

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.02 Энерго– и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация технологии очистки сточных вод в биореакторе на
ПАО«КуйбышевАзот»

Обучающегося

А.Э. Русакова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.Н. Шевченко

(ученая степень, ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Бакалаврскую работу выполнила: Русакова А.Э.

Тема работы: Оптимизация технологии очистки сточных вод в биореакторе на ПАО «КуйбышевАзот».

Научный руководитель: старший преподаватель кафедры «Химическая технология и ресурсосбережение» Шевченко Ю.Н.

Актуальность работы заключается в превышении БПК, ХПК, взвешенных веществ в очищенных стоках на существующем биореакторе предприятия ПАО «КуйбышевАзот».

Цель бакалаврской работы: снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет оптимизации процессов очистки на предприятии ПАО «КуйбышевАзот».

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих задач:

- проанализировать существующую технологическую схему очистки сточных вод на предприятии ПАО «КуйбышевАзот»;
- предложить техническое решение для снижения приоритетных загрязняющих веществ;
- оценить эффективность внедрения предложенного решения.

В работе была проанализирована технологическая схема очистки сточных вод от производства капролактама на ПАО «КуйбышевАзот»; приоритетные загрязняющие вещества; проведены экспериментальные исследования динамики образования биопленки на двух типах загрузки, а также составлена математическая модель процесса в программе MathCad.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 31 источника. Общий объем работы составил 58 страниц машинописного текста, в том числе таблиц – 9, рисунков – 23.

Abstract

The title of the graduation work is Optimization of wastewater treatment technology in the bioreactor at KuibyshevAzot PJSC.

The graduation work consists of an introduction, 4 parts, a conclusion, the list of references including 31 sources.

The key issue of the senior thesis is reducing the anthropogenic load of the environment by optimising wastewater treatment process and improving the quality of the wastewater treatment at KuibyshevAzot PJSC.

We start with the statement of the problem and then logically pass over to it's possible solutions. First we analyze the existing technological scheme of wastewater treatment at KuibyshevAzot PJSC. We also offer a technological solution to reduce priority pollutants, to optimize the wastewater pretreatment system at the enterprise. And finally we evaluate the effectiveness of the implementation of the proposed solution.

In conclusion we'd like to stress that the technological scheme of wastewater treatment from caprolactam production at KuibyshevAzot PJSC and priority pollutants were analyzed. Considering that experimental studies of the dynamics of biofilm formation on two types of loading were carried out and a mathematical model of the process in MathCad program was made, we can conclude that the developed method is appropriate to improve the mass exchange and hydrodynamics of the process.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ системы очистки на ПАО «КуйбышевАзот».....	6
1.1 Общие сведения о предприятии ПАО «КуйбышевАзот».....	6
1.2 Общая характеристика цеха № 39 «Переработка органических и неорганических продуктов».....	7
1.4 Анализ промышленных стоков	10
2 Применение существующих контактных биореакторов для очистки сточных вод	13
2.1 Биореакторы	13
2.2 Стадия доочистки на ПАО «КуйбышевАзот»	15
2.3 Особенности прикрепленной биомассы	16
2.4 Конструктивное исполнение контактных загрузочных материалов-носителей биомассы	18
2.5 Патентный поиск исполнения биозагрузок для контактных биореакторов	22
3 Исследование формирования биопленок на загрузках блочного и ершового типа	25
4 Расчетная часть.....	31
4.1 Исследование кинетики окисления органических веществ	31
4.2 Составление и анализ математической модели биологической очистки сточных вод	34
4.3 Составление математической модели.....	36
4.4 Расчет загрузки биореактора	46
4.5 Материальный баланс биореактора	48
Заключение	53
Список используемых источников.....	54
Приложение А Схема биореактора.....	58

Введение

Охрана водных объектов от загрязнения и истощения является одной из актуальных проблем в современном мире. Сточные воды образуются во всех технологических процессах, в которых неотъемлемой частью является вода. Очистка и обработка сточных вод согласно нормам СанПин 2.1.5.980-00, для дальнейшего использования и выпуска в водохранилище основная задача любого предприятия, так как в окружающей нас среде почти не осталось источников пресной воды, не загрязненной веществами различных классов опасности.

Задача эффективности работы очистных сооружений всегда была актуальной.

Бакалаврская работа основывается на технологическом процессе, реализуемом на предприятии ПАО «КуйбышевАзот». Оно осуществляет очистку промышленных и бытовых стоков в цехе № 39 «Переработка органических и неорганических продуктов», далее осуществляет отвод через насосную станцию на городские биологические очистные» сооружения ОАО«Тольяттисинтез».

Цель бакалаврской работы – повышение качества очистки сточных вод на предприятии ПАО «КуйбышевАзот».

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих задач:

- проанализировать существующую технологическую схему очистки сточных вод на предприятии ПАО «КуйбышевАзот»;
- предложить техническое решение для снижения основных приоритетных загрязняющих веществ, для оптимизации системы доочистки сточных вод на предприятии;
- составить математическую модель процесса;
- провести расчет материального баланса.

1 Анализ системы очистки на ПАО «КуйбышевАзот»

1.1 Общие сведения о предприятии ПАО «КуйбышевАзот»

«Публичное акционерное общество «КуйбышевАзот» - химическое предприятие, расположенное в г. Тольятти Самарской области. «КуйбышевАзот» это ведущий производитель капролактама в России и странах СНГ (капролактамы – это сырье для производства синтетических волокон, полиамидов, и конструкционных пластмасс, используемых в текстильной промышленности, автомобилестроении и многих других отраслях обрабатывающей промышленности)» [22]. «Кроме капролактама, общество также изготавливает аммиак, азотные удобрения и технологические газы и так же вступает в десятку мировых изготовителей по выработке капролактама, отечественной азотной промышленности, лидер в производстве полиамида-6 в России, СНГ и Восточной Европе.

Основная часть стратегии развития ПАО «КуйбышевАзот» – сокращение потребления ресурсов, сохранение и охрана окружающей среды также снижение техногенной нагрузки на нее. Вследствие системного подхода к природоохранной деятельности за период 2014-2021 гг. при повышении формирования товарной продукции в 1,8 раз выбросы в атмосферу уменьшились в 1,9 раз, а число химически загрязненных стоков – в 4,4 раза.

С целью достижения данной цели вводятся энерго-и ресурсосберегающие и малоотходные технологии, реконструируются функционирующие производства и улучшается оборудование. Любой план компании на всех этапах, от разработки вплоть до осуществления, исполняется с учетом экологической составляющей» [22].

1.2 Общая характеристика цеха № 39 «Переработка органических и неорганических продуктов»

Очистные сооружения на ПАО КуйбышевАзот были введены в эксплуатацию в 1989 году и были установлены в цехе № 39 «переработка органических и неорганических продуктов». Очистка стоков от азотных соединений в данном цехе происходит по схеме биологической очистки сточных вод, основанной на методе нитриденитрификации (НДФ). Мощность установки по проекту составляла:

- аммонийные загрязнения – 543,6 т/год;
- нитратные загрязнения – 1629,2 т/год;
- количество перерабатываемых промышленных стоков – 2216,3 т/год.

Очистные сооружения нитриденитрификации цеха № 39 работают 365 дней в году.

Промстоки на ПАО «КуйбышевАзот» проходят три этапа очистки в аэротенках: в нитрификаторе – аэробный процесс очистки сточных вод, протекающий в две стадии, в денитрификаторе – анаэробный процесс очистки и на стадии доочистки [20].

Предприятие ПАО «КуйбышевАзот» работает по проекту замкнутой системы использования воды. Сточные воды после очистки из корпусов 2036 и 2039, возвращаются обратно в водооборотный цикл предприятия. Эта схема позволяет сократить потребление природной воды.

Потребность в пополнении оборотной воды – около 300 м³/ч. Для ВОЦ используется речная вода.

1.3 Описание технологической схемы

Технологическая схема представлена на рисунке 1.

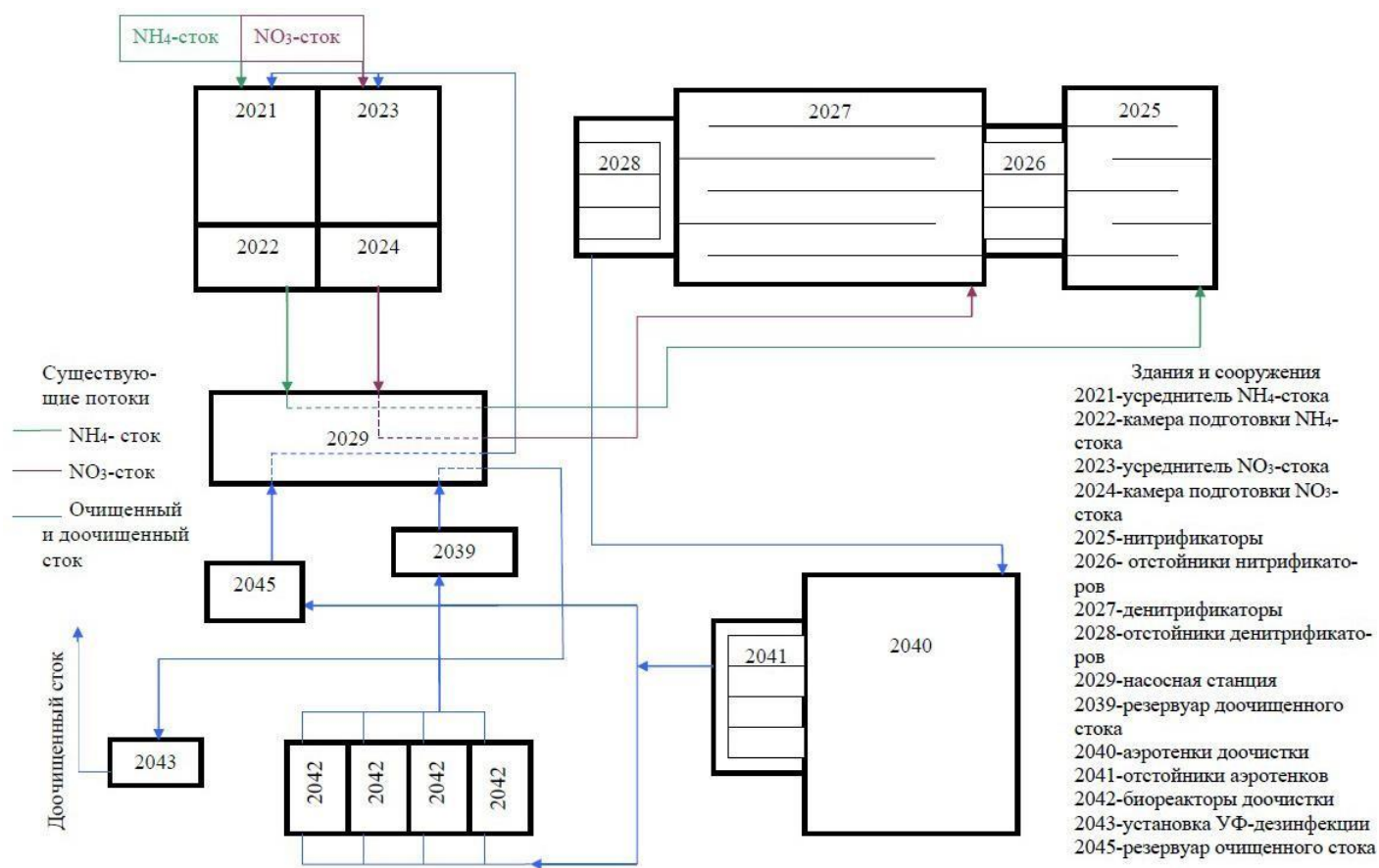


Рисунок 1 – Технологическая схема очистки

«Сточные воды от производства капролактама и цеха №3 по проложенным по эстакаде трубопроводам К7 и К13 поступают в приемные камеры корпусов 2021 и 2023» [20]. Аммоний содержащий сток и конденсат сокового пара по трубопроводу К7 с цеха № 3 и от корпусов 714,909,914 поступает в к.2021, а нитрат содержащий сток и ВСТ (вода сточная) от корпусов 946,709,912,916,2080 по трубопроводу К13 поступают в приемную камеру к.2023.

«Стоки с завышенным содержанием загрязняющих веществ, выше норм технологического режима (НТР) по линии ВСТ некондиционные стоки по трубопроводу с эстакады в камеру 2032/1, а сток КПС – в камеру 2032/2. В случае если некондиция поступает одновременно по КСП и ВСТ, сброс производится только с одного коллектора, а по второму коллектору стоки поступают в приемную камеру, куда для разбавления подается циркуляционный сток.

Реагенты подаются по трубопроводам, проложенным по эстакадам Иб-1, Иб-3, Иб-9:

- трубопровод ГУ– трубопровод газа углекислого от цеха № 11, заведен в корп.2029;

- трубопровод водно-щелочных стоков К18 от цеха №35, заведен в корп.2029;

- трубопровод Щ – трубопровод содового раствора от корп.916, заведен в корп.2030 к емкостям поз. Е8/1,2, насосам поз. 9/1-3 и далее в корп. 2029;

- трубопровод КФ – трубопровод ортофосфорной кислоты от корп. 2030, заведен в корп.2029;

Трубопроводы подачи реагентов подключены к насосам гидроперемешивания поз. IА/1,2 корп. 2022, поз. IIА/1,2 корп. 2024. По эстакадам подведены трубопроводы подачи воздуха КИП, пара (П5), воздуха технологического сжатого (ВТС), теплофикационной воды (ВТП, ВТО) и спутникового обогрева (ВГП, ВГО)» [20].

