промывок:

- а) зависимость количества накопленного осадка от времени; б) снижение производительности мембран с течением времени в зависимости от количества накопленного на них осадка

В третьей главе представлены результаты обработки экспериментальных данных и рассматриваются вопросы практического применения мембранных установок при очистке сточных вод. Описывается разработанная автором методика определения площади поверхности мембран на каждой ступени очистки, необходимой для достижения заданного значения коэффициента снижения объема исходной воды K .

Представлены балансовые расчеты схемы очистки (рис. 9) и выведены уравнения, позволяющие получить значения основных параметров мембранных установок: требуемой площади поверхности мембран и качества очищенной воды (табл. 2).

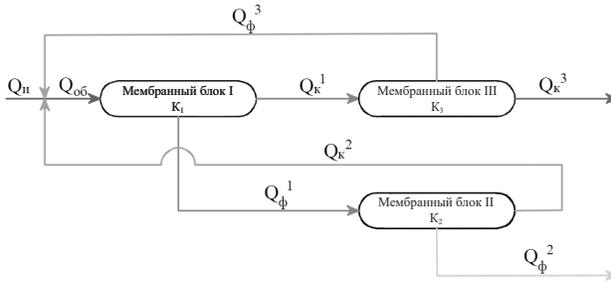


Рисунок 9. Расчетная схема мембранного блока

Таблица 2

Уравнения мембранной установки

Мембранный блок I	$Q_{об} = Q_{к}^1 + Q_{ф}^1 = K_1 \times Q_{к}^1$ $Q_{ф}^1 = Q_{к}^1 \times (K_1 - 1)$ $Q_{к}^1 = Q_{и} / (K_1 - (K_1 - 1)/K_2 - (K_3 - 1)/K_3)$
Мембранный блок II	$Q_{ф}^2 = Q_{к}^2 (K_2 - 1)$ $Q_{к}^2 = (Q_{к}^1 \times (K_1 - 1)) / K_2$
Мембранный блок III	$Q_{ф}^3 = Q_{к}^1 \times (K_3 - 1) / K_3$ $Q_{к}^3 = Q_{ф}^3 / (K_3 - 1)$

Представлена разработанная автором методика компьютерного расчета, позволяющая прогнозировать состав очищенной воды в зависимости от величины выхода фильтрата и состава исходной воды. В основе разработанной методики лежат результаты обработки экспериментальных данных, позволяющие получить функции зависимостей значений селективностей мембран по различным загрязнениям и величин удельной производительности мембран от значений коэффициента снижения объема K (соотношения расходов исходной воды и концентрата). Зная формулы зависимостей селективностей мембран по аммонию, ХПК или величине общего соледержания, можно в зависимости от состава исходной воды выбирать требуемое количество ступеней очистки и значение K (рис. 10).

Зная функцию зависимости удельной производительности мембраны от K , можно, разбив общее значение K на диапазоны, путем интегрирования функции по K определить требуемые значения площадей поверхностей мембран для обеспечения требуемой производительности мембран в каждом диапазоне изменения K (рис. 11).

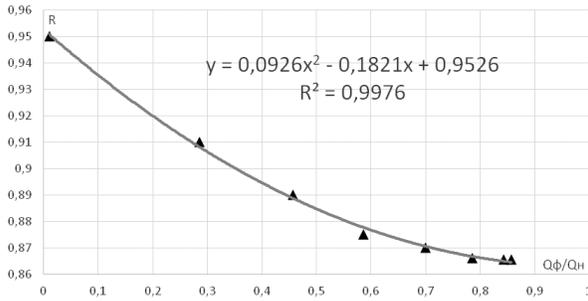


Рисунок 10. Уравнение зависимости селективности мембраны от K

Для определения значения выхода фильтрата на каждой ступени и требуемой для этого площади мембранной поверхности был разработан алгоритм, положенный в основу расчетной программы. Представленная в работе программа способна производить подобные расчеты в границах исследованной области и может быть дополнена в будущем новыми данными. При помощи описанного выше подхода, а также на основании балансовых расчетов была разработана мембранная установка производительностью 1 м³/час, позволяющая сократить расход концентрата до величины, не превышающей 1 % от общего количества очищаемой воды. В дополнение к методике расчета установок обратного осмоса представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных при работе ультрафильтрационной установки, осуществляющей предочистку сточной воды, поступающей на вход в установку обратного осмоса. На рис. 12 представлены результаты проведения оптимизационных расчетов, позволяющие определить необходимую площадь поверхности ультрафильтрационных мембран в зависимости от концентрации взвешенных веществ активного ила в исходной воде и частоты проведения промывок. Обработка экспериментальных данных позволила разработать технико-экономическое обоснование применения обратного осмоса при реконструкции существующих и строительстве новых блоков биологической очистки сточных вод.