Сток с аммонием после корпуса 2021 поступает в лоток и усреднитель, откуда направляется в емкость корпуса 2022. Далее эта смесь поступает в корпус 2029 и затем в нитрификатор 2025 и денитрификатор 2027.

Сток с нитратами также поступает в усреднитель 2023, а затем в емкости корпуса 2024 и 2029. После того, как этот сток проходит отстойники, он направляется в аэротенк 2040 и дальше на доочистку в биореактор 2024. После биореактора проходит установку ультрафиолета корпуса 2043 далее ЗАО БОС «ТольяттиСинтез», ВОЦ-8 производства капролактама.

1.4 Анализ промышленных стоков

«Главные источники образования сточных вод:

- производство капролактама;
- производство аммиачной селитры.

Поступающие химзагрязненные сточные воды представлены двумя потоками:

1) КСП (конденсат сокового пара) – аммоний-содержащие сточные воды. Эти сточные воды имеют высокое содержание аммония и солей. Поступление равномерное (стабильно $\pm 10-15 \%$), в диапазоне $\pm 20-25 \%$ в кратковременном режиме. Направляются на усреднение в корпус 2021. В летний период имеют высокую температуру, до плюс 60°C , охлаждение атмосферным воздухом, смешением с очищенными стоками до температуры плюс 40°C (выход с корпуса 2022). Зимняя температура до плюс 25°C .

Производительность аммоний содержащих сточных вод:

- проектная – $110 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- фактическая: средняя – около $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($120-170 \text{ м}^3/\text{ч}$), максимальная – $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ » [1].

2) ВСТ (вода сточная) – нитрат-содержащие сточные воды. Сильно загрязнены, имеются существенные колебания качественного состава. Следуют на усреднение в корпус 2021, где разбавляются очищенными

сточными водами. Температура летом приблизительно плюс 40 °С. В зимнее время разогревают пароконденсатом вплоть до плюс 20 °С.

«Производительность нитрат содержащих сточных вод:

- проектная – 60 м³/ч;
- средняя – ок.60 м³/ч (50-70 м³/ч);
- максимальная – 110-120 м³/ч» [20].

В таблице 1 показаны исходное сырье, материалы, полупродукты, поступающие на очистные сооружения.

Таблица 1 – Исходное сырье, материалы, полупродукты, поступающие на очистные сооружения

Наименование сырья, материалов, полупродуктов	Источник поступления	Регламентируемые показатели	Норматив
Аммоний содержащий сток	«Цех № 25 по производству сульфата аммония Цех № 37 по производству капролактама Цех № 24 по производству капролактама Цех № 3 по производству аммиачной селитры» [16]	pH	≤ 11
		N-NH ₄	≤ 410 мг/дм ³
		N-NO ₃	≤ 100 мг/дм ³
		Сульфаты	≤ 500 мг/дм ³
		Капролактамы	≤ 0,79 мг/дм ³
		Взвешенные вещества	≤ 320 мг/дм ³
		БПК ₅	≤ 250 мг О/дм ³
		ХПК	≤ 350 мг О/дм ³

Продолжение таблицы 1

Наименование сырья, материалов, полупродуктов	Источник поступления	Регламентируемые показатели	Норматив
Нитрат содержащий сток	«цех № 38 получения гидроксиламинсульфата цех № 23 получения кальцинированной соды цех № 24 получения капролоктама цех № 37 получения капролоктама цех № 22 получения циклогексанона цех № 35 получения циклогексанона» [20]	pH	≥ 2
		N-NH ₄	≤ 30 мг/дм ³
		N-(NO ₃ +NO ₂)	доза в течение 2-х часов не более 3000, среднее 1660 мг/дм ³
Водно–щелочной	цех № 35 получения циклогексанола	ХПК	≤ 10000 мг О/дм ³
		Капролактam	≤ 100 мг/дм ³
		Циклогексан	≤ 20 мг/дм ³
		Циклогексанон	≤ 20 мг/дм ³
		Смолы	≤ 100 мг/дм ³
		Взвешенные вещества	≤ 300 мг/дм ³
Ортофосфорная кислота	ГОСТ 10678-76 или аналог	БПК ₅	1000÷6000 мг О/дм ³
			массовая доля ортофосфорной кислоты ≥ 73 %
Содовый раствор	цех № 23 получения кальционнированной соды		Массовая доля общей щелочности в пересчете на углекислый 5÷10 %

В первом разделе представлены основные сведения о технологическом процессе на предприятии ПАО «КуйбышевАзот».

2 Применение существующих контактных биореакторов для очистки сточных вод

2.1 Биореакторы

Биореакторы представляют собой аппараты, в которых осуществляется проведение химических процессов с использованием анаэробной и аэробной среды, при определенных параметрах температуры, давления рН. Классификация биореакторов:

- «по подаче воздуха: аэробные, анаэробные, аэробно-анаэробные;
- по иммобилизации микроорганизмов в аппарате: с прикрепленными микроорганизмами на загрузке, с плавающей микрофлорой, комбинированные;
- по конструктивным особенностям: с прикрепленной насадкой, с вращающейся насадкой, с псевдоожиженным слоем;
- по конструктивно-технологическим признакам: биофильтры, биосорберы, биотенки, фильтр-биореактор, флототенки (рисунок 2)» [1].

Для обеспечения максимальной продуктивности при минимальных затратах объема перерабатываемых смесей в промышленности используют глубинное аэробное культивирование. Рассмотрим основные типы таких реакторов:

- «реакторы с механическим перемешиванием;
- реакторы с пневматическим перемешиванием;
- газовихревые биореакторы;
- аэрлифтные биореакторы;
- мембранные биореакторы» [1].

Рассмотрим классификацию контактных биореакторов согласно типу аэрации, а также свойствам загрузки биомассы, на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация контактных биореакторов согласно типу аэрации, а также свойствам загрузки биомассы

На стадии доочистки «КуйбышевАзот» применяются аэрлифтный биореактор с прикрепленной биомассой на неподвижной загрузке, изображенный на рисунке А.1 из приложения А.

Для решения проблемы обеспечения интенсивного массообмена в промышленности используют аэрлифтные реактора, обладающие неограниченным объёмом. Аэролифтные биореакторы обладают аэрлифтами, которые представляют собой трубы, заключенные в диффузоры. Принцип работы заключается в том, что смесь газов подают по этой трубе в нижнюю часть диффузора в виде пузырьков газа, которые поднимаются в верхнюю часть реактора, забирая культуральную жидкость. После происходит

возникновение циклических потоков в реакторе, за счет спуска по внешним стенкам этой культуральной жидкости. Коэффициент расхода газа в таких биореакторах находится в диапазоне 40-50.

2.2 Стадия доочистки на ПАО «КуйбышевАзот»

На стадии доочистки сток, поступивший в биореакторы (рисунок 3) по трубопроводу Ду 400 подвергается дополнительной очистке от завышенного БПК, ХПК, азота аммонийного и других загрязнений, биологическим разложением на биопленке на которой образуются бактерии нитрификаторы.

Биологическое разложение на биопленке – это основной процесс доочистки сточных вод. Биопленка формируется на пластиковой насадке, закрепленной в виде гирлянд в специальных кассетах, которые вмонтированы по четыре штуки в каждую секцию биореактора. Эрлифт расположенный в центре каждой кассеты обеспечивает циркуляцию воды в пластиковой насадке. Поток воды, направляемый эрлифтом, снизу-вверх обеспечивает лучший массообмен между биопленкой и остаточными загрязнениями.



Рисунок 3 – Биореактор со смонтированными кассетами

Чтобы избежать накопление активного ила на бионасадке и его переизбыток, который выносится вместе с потоком воды, и увеличивает содержание взвешенных веществ в стоке, избыток биопленки удаляется регенерацией водо-воздушной смесью. Под кассетами располагается система перфорированных труб через которую в воду подается сжатый воздух. После процесса барботирования сточные воды поступают в камеру опорожнения 2044 вместе с барботажем, откуда затем погружными насосами позиции 1/1,2 откачиваются на доочистку в азротенк корпуса 2040.

Уже после дополнительного очищения в биореакторах сток поступает в камеру 2039 и откуда насосами откачивается в УФ-установку корпуса 2043. «Очищенный сток, пройдя дезинфекцию под действием ультрафиолетового облучения специальных ламп, расположенных в УФ-установке, направляется по трубопроводу на промышленное водоснабжение» [20].

2.3 Особенности прикрепленной биомассы

Микроорганизмы в окружающей среде чаще всего существуют в структурированном виде образуя биопленки. Наиболее важными их свойствами является то, что они легко адаптируются к инородным соединениям, быстро осваивают новые места обитания и нивелируют антропогенные воздействия.

«Биопленка биофильтров – это своеобразное живое сообщество организмов, которое ведет основную очистку сточных вод от загрязнений как целостная система, а не как отдельные живые микроорганизмы (рисунок 4). В связи с этим значительный интерес представляют исследования роли организмов биопленки, позволяющих достичь высокой степени глубокой деградации, детоксикации и деминерализации веществ, которые в высоких концентрациях встречаются в сточных водах. Наиболее прочные биологические связи в очистных сооружениях подобного типа устанавливаются между микроорганизмами биопленки» [5].

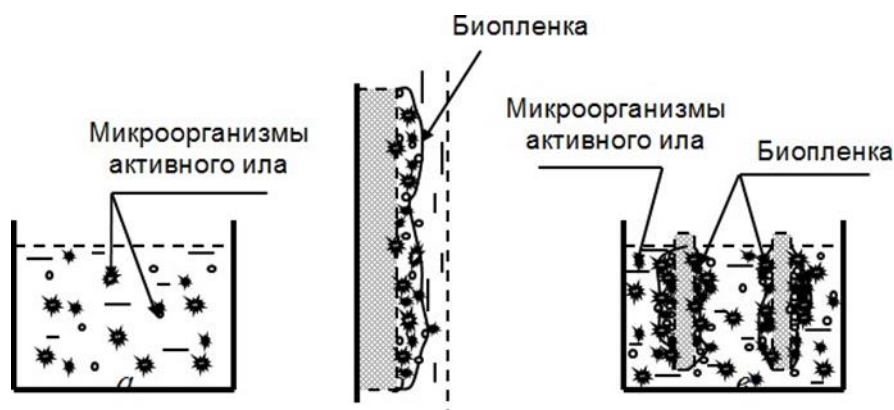


Рисунок 4 – Активный ил и биопленка

Повышенное очищения сточной воды в сооружениях биологической очистки фильтрующего вида из-за результата управления морфогенезом биоплёнки – важнейшая задача, решение которой лежит в раскрытии биологических связей в биопленке и объяснении механизмов протекающих процессов.

Биопленка – это особая модель колониальной организации бактерий. «Микроколонии создаются в слизистом матриксе, поделённые каналами. Развитие биоплёнок наступает с бактериальной адгезии и синтеза полимерного матрикса, исполняющего защитную функцию» [5].

Благодаря продуцируемому микробами матриксу увеличивается устойчивость биоценоза к вредным веществам в десятки, а иногда и в сотни раз, так как он блокирует проникновение в биопленку токсикантов. Следовательно, существенного отрицательного воздействия от загрязняющих веществ в стоках биоценозу биопленок нанесено не будет. После того, как рост биопленки достигнет определенного момента, они отмирают, частицы биопленки отпадают и уносятся очищенными сточными водами. Так формируются свободноплавающие фрагменты биопленки, если в них число живых микроорганизмов значительно, то формируются комбинированные биомассы, схожие по своему составу также строению к активному илу.

Бактерии готовы сформировать биопленку на каждом материале: древесина, пластик, металл, и на различных поверхностях. «Биопленки

принимают участие не только в очистке сточных вод от загрязнений, но и обеззараживании отработанных сточных вод» [5].

«Биопленка биофильтров представляет собой сложное сообщество, состоящее из бактерий разных видов, простейших, а иногда и водорослей. И в этом случае общность действия составляющих биопленку микроорганизмов определяют аутоиндукторы, которые передают информацию общую для организмов различного систематического уровня» [5].

«Важной особенностью биопленки биофильтра является ее сформированная рабочая поверхность, которая может быть повышена за счет пористой загрузки биофильтра. В биофильтрах и реакторах с иммобилизованной микрофлорой для наращивания биомассы применяют различные биологически инертные носители («биозагрузку»), например, керамика, пеностекло, органические полимерные элементы, или устройства, позволяющие увеличить рабочую поверхность контакта биопленки с очищаемой водой, например, дисковые фильтры» [7].

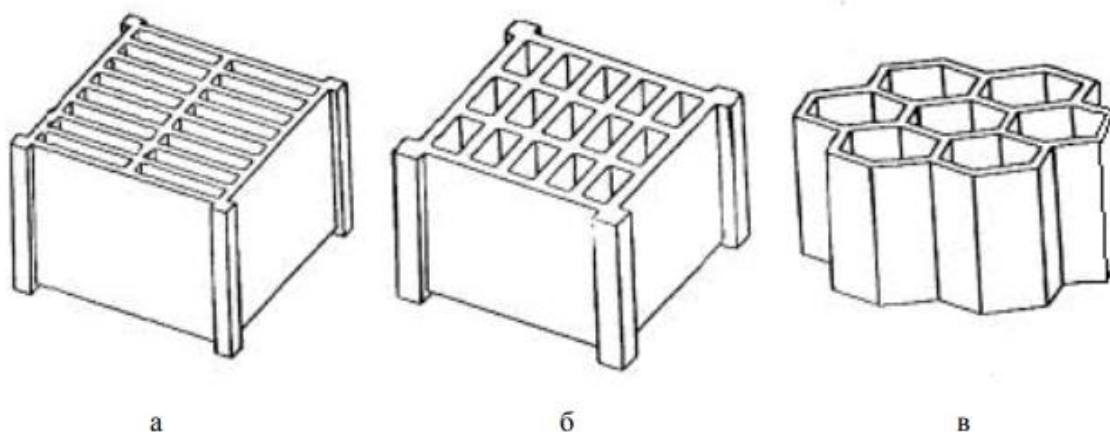
2.4 Конструктивное исполнение контактных загрузочных материалов-носителей биомассы

Немаловажную значимость в составе биореактора представляет загрузочный материал. Конкретно от конструкции биозагрузки зависит объем биомассы, площадь и толщина биопленки, доступность кислорода и т.д. Эффективность работы биореактора напрямую зависит от выше перечисленных параметров. «Загрузочные материалы делятся на две группы: объемную загрузку и плоскостную загрузку» [6].

«В качестве объемной загрузки в биофильтрах применяется гравий, шлак, керамзит, и другие материалы с пористостью (40-50 %)» [6]. Главным их минусом считается малая удельная поверхность, отсутствие движения материала при прохождении через него сточных вод, опасность заиливания.

«Важным технологическим параметром является крупность зерен загрузки. Слишком мелкие зерна подвержены заиливанию, что способствует ухудшению циркуляции воздуха. Крупные зерна отличаются меньшей эффективностью, но более неприхотливы в эксплуатации. Заиливание загрузки может приводить к неравномерному распределению жидкости и снижению эффективности очистки. Снижение степени заиливания возможно за счет применения биофильтров с листовой и рулонной пластиковой загрузкой. Они отличаются увеличенной степенью рециркуляции и гидравлической нагрузкой. Увеличение пористости и быстрый проток жидкости препятствуют заиливанию» [7].

Широкое применение с точки зрения ускоренного монтажа и демонтажа получила блочная загрузка (рисунок 5).



а – щелевые блоки; б – решетчатые блоки; в – сотовые блоки

Рисунок 5 – Блочные насадки

Однако её недостаток — это малое конструктивное пространство между элементами, и в процессе использования оно заполняется твердыми частицами и подвергается заиливанию. А также удельная поверхность меньше относительно плавающей загрузки.

Объемные загрузки, такие, как кольца Рашига, а также их производные (рисунок 6), тоже подвержены высокой степени заиливания, требуют частой регенерации с полным очищением внутреннего пространства.

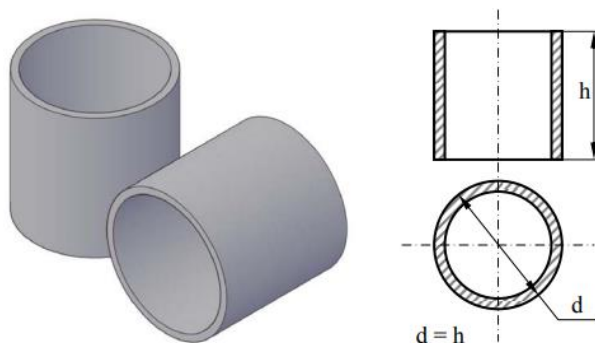


Рисунок 6 – Кольца Рашига

«Среди жестко закрепленной загрузки наибольшее распространение в РФ получила ершовая загрузка (рисунок 7), показывающая хорошие результаты очистки. Она представляет собой каркасный стержень, на котором крепятся нормально направленные щетины. Данная загрузка обладает высокой удельной поверхностью, а плотная расположение элементов позволяет работать загрузке как фильтру» [7].

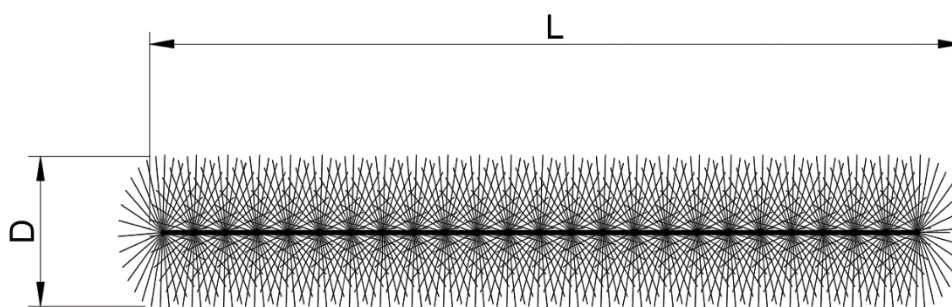


Рисунок 7 – Схематичное изображение элемента ершовой загрузки

Предоставленная загрузка также обладает несколькими недочетами. Основа (сердечник) производится из металла, что приводит к его коррозии, выпадению щетин и разламыванию конструкции ерша. Из-за большей длины

щетин при значительной динамике потока может происходить разрушение биопленки и открепление биомассы.

Около сердечника расстояние между щетинами уменьшается из-за зарастания части загрузки, что приводит к образованию внутри нее мертвых зон. «При формировании большого количества элементов в кассету может наблюдаться соприкосновение между отдельными элементами, что наряду с обеспечением глубокой фильтрации воды приводит к затруднению внутренней циркуляции жидкости через кассету при заиливании поверхности носителя. Это приводит к снижению контактной площади, заиливанию загрузки и нарушению расчетных технологических параметров процесса очистки сточных вод. Разрушение сердечника также может приводить к поломке насосов, перекачивающих жидкость с отпавшими щетинами, полному разрушению элементов загрузки под собственным весом при плановом опорожнении сооружений» [7].

2.5 Патентный поиск исполнения биозагрузок для контактных биореакторов

Патентный поиск исполнения биозагрузок для контактных биореакторов сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Патентный поиск исполнения биозагрузок для контактных биореакторов

Номер патента	Авторы, патентообладатели	Название патента	Формула изобретения
⁽¹⁹⁾ RU ⁽¹¹⁾ 2 049 736 ⁽¹³⁾ C1	Залетова Нина Анатольевна; Залетов Сергей Владимирович	Загрузка для биологической очистки сточных вод	«Загрузка для биологической очистки сточных вод, содержащая жесткое основание и носитель для иммобилизации микроорганизмов, прикрепленный к жесткому основанию, отличающаяся тем, что основание выполнено в виде параллельно и/или коаксиально расположенных прутков, образующих решетку, носитель выполнен из пенопласта с замкнутыми порами и плотностью менее единицы в виде отрезков шнура диаметром 5-50 мм, прикрепленных одним концом к пруткам решетки на расстоянии между осями рядом расположенных шнуров не менее 1,5 диаметра шнура, причем расстояние между прутками решетки составляет не менее 1,5 диаметра шнура» [6].
⁽¹⁹⁾ RU ⁽¹¹⁾ 152 194 ⁽¹³⁾ U1	Пукемо Михаил Михайлович	Биологическая загрузка для биореактора	Биологическая загрузка для биореактора, содержащая полимерные нити, «которые образуют полотно со множеством петель, равномерно распределенных по всему полотну, при этом полотно адаптировано для пространственного ориентирования в виде цилиндра, и петли располагаются с внешней стороны цилиндра, отличающаяся тем, что биологическая загрузка для биореактора дополнительно имеет внутренний слой, выполненный из полиэтилена высокого давления и имеющего полиморфную структуру, биологическая загрузка для биореактора дополнительно имеет средний слой, формирующий несущий каркас изделия, имеющий градиентный поровый переход на внешний слой, образованный полотном из полимерных нитей, внешний слой, образованный полотном из полимерных нитей выполнен из полипропиленового волокна» [6].

Продолжение таблицы 2

(19) RU (11) 75 383 (13) U1	Душко Артем Олегович	Элемент загрузки для биореактора	«Элемент загрузки для биореактора , содержащий выполненные из полипропилена как единое целое последовательно соединенные между собой с осевым сквозным отверстием цилиндрическое основание, на средней части внешней поверхности которого расположен слой с шаровой поверхностью, посередине которой установлен охватывающий ее плоский кольцевой перфорированный пояс, с перфорированными плоскими кольцевыми поверхностями которого, с шаровой поверхностью слоя и с крайними частями внешней поверхности цилиндрического основания соединены равномерно распределенные в радиальном направлении с обеих сторон плоского кольцевого пояса ребра, которые своей внешней поверхностью совместно с внешней поверхностью пояса образуют шарообразную форму элемента. Направление движение очищаемой сточной воды в биореакторе через загрузку сверху вниз. Необходимый для процессов биологической очистки воздух подают снизу. При этом на элементах загрузки образуется биопленка, микронаселение которой производит биологическое окисление загрязнений в сточных водах. Периодически производят регенерацию загрузочного материала. Использование предложенной полезной модели в сооружениях биологической очистки природных и сточных вод позволяет достичь увеличить концентрацию биомассы в очистных сооружениях, что дает существенное повышение степени очистки, снижает энергозатраты, повышает пропускную способность биореактора» [6].
--------------------------------	-------------------------	-------------------------------------	--

Выводы по второму разделу:

- в цехе № 39 предприятия ПАО «КуйбышевАзот» используется контактный биореактор аэрильного типа исполнения, с пластиковой закрепленной загрузкой;

- произведен патентный поиск существующих биозагрузок для контактных биореакторов;

- наиболее эффективной на территории РФ для контактных биореакторов признана жесткозакрепленная загрузка ершового типа. Она имеет значительную удельную поверхность, а плотная раскладка элементов позволяет работать загрузке как фильтру, удобна с позиции монтажа и демонтажа. На основе вышесказанного эта загрузка подобрана в качестве аналога при проведении последующих исследований;

- были изучены структура и видовой состав биоценоза, а также окислительной мощности объема загрузки и массы биоценоза

3 Исследование формирования биопленок на загрузках блочного и ершового типа

Для обоснования технологии внедрения, был проведен анализ эксперимента.

Цель эксперимента – установление зависимости эффективности образования биопленки на поверхности ершовой загрузки от длины щетин и температуры сточных вод в биореакторе.

Воспроизведение процесса производилось в лабораторных условиях с реальными сточными водами [4].

В качестве основного параметра примем вес биомассы одного элемента загрузки, входные факторы: длина щетины и температура стоков в реакторе.

Длина щетины (x_1): примем следующие пределы $12\text{мм} \pm 6\text{ мм}$ – для предотвращения заиливания и открепления биомассы.

Температура сточных вод (x_2): $20 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ – для зимнего периода будет поддерживаться средняя температура $20\text{ }^\circ\text{C}$, в летний период – $22\text{ }^\circ\text{C}$. Минимальная температура $18\text{ }^\circ\text{C}$, максимальная $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Масса мокрых кассет загрузки до начала эксперимента: блочная загрузка – 910 грамм, ершовая – 570 грамм. Сухих кассет: блочная загрузка – 720 грамм, ершовая – 480 грамм.

Результаты изучения прироста биомассы осуществлялось в мокром весе гравиметрическим методом.

Состав сточных вод: пределы ($\text{БПК}_5 = 190\text{-}210\text{ мг О}_2/\text{л}$, $\text{ХПК} = 200\text{-}240\text{ мг О}_2/\text{л}$).

«Полученные данные по весу загрузки с биомассой использовались в расчетах. Для описания процесса роста биомассы на поверхности исследованных загрузочных материалов использованы следующие параметры» [3]:

«1. Вес биомассы при мокром взвешивании M_{bw} , кг, определялся по формуле (1)» [3]:

$$M_{bw} = M_m - M_{m0} = \Delta M_m, \quad (1)$$

где M_{m0} , M_m – масса загрузки до и после роста биомассы, кг.

«2. Изменение веса биомассы определялось по формуле (2)» [3]:

$$\Delta M_{bw} = M_{bw2} - M_{bw1}, \quad (2)$$

где ΔM_{bw} – изменение веса биомассы, кг;

M_{bw1} , M_{bw2} – вес биомассы при мокром взвешивании в начале и конце рассматриваемого временного промежутка, кг.

«3. Объемный вес биомассы находим по формуле (3)» [3]:

$$M_{bM} = \frac{M_{bw}}{V_m}, \quad (3)$$

где M_{bM} – объемный вес биомассы, кг/м³ загрузки;

V_m – объем загрузки, м³.

«4. Изменение веса биомассы в сутки находим по формуле (4)» [3]:

$$v_b = \frac{\Delta M_{bw}}{\Delta T}, \quad (4)$$

где v_b – изменение веса биомассы в сутки, кг/сут;

ΔT – рассматриваемый временной промежуток между взвешиваниями, сут.

«5. Скорость роста биомассы загрузки находим по формуле (5)» [3]:

$$v_{bM} = \frac{v_b}{V_m}, \quad (5)$$

где v_{bM} – скорость роста биомассы загрузки, кг/(м³·сут) загрузки.

«При проведении исследований отслеживалось количество биомассы при мокром взвешивании. Отобранные пробы биопленки с поверхности блочной и ершовой загрузки были проанализированы, определена влажность биопленок, которая составила 96,7 %» [3].

Оценка изменения биомассы по сухому веществу проведена с учетом экспериментально полученной влажности биопленки». Вес и изменение веса биомассы по сухому веществу рассчитаны по формулам (6) и (7):

$$M_{bd} = \frac{M_{bw}(100-W_b)}{100}, \quad (6)$$

$$\Delta M_{bd} = \frac{\Delta M_{bw}(100-W_b)}{100}. \quad (7)$$

где M_{bd} – вес биомассы по сухому веществу, кг;

ΔM_{bd} – изменение веса биомассы по сухому веществу, кг;

W_b – влажность биопленки, принимаем 96,7 %.

Результаты исследований сведем в таблицу 3 и 4. На графике (рисунок 8) наглядно изобразим результаты изменения роста биомассы.