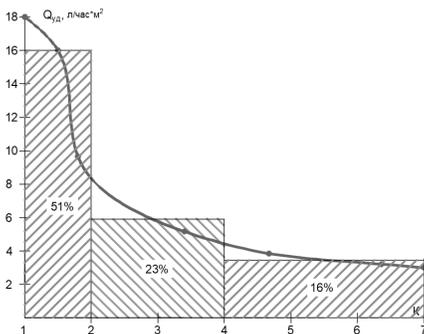


Рисунок 11. Принципы определения площади мембран в заданных диапазонах изменения K

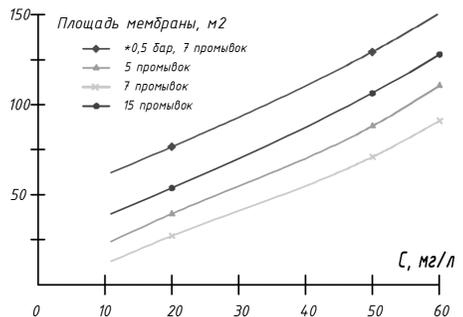


Рисунок 12. График зависимости требуемой площади мембран от частоты промывок и концентрации взвеси в исходной воде

В четвертой главе представлены результаты решения оптимизационных задач для определения параметров работы ультрафильтрационных и обратноосмотических установок.

В качестве примера на рис. 13 приведены результаты определения оптимального значения рабочего давления, соответствующего минимальному значению эксплуатационных затрат.

В диссертации автором выполнено технико-экономическое сравнение вариантов реконструкции существующих КОС, выполненное с использованием технологии мембранного биологического реактора (МБР) и обратного осмоса (ОО).

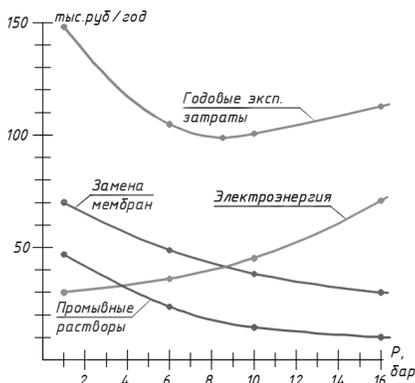


Рисунок 13. Определение требуемой величины рабочего давления для системы очистки с применением обратноосмотических мембран

К рассмотрению были приняты две станции пропускной способностью 5000 м³/сут, требующие реконструкции (увеличения производительности и обеспечения требуемой эффективности очистки от биогенных элементов) при условии сохранения существующих площадей, поскольку именно в таких условиях применение обеих сравниваемых технологий является наиболее рациональным решением. Результаты экономического сравнения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Экономическое сравнение применения технологий МБР и ОО при реконструкции сооружений производительностью 5 тыс. м³ в сутки

Технология	МБР	ОО
Капитальные затраты, тыс. руб.	125 900	81 250
Эксплуатационные затраты, тыс. руб./год	32 600	21 100
Затраты на электроэнергию, тыс. руб./год	22 900	11 200
Замена мембранных блоков, тыс. руб./год	5180	2800
Затраты на реагенты, тыс. руб./год	3500	5500
Затраты на утилизацию осадка, тыс. руб.	1000	800
Затраты на вывоз концентрата, тыс. руб.	-	800
Приведенные затраты, тыс. руб.	53 600	36 307

Из таблицы видно, что разница приведенных затрат (экономический эффект) при использовании технологии ОО более чем на 20 % ниже приведенных затрат при использовании МБР. Кроме того, в работе отмечается, что в настоящее время наблюдается постоянное совершенствование методов утилизации концентрата и снижение его объемов, что в будущем даст дополнительный экономический эффект. Во второй части главы производится сравнительный анализ разработанной технологии с технологиями глубокой биологической очистки и мембранного биореактора применительно к блочно-модульным станциям сверхмалой производительности. В качестве примера использована станция производительностью 50 м³/сут, эксплуатируемая в условиях Крайнего Севера. Технологическая схема такой станции, работающей по технологии ОО, представлена на рис. 14.