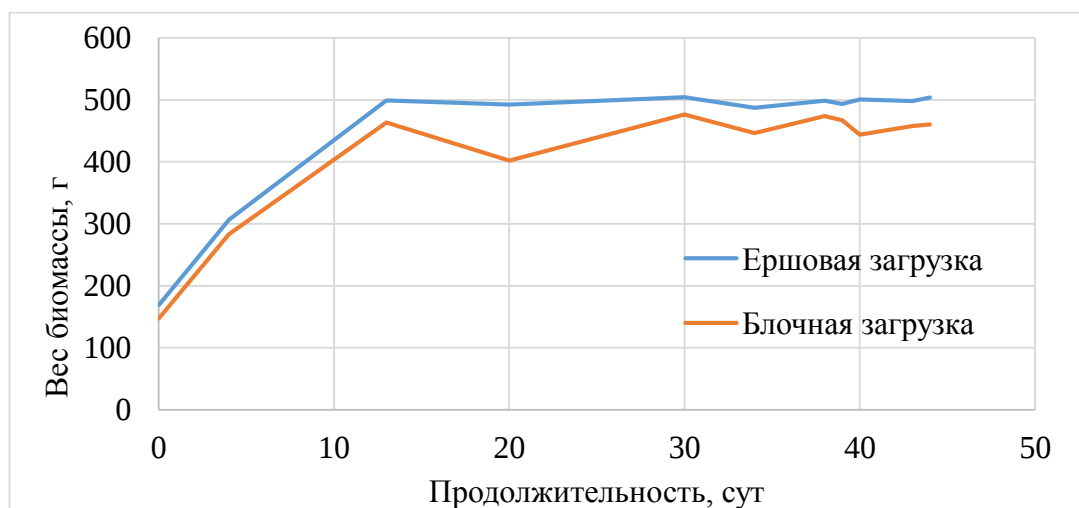


Рисунок 8 – Динамика изменения веса биомассы на загрузках

Таблица 3 – Результаты исследования роста биомассы

Т, сутки	Вес загрузки с биомассой, г		Вес биомассы, г				Объемный вес биомассы, г/л			
			Мокрое взвешивание		Сухое взвешивание		Мокрое взвешивание		Сухое взвешивание	
	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная
0	190	303	–	–	–	–	–	–	–	–
4	362	451	169	147	6,4	5,6	85	74	3,2	2,8
13	520	587	307	283	11,7	10,8	153	142	5,8	5,4
20	750	767	499	463	19,0	17,6	250	232	9,5	8,8
30	770	781	493	402	18,7	15,3	246	201	9,4	7,6
34	781	780	504	477	19,2	18,1	252	238	9,6	9,1
38	770	772	487	447	18,5	17,0	244	223	9,3	8,5
39	768	750	499	474	18,9	18,0	249	237	9,5	9,0
40	759	749	494	467	18,8	17,7	247	234	9,4	8,9
43	780	750	501	444	19,0	16,9	250	222	9,5	8,4
44	782	742	498	458	18,9	17,4	249	229	9,5	8,7
45	790	738	504	460	19,2	17,5	252	230	9,6	8,8

Таблица 4 – Изменение веса биомассы и скорости роста биомассы

Т, сутки	Изменение веса биомассы, г				Изменение веса биомассы в сутки, г/сут				Скорость роста биомассы, г/(л·сутки)			
	Мокрое взвешивание		Сухое взвешивание		Мокрое взвешивание		Сухое взвешивание		Мокрое взвешивание		Сухое взвешивание	
	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная
0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	172,00	147,33	6,40	5,60	43,00	36,83	1,60	1,40	21,50	18,42	0,80	0,70
13	158,00	136,00	5,23	5,17	17,56	15,11	0,58	0,57	8,78	7,56	0,29	0,29
20	230,00	180,00	7,30	6,83	32,86	25,71	1,04	0,98	16,43	12,86	0,52	0,49
30	20,00	14,33	-0,23	-2,33	2,00	1,43	-0,02	-0,23	1,00	0,72	-0,01	-0,12
34	11,00	-1,00	0,43	2,83	2,75	-0,25	0,11	0,71	1,38	-0,13	0,05	0,35
38	-11,00	-8,00	-0,63	-1,13	-2,75	-2,00	-0,16	-0,28	-1,38	-1,00	-0,08	-0,14
39	-2,00	-22,00	0,40	1,03	-2,00	-22,00	0,40	1,03	-1,00	-11,00	0,20	0,52
40	-9,00	-1,00	-0,17	-0,27	-9,00	-1,00	-0,17	-0,27	-4,50	-0,50	-0,08	-0,13
43	21,00	1,00	0,27	-0,87	7,00	0,33	0,09	-0,29	3,50	0,17	0,04	-0,14
44	2,00	-8,00	-0,10	0,53	2,00	-8,00	-0,10	0,53	1,00	-4,00	-0,05	0,27
45	8,00	-4,00	0,23	0,10	8,00	-4,00	0,23	0,10	4,00	-2,00	0,12	0,05

По графику (рисунок 9) и результатам проведенных опытов, можем выявить, что образование биопленки на биозагрузке ершового типа протекало более эффективно, нежели на биозагрузке блочного образца (рисунок 10).

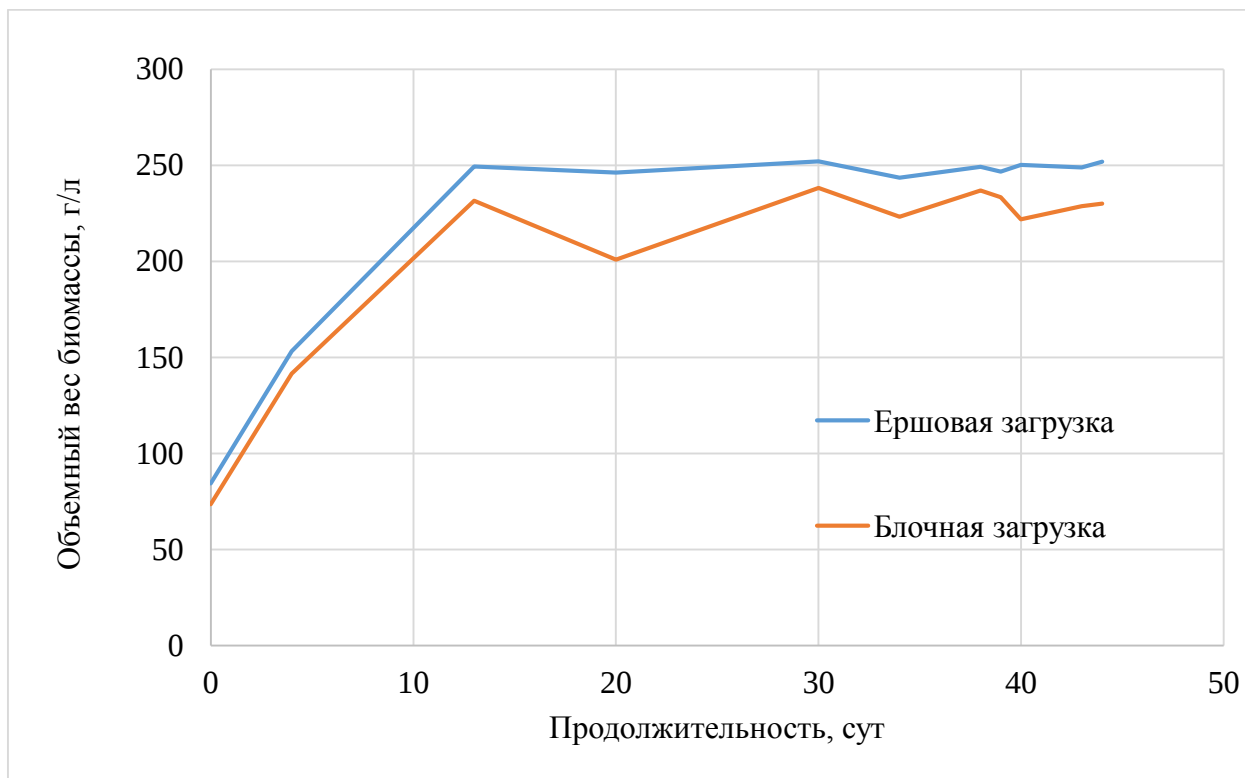


Рисунок 9 – Изменение объемного веса биомассы

По графику «Изменение объемного веса биомассы» на рисунке 9, построенному по результатам эксперимента, можно определить, что первые десять суток происходит активное формирование биопленки, далее вес биопленки изменяется незначительно.

Также была рассчитана удельная скорость изменения веса биомассы в сутки (рисунок 10). Скорость образования биопленки на жесткозакрепленной ершовой загрузке выше, чем на загрузке блочного типа. Ближе к 40 суткам можно наблюдать стабилизацию процесса образования биопленки. Процесс обновления биомассы на жесткозакрепленной ершовой загрузке тоже эффективнее, нежели на блочной загрузке.

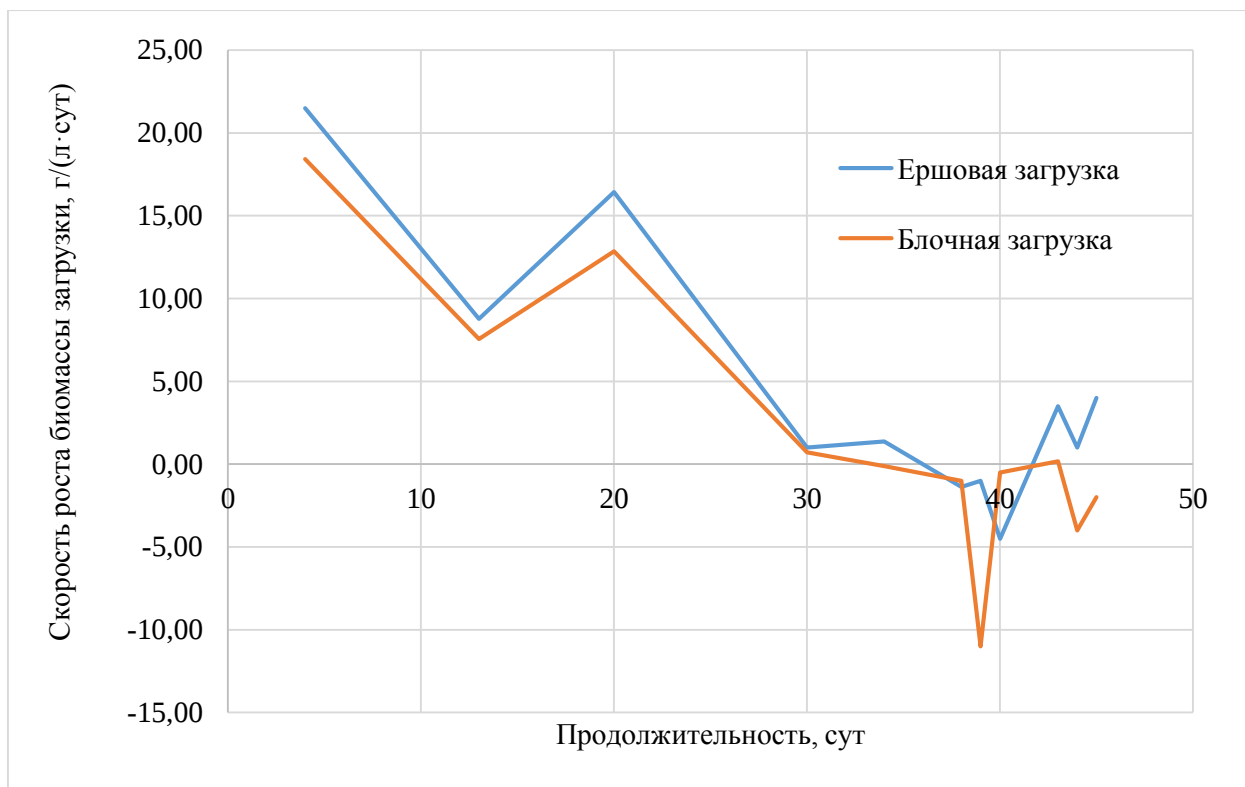


Рисунок 10 – Изменение скорости роста биомассы

Выводы по третьему разделу:

В ходе анализа эксперимента было установлено, что ершовая жесткозакрепленная загрузка эффективнее загрузки блочного типа, процесс образования биопленки на данном виде загрузки протекает быстрее в 1,5 раза.

4 Расчетная часть

4.1 Исследование кинетики окисления органических веществ

Данный раздел главы посвятим исследованию кинетики окисления органических веществ, для определения окислительной мощности биореактора для дальнейшего повышения его эффективности.

В таблицу 5 внесем данные, полученные из проведенного эксперимента и информацию по биореактору из технологического регламента необходимые нам для расчета.

Таблица 5 – Основные рабочие характеристики биореактора

Параметр	Обозначение	Ершовая загрузка	Блочная загрузка
Объем биореактора, м ³	W_p	434,4	434,4
Объем загрузки, м ³	W_z	182,4	182,4
Объем загрузки без учета полостей, м ³	W_{z-p}	62,2	120,7
Объем очищаемых сточных вод, м ³	V_w	372,2	313,7
Вес биомассы на загрузке (мокрое взвешивание), кг	W_{bw}	45964,8	41952,0
Вес биомассы на загрузке (сухое взвешивание), кг	W_{bd}	1751,1	1596,0

Для оценки изменения массового содержания органических веществ в ходе эксперимента замерялись ХПК и БПК в течение 12 часов, далее были определены массы M , г, по формуле (8):

$$M = \frac{\alpha_{\text{еп}} \cdot V_w}{1000}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{еп}}$ – БПК или ХПК, г O_2/m^3 или г O/m^3 ;

V_w – объем очищаемых сточных вод, м³.

Полученные значения сведем в таблицу 6.