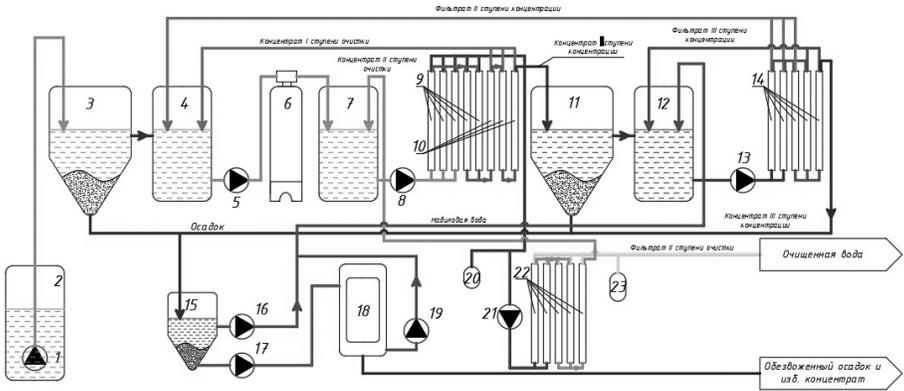


Рисунок 14. Принципиальная схема блочно-модульной станции КОО-50: 1 – корпус КНС; 2 – погружной насос; 3 – первичный отстойник; 4 – бак отстоянной воды; 5 – насос подачи воды на фильтрацию; 6 – скорый фильтр; 7 – бак отфильтрованной воды; 8 – насос подачи воды на установку обратного осмоса; 9 – мембранная установка очистки сточных вод; 10 – мембранная установка для снижения объема концентрата; 11 – бак осаждения ХПК; 12 – бак отстоянной воды; 13 – насос подачи воды на вторую ступень концентрирования; 14 – мембранная установка для снижения объема концентрата второй ступени; 15 – осадкоуплотнитель; 16 – насос возврата надосадочной воды; 17 – насос подачи осадка на обезвоживание; 18 – установка мешкового обезвоживания; 19 – насос возврата осадочной воды; 20 – бак фильтрата первой ступени; 21 – насос подачи воды на установку обратного осмоса второй ступени; 22 – мембранная установка очистки сточных вод второй ступени; 23 – бак фильтрата

В табл. 4 представлено технико-экономическое сравнение станции обратного осмоса (ОО) пропускной способностью 50 м³ в сутки со станциями на основе технологий глубокой биологической очистки (ГБО) с доочисткой (ДО) и мембранного биореактора (МБР) на основе расчетов эксплуатационных и приведенных затрат.

Технико-экономическое сравнение эффективности работы станций очистки сточных вод производительностью 50 м³ в сутки на основе различных методов

Затраты	ГБО + ДО	МБР	ОО
Удельные капитальные затраты на 1 м ³ /час очищенной воды, руб. м ³ /час	250 000	300 000	140 000
Удельное потребление электроэнергии на 1 м ³ очищенной воды в час (кВт/м ³ ·час)	5,5	6,5	2,75
Капитальные затраты, руб.	5 500 000	62000 00	3 000 000
Годовые затраты на электроэнергию, руб./год	385 000	455 000	192500
Годовые затраты на реагенты, руб./год	100 000	150 000	150 000
Годовые затраты на вывоз концентрата/осадка, руб./год	50 000	50 000	100 000
Годовые затраты на амортизацию оборудования, руб./год	200 000	600 000	500 000
Годовые эксплуатационные затраты, руб./год	735 000	1 255 000	942500
Приведенные затраты, руб.	1 351 000	2 265 000	1 542 500

На рис. 15 представлена зависимость приведенных затрат от производительности станции очистки сточных вод.

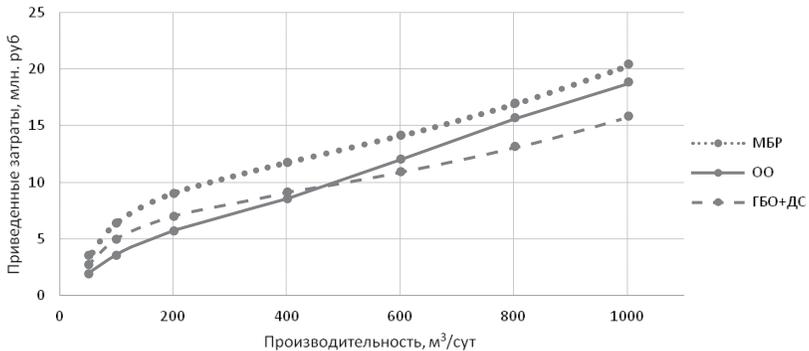


Рисунок 15. Зависимости приведенных затрат от производительности станции очистки сточных вод