Таблица 6 – Кинетика изменения БПК_п и ХПК ершовой и блочной загрузки

Т, час	Изменение БПК _п и ХПК				Масса БПК _п и ХПК				Скорость окисления 1 м ³ загрузки, г/(м ³ ·ч)			
	БПК _п , мгО ₂ /л		ХПК, мгО/л		БПК _п , гО ₂		ХПК, гО		БПК _п		ХПК	
	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная	Ершовая	Блочная
0	200,0	200,0	220,0	220,0	74,44	62,74	81,88	69,01	—	—	—	—
1	180,0	179,2	200,0	198,3	67,00	56,22	74,44	62,21	40,81	35,77	40,81	37,32
2	162,1	162,3	182,0	181,2	60,33	50,91	67,74	56,84	36,53	30,1	36,73	29,41
3	142,3	144,8	158,3	156,3	52,96	45,42	58,92	49,03	30,4	29,07	31,36	26,82
4	122,1	129,6	136,5	131,2	45,45	40,66	50,81	41,16	27,22	26,14	26,48	23,17
5	95,6	110,2	119,3	113,6	35,58	34,57	44,40	35,64	24,08	21,55	21,10	19,27
6	72,3	92,3	95,6	89,3	26,91	28,95	35,58	28,01	18,55	16,79	18,36	16,79
18	3,0	22,3	4,5	7,4	1,12	7,00	1,67	2,32	11,78	10,03	15,49	11,74

Для расчета скорости окисления по БПК и ХПК используют следующую формулу (9):

$$\rho_{V,i} = \frac{M_{i-1} - M_i}{V_m (t_i - t_{i-1})}, \quad (9)$$

где t_i, t_{i-1} – продолжительность эксперимента, ч.

По полученным данным из таблицы 6 был построен график (рисунок 11 и 12) динамики спада скорости окисления веществ для ершовой и блочной загрузки.

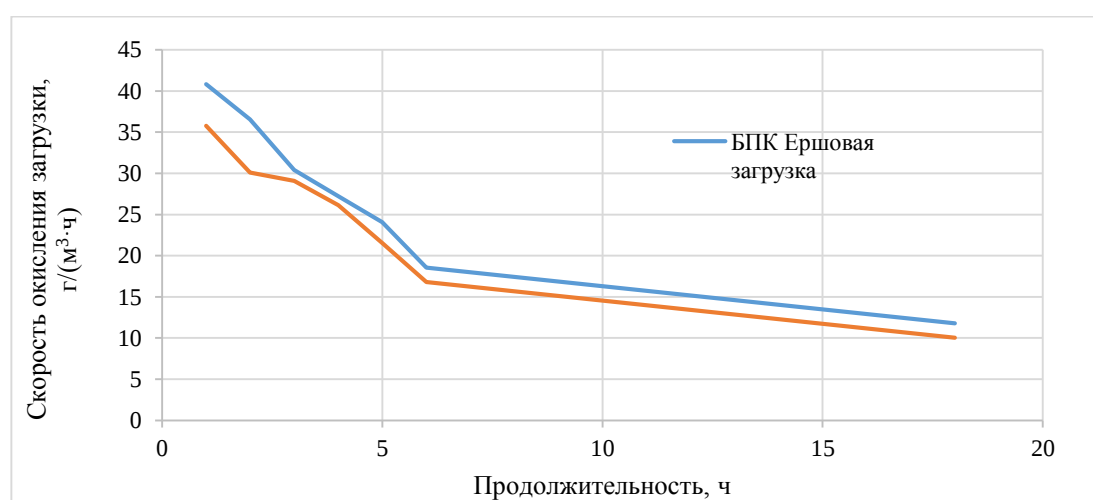


Рисунок 11 – Изменение скорости окисления загрязняющих веществ по БПК от продолжительности очистки

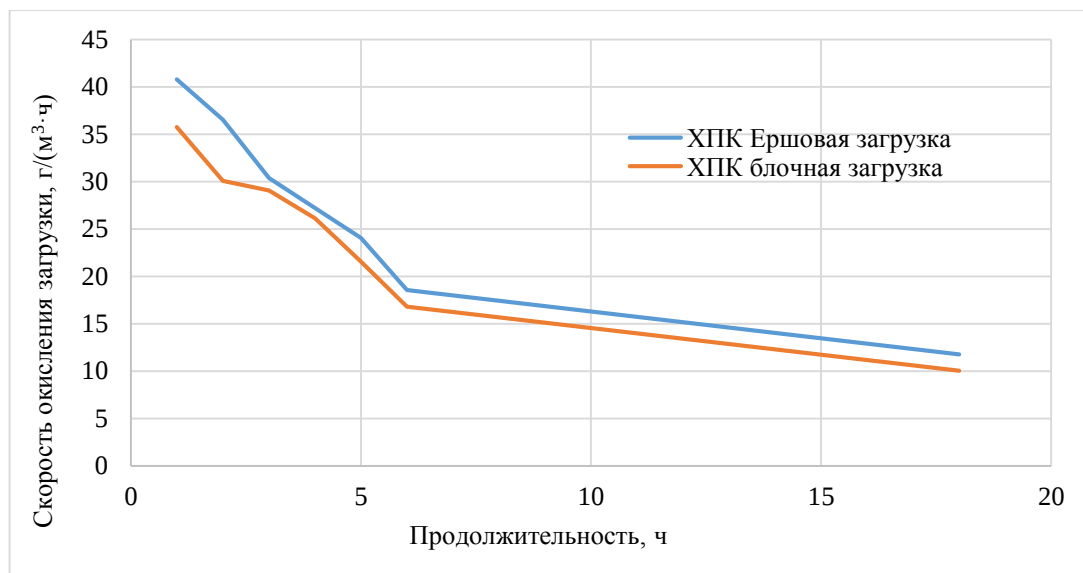


Рисунок 12 – Изменение скорости окисления загрязняющих веществ по ХПК от продолжительности очистки

Скорости окисления загрязняющих веществ описывается уравнением (10) первого порядка, которое имеет следующий вид:

$$Y = a \cdot e^{[b \cdot t]}, \quad (10)$$

где Y – величина БПК, ХПК в момент времени t , мг O_2 /л (мг O /л);

a – начальное значение БПК_п или ХПК, мг O_2 /л (мг O /л);

b – константа скорости, ч⁻¹;

t – время, ч.

Эффективность очистки найдем по формуле (11):

$$\Xi = \frac{\alpha_{\text{еп}} - \alpha_{\text{ех}}}{\alpha_{\text{еп}}} \cdot 100, \quad (11)$$

где $\alpha_{\text{ех}}$, $\alpha_{\text{еп}}$ – БПК_п соответственно очищенных и поступающих сточных вод, мг O_2 /л.

Найдем эффективность очистки подставив значения формулу (11).

$$\Xi = \frac{200-3}{200} \cdot 100 = 98,5\%.$$

Преобразовав уравнение 10, получим для ершовой и блочной загрузки соответственно:

$$\text{БПК}_t = 200 \cdot \exp^{-0,23 \cdot t},$$

$$\text{ХПК}_t = 220 \cdot \exp^{-0,22 \cdot t},$$

$$\text{БПК}_t = 200 \cdot \exp^{-0,12 \cdot t},$$

$$\text{ХПК}_t = 220 \cdot \exp^{-0,13 \cdot t}.$$

По преобразованным уравнениям и по графикам (рисунки 10 и 11) можно сделать выводы, что скорости окисления по БПК и ХПК для блочной загрузки меньше нежели для ершовой загрузки, скорость окисления прямо пропорционально зависит от содержания ХПК и БПК_п в сточных водах, ершовой загрузка, без учета объема полостей, позволит накопить схожую биомассу для меньшего объема, что положительно скажется на массообмене и гидродинамике процесса, протекающего в биореакторе.

4.2 Составление и анализ математической модели биологической очистки сточных вод

Для составления математической модели нужно рассмотреть и описать все элементарные процессы, входящие в единую систему. Проанализировав все подсистемы, можно приступить к описанию исследуемого процесса. На рисунке 13 продемонстрировано из чего формируется математическая модель.

Перед составлением математической модели нужно сделать описание самого процесса, особенностей конструктивного строения с учетом аппаратного оснащения [1].

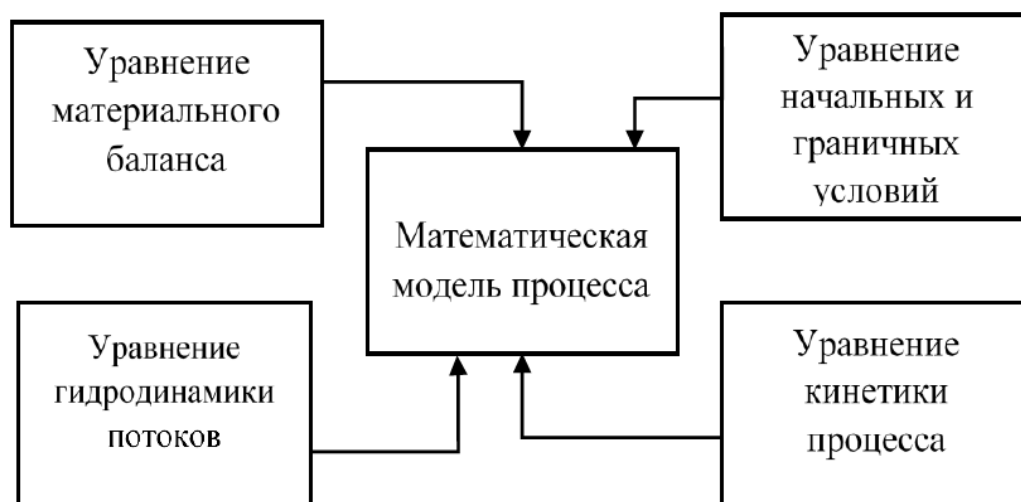


Рисунок 13 – Описание математической модели

Например, процессы, проходящие в отдельных аппаратах с мешалками, отношение высоты которых к диаметру небольшое представляет модель идеального смешения. Модель идеального вытеснения используют в аппаратах, с диаметром много меньшем длины.

Математическая модель помогает проследить как протекают те или иные процессы, например, процесс изъятия из стоков органических соединений или определить зависимость значений концентраций примесей на выходе от значений на входе.

Благодаря математическим моделям возможно усовершенствование механизмов или оптимизация различных процессов как уже действующих очистных сооружений, так и незапущенных. Для моделирования работы очистных сооружений необходимо принять её как модель с определенными параметрами и устойчивыми стационарными состояниями.

Базовые модели в математическом моделировании помогают определить наиболее важные для протекающих процессов характеристики.

Чаще всего в моделировании очистных сооружений применяют модели активного ила ASM1, ASM2 и ASM3, которые характеризуют кинетику очистки загрязняющих веществ в процессе роста биомассы. Первая из этих моделей была разработана в 1987 году

4.3 Составление математической модели

В качестве базовой модели были использована модель Герберта и Моно, которая не только характеризует динамику роста и распада бактерий, но и описывает процесс окисления, разложения органических веществ, гниение и изменение щелочности среды.

Модель Моно используют когда необходимо описать простую математическую модель кинетики роста популяций за единицу времени формула (12).

$$\frac{dx}{dt} = V \cdot x, \quad (12)$$

где x – концентрация биомассы, г/л;

V – удельная скорость роста микроорганизмов.

Уравнение Михаэлиса-Ментен используется для описания удельной скорости роста микроорганизмов (13), оно имеет следующий вид:

$$V = V_{max} \cdot \frac{S}{K_m + S}, \quad (13)$$

где V_{max} – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;

S – концентрация субстрата;

K_m – константа полунасыщения, характеризующая концентрацию субстрата, при которой происходит достижение половины от максимального удельной скорости роста.

Графическое описание данного уравнения показано на рисунке 14.

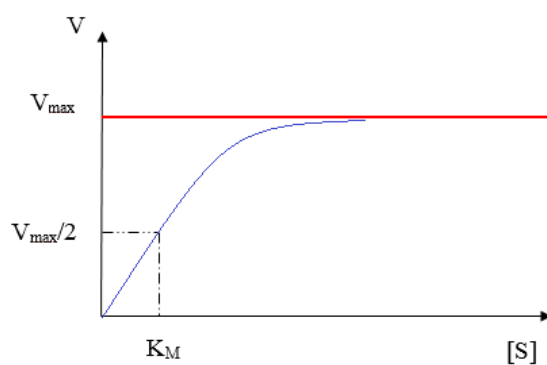
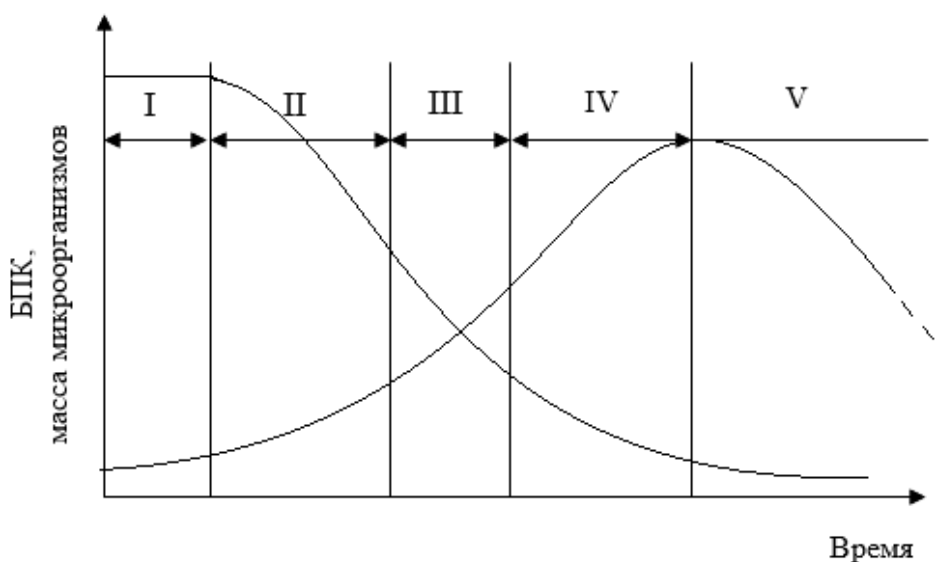


Рисунок 14 – Описание кинетики закона Михаэлиса-Ментен

Для описания роста микроорганизмов используется модель, которая разделена на 5 фаз. На рисунке 15 показана динамика БПК в каждой из фаз.



I – лаг-фаза; II – фаза экспоненциального роста; III – фаза замедленного роста; IV – фаза нулевого роста; V – фаза эндогенного дыхания

Рисунок 15 – Фазовая диаграмма роста микроорганизмов

По рисунку 15 можно сделать вывод о том, что в первой фазе не наблюдается значительного прироста микроорганизмов. Это объясняется тем, что на данном этапе биомасса только начинает адаптироваться к загрязненной среде. Вторая фаза характеризуется экспоненциальным ростом микроорганизмов, где наблюдается максимальная скорость размножения

клеток. В следующих фазах такой бурный рост имеет тенденцию к замедлению из-за постепенного истощения питательных веществ. Как только питательные вещества приближаются к балансу между накопленной биомассой, наступает четвертая фаза - фаза нулевого роста. Смещение такого баланса в сторону накопленной биомассы характеризуется фазой самоокисления, где количество отмирающих клеток становится больше роста новых.

Для описания роста биомассы и дальнейшего выведения загрязнений принято использовать ячеечную модель, которая характеризует поток сточной воды в биореакторе (Приложение А, рисунок А 1 - Схема биореактора) как последовательно соединенные, несмешивающиеся между собой, ячейки. За счет образования в каждой из ячеек режима полного смешения удастся добиться однородности определяемых параметров. Ячейки в такой модели являются главным параметром. Модель полного смешения заменяется на модель идеального вытеснения если в системе используется только одна ячейка.

При проведении очистки загрязняющих веществ их концентрации изменяются прямо пропорционально концентрации биомассы активного ила. Главным, в данной очистке является количественная характеристика этой концентрации, она должна быть невысокой, так как, в противном случае увеличиваются энергозатраты.

«Задачей стабилизации является поддержание максимально допустимых концентраций загрязняющих веществ и ила ($L_{\max}$ и $X_{\max}$ соответственно) в допустимых пределах формула (14)» [12]:

$$\begin{cases} L(t) \leq L_{\max} \\ X(t) \leq X_{\max} \end{cases}, \quad (14)$$

«Математическая модель, описывающая процессы биологической очистки сточных вод, представлена в виде системы дифференциальных уравнений материального баланса, показывающих динамику изменения концентрации загрязнений, активного ила и растворенного кислорода формула (15)» [12]:

$$\frac{dL_{out}^j}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (L_{out(i-1)}^j - L_{out(i)}^j) + R_{Li}^j, \quad (15)$$

где $L_{out(i)}^j$ и $L_{out(i-1)}^j$ – концентрация j-го компонента в рассматриваемой

i-й ячейке и в предыдущей, мг/л;

Q – загрузка сточной воды, м³/ч;

V – объем ячейки, м³;

R_i – коэффициент рециркуляции активного ила;

R_{Li}^j – скорость потребления j-го субстрата в i-й ячейке, мг/л·ч.

Отталкиваясь от сведений технологического регламента производственных процессов о численности ячеек и фактических показателях прибывающих стоков допускается определить объем поступающих стоков в 1 ячейку за 1 час (для биологической очистки используется 24 кассет с биоагрузкой по 182,4 м³ каждый, за 1 ячейку принимаем 1 кассету загрузки биореактора (рисунок 16) и формула (16):

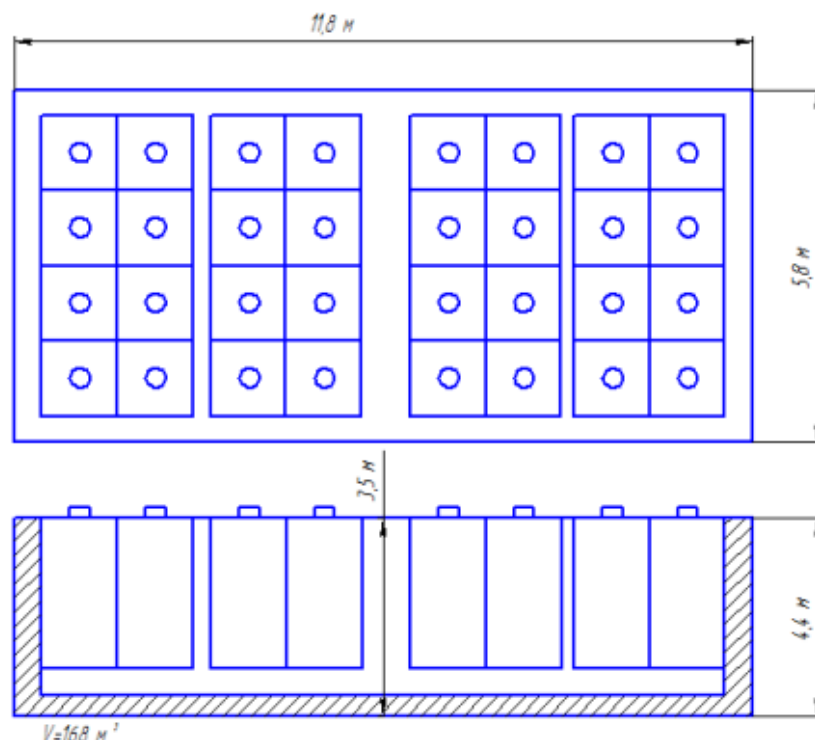


Рисунок 16 – Расположение кассет в биореакторе

$$V = \frac{Q}{N}, \quad (16)$$

где Q – загрузка стоков, м³/ч;

N – количество ячеек.

$$V = \frac{372,2}{24} = 15,5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

«Для последующих расчетов следует объяснить значимости такого показателя как иловый индекс. Иловый индекс обуславливается отношением объема активного ила после 30 минут отстаивания 100 мл иловой смеси к 1 г сухого вещества ила» [12].

«Ил с характеристиками глубокой минерализации имеет индекс 60-90 г/л, значение илового индекса в диапазоне 70-120 г/л считается нормальным для работы, а при показателях илового индекса в диапазоне 150-200 г/л – ил «плохо работает» (зачастую это происходит из-за увеличения

численности анаэробных бактерий, развивающихся в условиях отсутствия кислорода) или попадания сильно токсичных веществ в стоки, что может привести к вспуханию ила» [12].

Для того, чтобы рассчитать степень рециркуляции активного ила в i -й ячейке воспользуемся следующей формулой (17):

$$R_i = \frac{a_i}{\frac{1000}{J_i} - a_i}, \quad (17)$$

где R_i – степень рециркуляции активного ила в ячейке;

a_i – доза ила в биореакторе (фактически в диапазоне от 1,8 до 3,0 г/л), равная 3 г/л;

J_i – иловый индекс, равный 110 см³/г.

Подставляя значения в формулу (17), получим следующее значение:

$$R_i = \frac{3}{\frac{1000}{110} - 3} = 0,5$$

Для рассмотрения динамики изменения концентрации биомассы воспользуемся уравнением, имеющее следующий вид:

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (X_{i-1} - X_i) + V_{Xi}, \quad (18)$$

где X_i и X_{i-1} – концентрация биомассы в рассматриваемой i -й ячейке и в предыдущей, г/л;

V_{xi} – скорость накопления биомассы, г/л в час.

Аналогичным образом, рассмотрим динамику изменения концентрации растворенного кислорода, для этого составим следующее уравнение (19):

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (C_{i-1} - C_i) + KLa \cdot (C_a - C_i) + R_{Ci}, \quad (19)$$

где C_i и C_{i-1} концентрация растворенного кислорода в рассматриваемой i -й ячейке и в предыдущей;

KLa – коэффициент массопередачи кислорода, ч^{-1} ;

C_a – концентрация насыщения воды кислородом при определенных параметрах температуры и давления, мг/л ;

R_{Ci} – скорость потребления кислорода, $\text{мг O}_2/\text{л в час}$.

Для составления математической модели объединим уравнения (15), (18) и (19) в одну систему, по которой возможно будет произвести расчет изменения концентраций загрязняющих веществ во времени формула (20).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dL_{out}^j}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (L_{out(i-1)}^j - L_{out(i)}^j) + R_{Li}^j \\ \frac{dX_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (X_{i-1} - X_i) + V_{Xi} \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (C_{i-1} - C_i) + KLa \cdot (C_a - C_i) + R_{Ci} \\ L(t) \leq L_{max}, X(t) \leq X_{max} \end{array} \right. \quad (20)$$

По системе уравнений (20) будет произведен расчет для ершовой и пластиковой загрузки в программном продукте Mathcad, алгоритм данного решения показан на рисунках 17, 18 и 19.

$$\begin{array}{llll}
 \underline{\text{ORIGIN}} := 1 & & & \\
 \underline{R} := 0.5 & B30 := 0 & F0 := 0 & \\
 \underline{V} := 673.5 & NO30 := 0 & Fe0 := 0 & \\
 Q := 270.9 & NO20 := 0 & x0 := 0 & \\
 Rc := 3 & N0 := 0 & B0 := 0 & \\
 Ri := 18.5 & Cl0 := 0 & & \\
 I := 4 & Cp0 := 0 & &
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 x := \begin{pmatrix} 187 \\ 165 \\ 80 \\ 153 \\ 99.5 \\ 71 \\ 72 \\ 60 \\ 200 \\ 3 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Рисунок 17 – Начальные параметры

$$D(x, X) := \begin{bmatrix} \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (B30 - X_1 + Rc) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (NO30 - X_2 + Rc) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (NO20 - X_3 + Rc) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (N0 - X_4 + Rc) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Cl0 - X_5 + Ri) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Cp0 - X_6 + Ri) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (F0 - X_7 + Ri) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Fe0 - X_8 + Ri) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (x0 - X_9 + Ri) \\ \left[\frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (B0 - X_{10} + Ri) \end{bmatrix}$$

Рисунок 18 – Уравнение изменение концентраций во времени

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	187	165	80	153	99.5	71	72	60	200	3
2	0.1	176.227	155.515	75.492	144.217	94.757	67.926	68.868	57.57	189.373	3.908
3	0.2	166.084	146.585	71.247	135.949	90.293	65.032	65.919	55.283	179.369	4.762
4	0.3	156.536	138.178	67.251	128.165	86.089	62.308	63.142	53.129	169.95	5.566
5	0.4	147.546	130.264	63.489	120.837	82.132	59.743	60.528	51.101	161.082	6.324
6	0.5	139.083	122.812	59.948	113.937	78.406	57.328	58.068	49.193	152.734	7.036
7	0.6	131.115	115.797	56.614	107.442	74.899	55.055	55.751	47.396	144.875	7.708
8	0.7	123.614	109.193	53.474	101.327	71.596	52.914	53.57	45.704	137.475	8.34
9	0.8	116.552	102.975	50.519	95.57	68.488	50.899	51.517	44.111	130.509	8.934
10	0.9	109.904	97.122	47.737	90.15	65.561	49.002	49.583	42.611	123.951	9.495
11	1	103.645	91.611	45.118	85.047	62.805	47.217	47.763	41.2	117.777	10.022
12	1.1	97.752	86.423	42.652	80.243	60.211	45.535	46.05	39.871	111.964	10.518
13	1.2	92.204	81.538	40.33	75.721	57.769	43.952	44.437	38.619	106.492	10.986
14	1.3	86.981	76.94	38.144	71.463	55.47	42.462	42.918	37.441	101.34	11.425
15	1.4	82.064	72.611	36.087	67.454	53.305	41.059	41.489	36.332	96.49	11.84
16	1.5	77.435	68.535	34.149	63.681	51.268	39.738	40.143	35.288	91.924	12.23
17	1.6	73.077	64.698	32.326	60.128	49.349	38.495	38.876	34.305	87.625	12.597
18	1.7	68.974	61.086	30.609	56.783	47.543	37.324	37.683	33.38	83.577	12.942
19	1.8	65.111	57.685	28.992	53.634	45.842	36.222	36.559	32.509	79.767	13.268
20	1.9	61.474	54.483	27.47	50.669	44.241	35.184	35.502	31.689	76.18	13.574
21	2	58.051	51.469	26.038	47.878	42.734	34.207	34.507	30.916	72.803	13.863
22	2.1	54.827	48.631	24.689	45.251	41.315	33.288	33.569	30.189	69.623	14.134
23	2.2	51.793	45.959	23.419	42.777	39.98	32.422	32.687	29.505	66.63	14.39
24	2.3	48.936	43.444	22.223	40.448	38.722	31.607	31.856	28.861	63.812	14.63
25	2.4	46.247	41.076	21.098	38.255	37.538	30.839	31.074	28.254	61.159	14.857
26	2.5	43.714	38.846	20.038	36.191	36.423	30.117	30.338	27.683	58.661	15.07
27	2.6	41.331	36.748	19.041	34.248	35.374	29.437	29.645	27.145	56.31	15.271
28	2.7	39.086	34.772	18.101	32.418	34.386	28.796	28.993	26.639	54.096	15.46
29	2.8	36.974	32.911	17.217	30.696	33.456	28.194	28.378	26.163	52.012	...