Применение обратного осмоса для очистки бытовых сточных вод имеет ряд преимуществ, а именно: обеспечение практически моментального ввода очистных сооружений в эксплуатацию, компактные габариты станции, меньшая чувствительность к температуре очищаемой воды. Сточные воды в северных районах РФ характеризуются низким содержанием ХПК и биогенных элементов. Это является положительным фактором, который при использовании технологии ОО дает возможность получить очищенную воду без применения биологической очистки с применением метода ОО. При этом расход концентрата установки ОО может быть уменьшен до величины, не превышающей 0,5–0,25 % расхода исходной воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод обратного осмоса является чрезвычайно эффективным при очистке сточных вод благодаря «универсальной» очистке от растворенных органических загрязнений и загрязнений в ионной форме, что открывает новые возможности для их повторного использования. Решение проблемы утилизации концентратов установок обратного осмоса позволит широко использовать установки как при реконструкции сооружений биологической очистки сточных вод, так и при создании систем очистки сточных вод для условий, в которых технологии биологической очистки малоэффективны (в условиях эксплуатации при низких температурах). Технология применения мембран для очистки сточных вод постоянно совершенствуется, что отражается в регулировании ионного состава очищенных сточных вод, повышении величины их общего солесодержания, сокращении затрат на очистку и утилизацию концентрата.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

1. Проведен анализ существующих решений, направленных на совершенствование процессов очистки сточных вод. Показано, что доочистка сточных вод, прошедших биологическую очистку, приобретает всё большие масштабы. Однако широкому применению для этих целей метода обратного осмоса препятствуют нерешенные проблемы, связанные с предочисткой и утилизацией концентратов установок обратного осмоса.

2. Метод обратного осмоса эффективно очищает сточные воды от органических веществ и растворенных загрязнений в ионной форме, в том числе от солей аммония и фосфора. Поэтому очистку сточных вод в ряде случаев (на малых объектах водоотведения) можно эффективно проводить без использования биологической очистки.

3. Проведены исследования по оценке влияния содержащихся в сточных водах органических веществ на работу мембран и получены значения скоростей накопления органических веществ на поверхности мембран и скоростей их удаления с помощью проведения химических промывок, что позволяет контролировать процесс загрязнения мембран органическими загрязнениями.

4. Изучены процессы очистки сточной воды от активного ила с помощью ультрафильтрационных мембран, используемых в качестве предочистки перед обработкой методом обратного осмоса. Показано, что затраты на оборудование при применении установок ультрафильтрации повышаются при снижении величины рабочего давления. При этом процессы роста осадка на поверхности мембран и закупорки пор замедляются, что ведет к сокращению эксплуатационных затрат. Сделан вывод, что широкое применение погружных мембранных ультрафильтрационных модулей, применяемых в мембранных биореакторах и в установках предочистки перед обратным осмосом, связано с необоснованным опасением за ускорение процессов осадкообразования и закупорки пор мембран. Экспериментально обоснован и оптимизирован режим работы ультрафильтрационных мембран, состоящий в применении «профилактических» обратных промывок при более высоких значениях давления.

5. Экспериментально проработана и экономически обоснована эффективность применения технологии обратного осмоса для удаления аммония из фильтрата

установок обезвоживания осадков после их анаэробного сбраживания на крупных станциях, что позволяет сократить нагрузку на сооружения биологической очистки при возврате фильтрата в приемную камеру КОС.

6. Разработана методика расчета мембранного блока, работающего по предложенным технологиям, позволяющая определить ее основные технологические параметры, такие как: количество ступеней очистки, площадь мембранной поверхности на каждой ступени, качество очищенной воды, получаемой на каждой ступени очистки.

7. Произведена технико-экономическая оценка каждой из предложенных технологий, показывающая их преимущества и инвестиционную привлекательность в рамках рассматриваемых граничных условий: производство блочно-модульных станций производительностью от 25 до 500 м³/сут; реконструкция малых очистных сооружений производительностью от 1000 до 4000 м³/сут; очистка фильтрата установок обезвоживания осадка от высоких концентраций биогенных элементов для крупных и сверхкрупных станций производительностью от 10 до 1000 тыс. м³/сут.

8. Разработанные технологические схемы и методика расчета внедрены в практику проектно-исследовательской деятельности компании АО «ПИНИБ ГИТЕСТ» в рамках разработки производственной линейки блочно-модульных станций сверхмалой производительности, адаптированных для работы в условиях Крайнего Севера, на низкоконцентрированной хозяйственно-бытовой сточной воде.