$z := \text{rkfixed}(x, 0, 10, 100, D) =$

Рисунок 19 – Результаты вычисленных концентраций загрязняющих веществ
ершовой загрузки

Полученные данные в таблице (рисунок 19) удобнее воспринимать в графическом виде. Так как мы имеем перечень загрязняющих веществ с численными показателями концентраций в диапазоне от менее 0,015 до 1300 мг/дм³ будет построен график, показанный на рисунке 20:

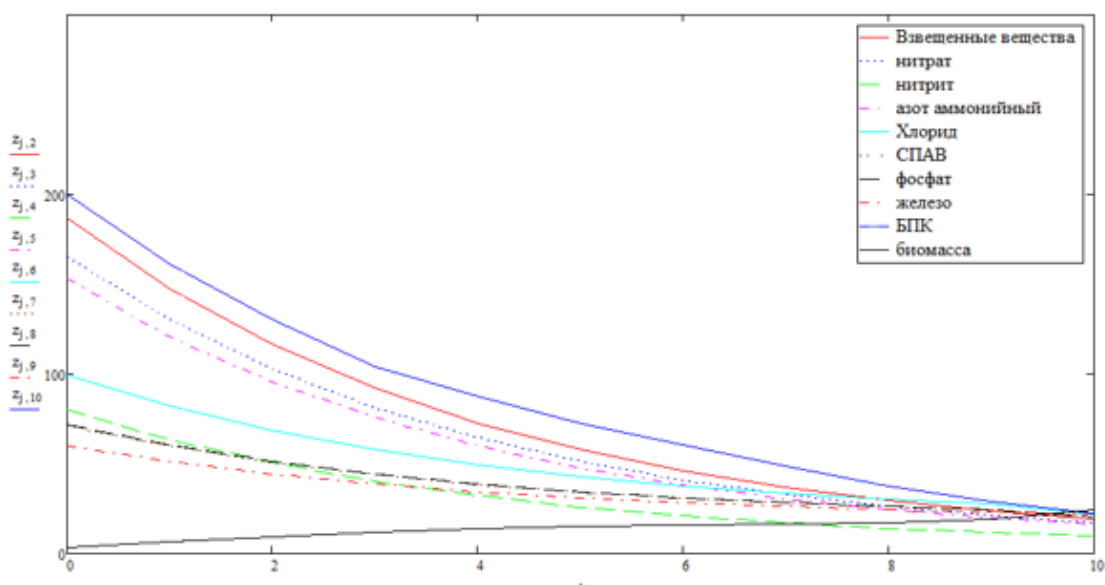


Рисунок 20 – Динамика изменения концентраций компонентов в единицу
времени

Аналогичным образом были произведены расчеты и для пластиковой загрузки. Результаты показаны на рисунке 21 и 22:

$z := \text{rkfixed}(x, 0, 10, 100, D) =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	187	165	80	153	99.5	71	72	60	200	3
2	0.1	182.587	161.115	78.153	149.402	97.557	69.741	70.717	59.005	195.647	3.372
3	0.2	178.28	157.322	76.351	145.891	95.661	68.512	69.465	58.033	191.398	3.735
4	0.3	174.076	153.621	74.592	142.464	93.811	67.312	68.242	57.085	187.251	4.089
5	0.4	169.973	150.009	72.874	139.119	92.004	66.142	67.049	56.16	183.204	4.434
6	0.5	165.968	146.483	71.199	135.854	90.241	64.999	65.885	55.256	179.254	4.772
7	0.6	162.06	143.042	69.563	132.668	88.521	63.884	64.748	54.375	175.398	5.101
8	0.7	158.245	139.683	67.967	129.558	86.841	62.795	63.639	53.514	171.635	5.422
9	0.8	154.521	136.405	66.408	126.523	85.202	61.733	62.556	52.675	167.963	5.736
10	0.9	150.887	133.205	64.888	123.56	83.603	60.696	61.5	51.855	164.378	6.042
11	1	147.34	130.082	63.403	120.669	82.041	59.684	60.469	51.055	160.879	6.341
12	1.1	143.879	127.034	61.955	117.847	80.517	58.696	59.462	50.274	157.464	6.633
13	1.2	140.5	124.06	60.541	115.092	79.03	57.732	58.48	49.512	154.131	6.917
14	1.3	137.202	121.156	59.161	112.404	77.578	56.791	57.521	48.768	150.879	7.195
15	1.4	133.983	118.322	57.814	109.78	76.161	55.873	56.585	48.042	147.704	7.466
16	1.5	130.842	115.556	56.499	107.219	74.778	54.977	55.671	47.334	144.605	7.731
17	1.6	127.776	112.857	55.216	104.719	73.428	54.102	54.78	46.642	141.58	7.989
18	1.7	124.783	110.222	53.964	102.28	72.111	53.248	53.91	45.967	138.628	8.241
19	1.8	121.862	107.65	52.741	99.899	70.825	52.414	53.06	45.309	135.747	8.487
20	1.9	119.011	105.14	51.548	97.575	69.57	51.601	52.232	44.666	132.935	8.727
21	2	116.229	102.691	50.384	95.306	68.345	50.807	51.423	44.038	130.191	8.962
22	2.1	113.513	100.3	49.247	93.092	67.15	50.032	50.633	43.426	127.512	9.19
23	2.2	110.863	97.966	48.138	90.932	65.983	49.276	49.862	42.828	124.897	9.414
24	2.3	108.276	95.689	47.056	88.823	64.844	48.538	49.11	42.244	122.345	9.632
25	2.4	105.751	93.465	45.999	86.764	63.733	47.818	48.376	41.675	119.855	9.844
26	2.5	103.287	91.296	44.968	84.755	62.648	47.114	47.659	41.119	117.424	10.052
27	2.6	100.881	89.178	43.961	82.795	61.589	46.428	46.96	40.576	115.051	10.255
28	2.7	98.534	87.111	42.979	80.881	60.556	45.758	46.277	40.047	112.736	10.452
29	2.8	96.242	85.094	42.02	79.013	59.547	45.105	45.611	39.53	110.476	...

Рисунок 21 – Результаты вычисленных концентраций загрязняющих веществ пластиковой загрузки

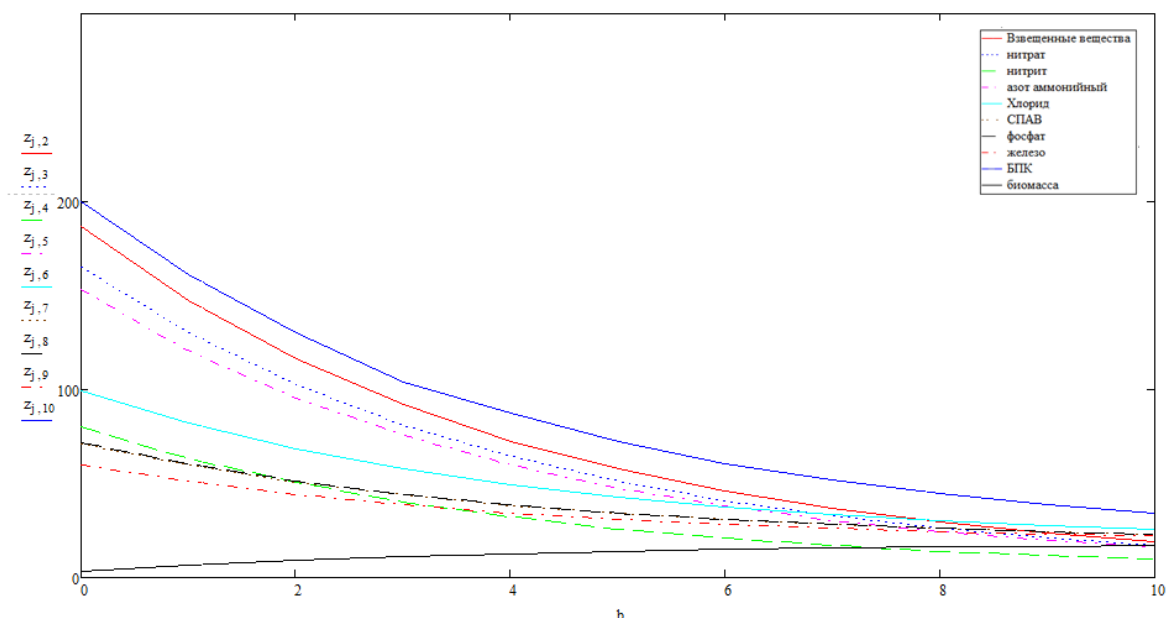


Рисунок 22 – Динамика изменения концентраций компонентов в единицу времени

Для того, чтобы произвести сравнительный анализ полученных данных по двум загрузкам, составим таблицу 7, в которой будет показан количество загрязняющих веществ, находящиеся в сточных водах.

Таблица 7 – изменения концентраций

Наименование веществ	Количества ЗВ в составе сточных вод на входе в биореактор, кг/ч	Количества ЗВ в составе сточных вод на выходе из пластиковой загрузки, кг/ч	Количества ЗВ в составе сточных вод на выходе из ершовой загрузки, кг/ч
Взвешенные вещества	8,870	7,921	7,238
Нитрат	0,165	0,042	0,012
Нитрит	0,008	0,003	0,001
Азот аммонийный	0,153	0,148	0,134
Хлорид	0,995	0,962	0,845
СПАВ	0,007	0,005	0,002
Фосфат	0,072	0,056	0,024
Железо	0,060	0,053	0,045
Итого:	10,330	9,190	8,301

Таким образом, сравнив полученные значения в ходе решения составленной математической модели, можно сделать вывод о том, что использование ершовой загрузки приводит к лучшему очищению сточных вод, чем при использовании пластиковой, за счет большего спад концентраций загрязняющих веществ. Также, был сделан вывод о том, что биохимические процессы выведения загрязнителей со всеми промежуточными стадиями зависят от сокращения концентраций загрязняющих веществ сточных вод.

4.4 Расчет загрузки биореактора

Для того, чтобы произвести расчет биореактора необходима определить его объём, по формуле (21):

$$W_3 = \frac{Q \cdot (\alpha_{\text{еп}} - \alpha_{\text{ех}})}{24 \cdot OM}, \quad (21)$$

где W_3 – объём реактора, м³;

$\alpha_{\text{еп}}$ – БПК_п сточных вод, поступающих на очистку, г О₂/л·сут;

Q – суточный расход сточных вод, м³/сутки;

ОМ – окислительная мощность биореактора, мг ХПК/м³.

Для описания изменения окислительной мощности загрузки биофильтра используется уравнение, предложенное Корольковым К.Н формула (22).

$$\frac{d\alpha_{\text{еп}t}}{dt} = -k\alpha_{\text{еп}}, \quad (22)$$

где $\alpha_{\text{еп}t}$ – масса веществ, адсорбированных активным илом в момент времени t ;

k – константа скорости.

Подставим полученные данные в формулу (21).

$$W_3 = \frac{6501,44 \cdot 4,73}{24 \cdot 10} = 128 \text{ м}^3.$$

Используем стандартную ершовую загрузку для БИОСЕПТИКОВ «ГРОТ», диаметр ерша – 120 мм, длина элемента загрузки – от 800 до 2500 мм. Определим объём кассеты размером 2,5×4,5×2,5 метров. Объём кассеты составит 28,2 м³. Количество ершей диаметром 120 мм и расстоянием между ершами 150 мм в кассете составит 128 шт. Для пластиковой загрузки были использованы регламентные данные. Для конструктивного сравнения загрузок составим таблицу 8.

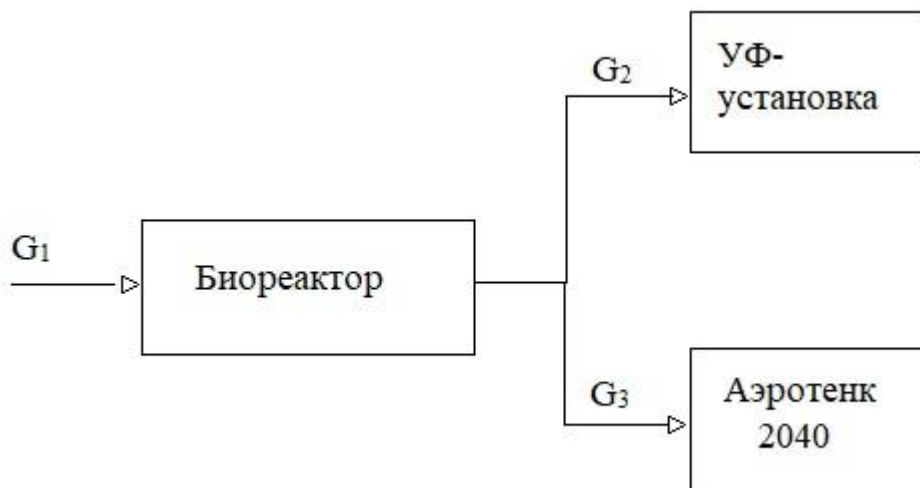
Таблица 8 – Сравнение загрузок

Параметр	Обозначения	Ершовая загрузка	Пластиковая загрузка
Объем биореактора, м ³	W_p	168	168
Объем загрузки без учета полостей, м ³	$W_{з-п}$	48	100
Объем очищаемых сточных вод, м ³	V_b	120	68

Таким образом, получаем, что при одинаковом объеме загрузки, ершовая загрузка за счет строения занимает объем почти в два раза меньше в отличии от пластиковой загрузки, и, как видно из расчетов выше способна к образованию большего количества биомассы.

4.5 Материальный баланс биореактора

Для расчета материального баланса биореактора составим схему распределения потоков, рисунок 23.



G_1 – приход сточной воды с загрязняющими веществами и активным илом; G_2 , G_3 – приход сточной воды с загрязняющими веществами и активным илом после биореактора

Рисунок 23 – Схема материального баланса

В данной работе был произведен расчет материального баланса процесса очистки сточных вод нитрификацией на основе технологии ПАО «КуйбешевАзот».

Количество сточной жидкости на входе в биореактор принимаем равным 1440 кг/ч.

Требуемая концентрация биопленки рассчитывается по формуле (23):

$$a_6 = \frac{F \cdot \bar{b}}{W_{at}}, \quad (23)$$

где a_6 – требуемая концентрация биопленки, кг/м³;

F – площадь биореактора, м²;

W_{at} – объем сооружения, м³;

$\bar{b}$ – удельное количество биопленки, кг/м².

$$a_6 = \frac{68,4 \cdot 45}{168} = 18,3 \text{ кг/м}^3.$$

Количество биопленки по сухому остатку определяем по формуле (24):

$$G_{\text{сух}} = \frac{G_{\text{сух}} \cdot G_{\text{а.и.}}}{1000}, \quad (24)$$

где $G_{\text{сух}}$ – количество биопленки по сухому остатку, кг/ч;

$S_{\text{и}}$ – концентрация ила в смеси, кг/м³;

$G_{\text{а.и.}}$ – количество биомассы, равное 600 кг/ч.

$$G_{\text{сух}} = 600 \cdot \frac{6,4}{1000} = 3,8 \text{ кг/ч.}$$

Количества воды в смеси, которая поступает в биореактор определяем по следующей формуле:

$$G_{\text{вод}} = G_{\text{а.и.}} - G_{\text{сух}}, \quad (25)$$

где $G_{\text{вод}}$ – количество воды в смеси, поступающей в биореактор, кг/ч.

$$G_{\text{вод}} = 600 - 3,8 = 596,2 \text{ кг/ч.}$$

Прирост биопленки определяется по разнице суммарного содержания загрязняющих веществ на входе и выходе в биореактор, по формуле (26):

$$P_i = \sum C_{i\text{вх}} - \sum C_{i\text{вых}}, \quad (26)$$

где P_i – прирост биопленки, кг/ч;

$\sum C_{i\text{вх}}, \sum C_{i\text{вых}}$ – суммарное содержание загрязняющих веществ на входе в биореактор и на выходе из него, кг/ч;

Расчета прироста биопленки будет произведен по данным таблицы 9.

Таблица 9 – Количество загрязняющих веществ на входе/выходе в биореактор

Наименование веществ	Количества № В в составе сточных вод на входе в биореактор, кг/ч	Количества № В в составе сточных вод на выходе в биореактор, кг/ч
Взвешенные вещества	8,870	7,238
Нитрат	0,165	0,012
Нитрит	0,008	0,001
Азот аммонийный	0,153	0,134
Хлорид	0,995	0,845
СПАВ	0,007	0,002
Фосфат	0,072	0,024
Железо	0,060	0,045
Итого	10,330	8,301

Используя формулу 26 и данные таблицы 9, определим величину прироста биопленки:

$$P_i = 10,330 - 8,301 = 2,209 \text{ кг/ч.}$$

По полученным данным был составлен материальных баланс биореактора, учитывая, что количество подаваемого воздуха в биореактор составляет 30,6 кг/ч, и записан в таблицу 10.

Материальный баланс биореактора характеризуется законом сохранения масс при выполнении технологической очистки.

Таблица 10 – Материальный баланс биореактора

Приход	кг/ч	%	Приход	кг/ч	%
Сточная вода	1440,000	100,0000	Сточная вода	1440,000	100,00000
Вода	829,670	57,6200	Вода	801,099	55,63000
Взвешенные вещества	8,870	0,6200	Взвешенные вещества	7,238	0,50000
Нитраты	0,165	0,0100	Нитраты	0,012	0,00080
Нитриты	0,008	0,0005	Нитриты	0,001	0,00007
Азот аммонийный	0,153	0,0100	Азот аммонийный	0,134	0,00900
Хлориды	0,995	0,0690	Хлориды	0,845	0,05900
СПАВ	0,007	0,0005	СПАВ	0,002	0,00010
Фосфор	0,072	0,0050	Фосфор	0,024	0,00010
Железо	0,060	0,0040	Железо	0,045	0,00100
Приход	кг/ч	%	Приход	кг/ч	%
Активный ил	600,000	41,6700	Активный ил	600,000	41,67000
—	—	—	Воздух	30,600	2,20000
Итого:	1440,000	100,0000	Итого:	1440,000	100,00000

4.6 Расчет предлагаемой загрузки

В данном разделе произведем расчет цены за загрузку ершового типа, сведем расчет в таблицу 9.

Таблица 9 – Расчет себестоимости загрузки

Наименование	Обозначение	Значение
Цена	руб/м	120,00
Высота кассеты	М	4,00
Ширина кассеты	М	3,00
Длина кассеты	М	5,50
Количество ершей в кассете	Шт	128,00
Расстояние между ершами	М	0,15
Количество кассет	Шт	4,00
Цена за кассету	Руб	48 000,00
Общая стоимость	Руб	192 000,00

Из исследовательской части следует, что ершовая загрузка эффективнее пластиковой, замена загрузки повысит эффективность очистки сточных вод от ХПК, БПК и приведет к снижению платежей за сброс загрязняющих веществ.

Выводы по четвертому разделу:

В данной главе была описана кинетика процесса окисления органических веществ для двух типов загрузки: жесткозакрепленной ершовой загрузки и загрузки блочного типа, рассчитаны константы скоростей для данных загрузок, для ершовой она составила $0,22 \text{ ч}^{-1}$, что на 55 % выше чем у загрузки блочного типа ($0,12 \text{ ч}^{-1}$). Для ершовой загрузки скорость окисления к единице объема загрузки значительно выше, чем на блочном аналоге, следовательно, в данном виде загрузки более эффективный массообмен и отсутствует заиливание полостей загрузки.

Также, сравнив полученные значения в ходе решения составленной математической модели, можно сделать вывод, что использование ершовой загрузки приводит к лучшему очищению сточных вод, чем пластиковой, за счет большего спада концентраций загрязняющих веществ.

Заключение

В выпускной квалификационной работе был проведен анализ технологического регламента цеха № 39 предприятия ПАО «КуйбышевАзот».

В результате данного анализа была предложена оптимизация существующего процесса для обеспечения требуемого качества сточных вод и выявлены основные недостатки применяемой очистки.

Был произведен патентный поиск и предложено технологическое решение по замене существующей пластиковой загрузки на наиболее эффективную жесткозакрепленную загрузку ершового типа.

В ходе анализа научно-технической литературы было установлено, что ершовая жесткозакрепленная загрузка эффективнее загрузки блочного типа, процесс образования биопленки на данном виде загрузки протекает быстрее в 1,5 раза.

В расчетной части была описана кинетика процесса окисления органических веществ для двух типов загрузки: жесткозакрепленной ершовой загрузки и загрузки блочного типа, рассчитаны константы скоростей для данных загрузок, для ершовой она на 55 % выше чем у загрузки блочного типа.

При составлении математической модели было выявлено, что жизненный цикл биоценоза напрямую зависит от концентрации загрязняющих веществ в сточных водах. Ершовая загрузка позволит накопить идентичную пластиковой загрузке биомассу при занимаемом меньшем объеме, что способствует улучшению гидродинамики и массообмену внутри биореактора.

Проведенный расчет материального баланса подтвердил математическое моделирование.

Предлагаемое решение позволяет снизить загрязняющие вещества до показателей, необходимых водооборотному циклу на предприятии.

Список используемых источников

1. Баженов В.И. Проектирование современных комплексов биологической очистки сточных вод / В.И. Баженов, А.А. Денисов // Экология и промышленность России. – 2019. – № 2. – С.26-31.
2. Васильев Б.В. Технология биологического удаления азота и фосфора на станциях аэрации / Б.В. Васильев, Б.Г. Мишуков, И.И. Иваненко, Е.А. Соловьева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 5. часть 1. – С. 22-25.
3. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В.Лурье. – Техніка, 1975. – 168 с.
4. Воронов Ю.В. Биологические окислители / Ю.В. Воронов, Н.А. Залетова, Г.Ш. Чембулатова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2018. – № 4 (68). – С.44-47.
5. Воронов Ю.В. Водоотведение: учебное издание / Ю.В. Воронов, Е.В. Алексеев, Е.А. Пугачев. – М.: АСВ, 2019. – 416 с.
6. Вострова Р.Н. Использование кассет с носителем биомассы на сооружениях очистки сточных вод / Р. Вострова, А. Роденко, Д. Макаров // Вода magazine. – 2018. – № 8 (96). – С. 20-23
7. Вострова Р.Н. Применение иммобилизационной загрузки для интенсификации биологической очистки сточных вод / Р.Н. Вострова, А.В. Роденко // Вода Magazine. – 2020. – № 2 (126). – С.32-36.
8. Гинцбург А.Л. Quorum sensing, или социальное поведение бактерий / А.Л. Гинцбург Т.С. Ильина Ю.М. Романова // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 2017. – № 5. – С. 86-93.
9. Гогина Е.С. Интенсификация процессов удаления соединений азота из сточных вод на биофильтрах / Е.С. Гогина О.В. Янцен О.А. Ружицкая В. Дабровски Р. Жилка Д. Боружко // Вода и экология: проблемы и решения. – 2018. – № 3 (67). – С.35-45.

10. Гогина Е.С. Удаление азота в модели циркуляционного окислительного канала при пониженном содержании органики в сточных водах / Е.С. Гогина И.А. Гульшин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 12. – С.26-33.
11. Гогина Е.С. Удаление биогенных элементов из сточных вод: монография / Е.С. Гогина. – М.: Изд-во: АСВ, 2020. – 120 с.
12. Данилович Д.А. Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота / Д.А. Данилович, А.Н. Эпов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2017. – № 4 (112). – С.28-40.
13. Данилович Д.А. Технология аэробного гранулированного ила / Д.А. Данилович // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2017. – № 3. – С. 51-54.
14. Дзюбо В.В. Причины неудовлетворительной работы малых канализационных очистных сооружений (КОС) / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова // Водоочистка. – 2018. – № 3. – С. 34-40.
15. Долина Л.Ф. Реакторы для очистки сточных вод. В Реакторы для очистки сточных вод / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Издательство Стандарт. – 2019. – 82 с.
16. Душкин С.С. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография / С.С. Душкин, А.Н. Коваленко, М.В. Дегтярь, Т.А. Шевченко. – Харьков: ХНАГХ, 2021. – 146 с.
17. Ершова загрузка для биофильтров [Электронный ресурс]: <http://www.vodtech.ru/catalog/ershova-download-for-biofilters/> (дата обращения 11.05.2022)
18. Насадка биореактора для очистки сточных вод [Электронный ресурс]: <http://patents.su/3-1836418-nasadka-bioreaktora-dlya-ochistkistochnykh-vod.html> (дата обращения 12.05.2022)

19. Насадка биореактора для очистки сточных вод [Электронный ресурс]: <http://www.findpatent.ru/patent/183/1836418.html> (дата обращения 06.05.2022)
20. Постоянный технологический регламент цеха № 39 установки нитриденитрификации промстоков производства капролактама № 39. Тольятти, 2018 – 108с.
21. Очистка сточных вод. Активный ил и биоплёнка [Электронный ресурс]: http://melekess.info/pub2-807-ochistka_stochnyh_vod_aktivnyu_il_i_bioplenka.html (дата обращения 11.05.2022)
22. ПАО «КуйбышевАзот» [Электронный ресурс]: <http://www.kuazot.ru/rus/ecology/info> (дата обращения 15.05.2022)
23. Системы аэрации [Электронный ресурс]: <http://www.ecopotential.ru/equipment/sistemy-aeratsii-hydrig-matala/trubchatyy-aerator/> (дата обращения 13.05.2022)
24. Chaudhary D.S. Granular Activated Carbon (GAC) Biofilter for low strength Wastewater Treatment / D.S. Chaudhary, S. Vigneswaran, H. H. Ngo, W.G. Shim, H. Moon // Environmental Engineering Reserch. – 2020. – Vol.8, No. 4. – p. 184-192.
25. Chen-Charpentier B.M. Numerical simulation of biofilm-forming bacteria and other microbes in porous media / B.M. Chen-Charpentier, H.V. Kojouharov // Developments in Water Science. – 2018. - № 47. – p. 819-826.
26. Choi H. J., Comparison between a moving bed bioreactor and a fixed bed bioreactor for biological phosphate removal and denitrification / H. J. Choi, A. H. Lee, S. M. Lee // Water Science & Technology. – 2019. – № 65.10. – p. 1834-1838.
27. Corbitt, R. A. Standard handbook of environmental engineering. / R.A. Corbitt// 2nd edition. McGraw-Hill, 2019. – 1152 p.
28. De Ley J. The Proteobacteria: ribosomal RNA cistron similarities and

bacterial taxonom / J. De Ley, In A. Balow, H.G. Truper, M. Dworkin, W. Harder, K.-H. Schleifer (ed.) // The prokaryotes, 2nd ed. Springer-Verlag, New York, 2017. - p. 2111-2140.

29. Mathcad User's Guide. Mathcad 8 Professional Academic. MathSoft, Inc., Cambridge, MA, 1998.

30. Flemming H. C. Microbial biofouling: unsolved problems, insufficient approaches, and possible solutions / H.C. Flemming. – Berlin: Springer Verlag Heidelberg, 2019. – 12 p.

31. Hammer J. M. Water and wastewater Technology / J. M. Hammer, J. M. Hammer Jr. // 4th edition. New Jersey: Prentice Hall Inc., 2021. – 540 p.

Приложение А

Схема биореактора

Рисунок А 1 - Схема биореактора