Рекомендуется использовать разработанную автором методику для расчета блоков мембранного фильтрования, работающих на сточной воде, а также для определения их эксплуатационных параметров и величины эксплуатационных затрат.

Дальнейшими перспективами внедрения в практику описанных разработок являются создание полномасштабных пилотных установок для проведения испытаний в условиях Крайнего Севера, внедрение представленной технологии в практику реконструкции очистных сооружений и получение фактического эксплуатационного опыта, а также поиск новых направлений оптимизации работы мембранных аппаратов на действующих объектах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, а также в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science:

1. Первов, А. Г. Контроль ионного состава пермеата после обработки сточных вод методом обратного осмоса с целью повышения общей минерализации и снижения затрат на утилизацию концентрата / А. Г. Первов, К. В. Тихонов / Системные технологии. – 2023. – Т. 3 [48]. – С. 130–147. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.688-700.

2. Первов, А. Г. Новая технология обработки сточных вод, прошедших биологическую очистку, методом обратного осмоса: утилизация концентрата / А. Г. Первов, К. В. Тихонов // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, № 5. – С. 688–700. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.688-700.

3. Первов, А. Г. Очистка бытовых сточных вод обратным осмосом / А. Г. Первов, К. В. Тихонов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 5. – С. 32–40. – DOI: 10.35776/MNP.2020.05.06.

4. Pervov, A. Control of ionic composition of wastewater treated by reverse osmosis membranes to increase product total dissolved solids and reduce concentrate utilization costs / A. Pervov, K. Tikhonov // *Desalination and Water Treatment*. – 2023. – Т. 309. – P. 49–57.

5. Pervov, A. Application of reverse osmosis to treat high ammonia concentrated reject water from sewage sludge digestion / A. Pervov, K. Tikhonov, W. Dabrowski // *Desalination and Water Treatment*. – 2018. – Vol. 110. – P. 1–9.

6. Pervov, A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries / A. G. Pervov, T. N. Shirkova, K. V. Tikhonov // *Membranes and Membrane Technologies*. – 2020 – Vol. 2, No. 5. – P. 296–310.

7. Pervov, A. Determination of Optimal Operation Pressure Values for Ultrafiltration Wastewater Treatment / A. G. Pervov, K. V. Tikhonov, N. A. Makisha // *Membranes and Membrane Technologies*. – 2020. – Vol. 2, No. 3. – P. 159–168.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и в сборниках трудов конференций:

8. Тихонов, К. В. Использование технологий обратного осмоса как альтернативы биологической очистке бытовых сточных вод / К. В. Тихонов // *Яковлевские чтения : сб. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти акад. РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ», Москва, 14–15 марта 2019 г.* – М. : Национ. исслед. Моск. гос. строит. ун-т, 2019. – С. 249–256.

9. Dabrowski, W. Use of reverse osmosis to modify biological wastewater treatment / W. Dabrowski, A. G. Pervov, K. V. Tikhonov // *Vestnik MGSU*. – 2018. – Vol. 13, No. 10(121). – P. 1220–1233. – DOI: 10.22227/1997-0935.2018.10.1220-1233.

10. Pervov, A. Application of reverse osmosis to treat high ammonia concentrated reject water from sewage sludge digestion / A. Pervov, K. Tikhonov, W. Dabrowski // *Desalination and Water Treatment*. – 2018. – Vol. 110. – P. 1–9. – DOI: 10.5004/dwt.2018.22009.

11. Тихонов, К. В. Новый подход к технологии очистки сточных вод на очистных сооружениях малой и сверхмалой производительности блочно-модульного типа / К. В. Тихонов // *Технологии в инженерно-экологическом строительстве, механизации и жилищно-коммунальном комплексе : сб. докл. внутривуз. науч.-техн. конф., Москва, 19–20 дек. 2017 г.* – М. : Национ. исслед. Моск. гос. строит. ун-т, 2018. – С. 113–117.

12. Тихонов, К. В. Численное моделирование как инструмент анализа гидродинамических и водоочистительных процессов и конструирование аппаратов очистных сооружений / К. В. Тихонов, Е. В. Алексеев // *Яковлевские чтения : сб. докл. XI науч.-техн. конф., посвящ. памяти акад. РАН Сергея Васильевича Яковлева, Москва, 16 марта 2016 г.* – М. : АСВ, 2016. – С. 134–137.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.10.2024.
Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 6091.

ООО «Научно-технический центр»
443056 г. Самара, ул. Николая Панова, 50-255
Тел. (846) 336-27-52
E-mail: as_gard@mail.ru