

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»**

Институт Геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Химической и биохимической инженерии

6B05101-Химическая и биохимическая инженерия

Иванов Роман Владимирович

**Установка анаэробной очистки сточных вод
производства терефталевой кислоты**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту**

6B05101-Химическая и биохимическая инженерия

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Химической и биохимической инженерии

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
«Химическая и
биохимическая инженерия»
к.х.н., ассоц. профессор
Мангазбаева Р.А.
«13» июня 2025 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Установка анаэробной очистки сточных вод производства терефталевой кислоты»

6B05101-Химическая и биохимическая инженерия

Выполнил

Иванов Р.В.

Рецензент:

доктор PhD

Акимбеков Н.Ш.

«3» июня 2025 г.

Научный руководитель:

Ассоц. профессор

Наурызова С.З.

С.З.

«3» июня 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Химической и биохимической инженерии

6B05101-Химическая и биохимическая инженерия

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Химическая и
биохимическая инженерия»
к.х.н., ассоц. профессор

Манз Мангазбаева Р.А.
«13» июня 2025 г.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Иванову Роману Владимировичу

Тема: Установка анаэробной очистки сточных вод производства терефталевой кислоты

Утверждена приказом проректора по академической работе № 26-П/Ө от «29» января 2025 г.

Срок сдачи законченной работы «17» июня 2025 г.

Исходные данные к дипломному проекту: объём и состав сточных вод

Краткое содержание дипломного проекта:

- а) литературный обзор*
- б) технологическая часть*
- в) строительная часть*
- г) автоматизация*
- д) охрана труда и окружающей среды*
- е) экономическая часть*

Перечень графического материала: 12 слайдов презентации работы, 4 чертежа

Рекомендуемая основная литература: из 25 наименований

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Литературный обзор	28.01.2025г.	Выполнено
Технологическая часть	18.02.2025г.	Выполнено
Строительная часть	12.03.2025г.	Выполнено
Автоматизация	16.03.2025г.	Выполнено
Охрана труда и окружающей среды	06.04.2025г.	Выполнено
Экономическая часть	20.04.2025г.	Выполнено

Подписи
консультантов и норм контролера на законченную дипломный проект с
указанием относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Литературный обзор	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль
Технологическая часть	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль
Строительная часть	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль
Автоматизация	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль
Охрана труда и окружающей среды	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль
Экономическая часть	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль
Норм контролер	Наурызова С.З., доктор PhD, ассоц. профессор	12.06.25	Иль

АННОТАЦИЯ

Дипломный проект посвящён разработке технологии анаэробной биологической очистки сточных вод, образующихся при производстве терефталевой кислоты.

Целью работы является повышение эффективности очистки высококонцентрированных сточных вод за счёт применения анаэробного биореактора с псевдоожиженным слоем и специализированного штамма микроорганизмов.

Результаты исследования показывают, что предложенная технология обеспечивает снижение ХПК (химического потребления кислорода) более чем на 80 % и получение биогаза как побочного энергетического продукта.

Работа может быть использована при проектировании или модернизации очистных сооружений предприятий органического синтеза.

АНДАТТА

Дипломдық жоба терефтал қышқылын өндіру кезінде түзілетін ағын суларды анаробты биологиялық әдіспен тазарту технологиясын әзірлеуге арналған.

Жобаның мақсаты – жоғары концентрациялы ағын суларды тиімді тазартуды қамтамасыз ету үшін псевдо-сұйылтылған қабаты бар анаробты биореакторды және арнайы микроорганизм штаммын қолдану.

Зерттеу нәтижелері ұсынылған технологияның ХОС (оттегіні химиялық тұтыну) деңгейін 80 %-дан астам төмендетуге және қосалқы энергетикалық өнім ретінде биогаз өндіруге мүмкіндік беретінін көрсетті.

Жоба нәтижелері органикалық синтез кәсіпорындарының тазарту құрылыштарын жобалау немесе жаңғырту кезінде пайдаланылуы мүмкін.

ABSTRACT

This graduation project focuses on the development of an anaerobic biological treatment technology for wastewater generated during terephthalic acid production.

The aim of the work is to improve the treatment efficiency of high-strength wastewater using an anaerobic bioreactor with a fluidized bed and a specialized microbial strain.

The results show that the proposed technology reduces COD (Chemical Oxygen Demand) by more than 80% and produces biogas as a by-product for energy recovery.

Outcomes can be applied in the design or modernization of wastewater treatment facilities at organic synthesis enterprises.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1.1 Обзор технологий очистки сточных вод	9
1.2 Анаэробная очистка: теория и практическое применение	11
1.2.1 Применение анаэробных технологий	12
1.3 Применение анаэробной очистки в производстве ТФК	13
1.3.1 Характеристика сточных вод ТФК-производства.	13
1.3.2 Обоснование анаэробного метода	15
2 Технологическая часть	17
2.1 Описание технологического процесса очистки	17
2.1.1 Усреднение и подготовка стоков	17
2.1.2 Реагентная физико-химическая очистка	17
2.1.3 Анаэробная очистка	18
2.1.4 Доочистка и обеззараживание.	18
2.2 Описание технологической схемы установки	19
2.3 Применяемые штаммы микроорганизмов	21
2.4 Характеристика исходных объектов и материалов	23
2.4.1 Объём сточных вод	23
2.5 Материальный баланс	23
2.5.1 Расчёт степени очистки загрязняющих веществ	23
2.5.2 Расчёт массы удаляемых загрязняющих веществ	25
2.5.3 Масса удалённых загрязнений по стадиям	25
2.5.4 Расчёт массы илового осадка и регенерации	26
2.5.5 Учет регенерации ила	26
2.5.7 Доочистка сточных вод после анаэробной стадии	27
2.6 Схема доочистки	27
2.6.1 Эффективность по стадиям доочистки	28
2.7 Расчёт анаэробного биореактора	28
3 Строительная часть	31
3.1 Архитектурно-строительное решение	31
3.2 Строительно-монтажные конструкции	31
3.3 Коммуникации и инженерные системы	31
4 Автоматизация технологического процесса	32
4.1 Цели автоматизации	32
4.2 Основные автоматизируемые узлы	32
4.3 Средства автоматизации	33
5 Охрана труда и окружающей среды	34
5.1 Обеспечение безопасных условий труда	34
5.2 Электробезопасность	34
5.3 Пожарная безопасность	34
5.4 Защита окружающей среды	35

5.6 Контроль и мониторинг	36
6 Экономическая часть	37
6.1 Расходные материалы и эксплуатационные затраты	38
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	41
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	

ВВЕДЕНИЕ

Терефталевая кислота (ТФК) является одним из важнейших мономеров для получения полиэфирных материалов – полиэтилентерефталата, технических волокон, пленок, пластмасс и др. Мировое производство ТФК постоянно растет, что сопровождается увеличением объема сточных вод, образующихся при ее синтезе. Эти сточные воды содержат значительные количества органических загрязнителей, в том числе кислородсодержащих ароматических соединений (например, бензойная кислота, уксусный альдегид и др.).

Очистка таких высококонцентрированных по органическим веществам сточных вод представляет собой серьезную экологическую проблему, требующую применения эффективных технологий. Несмотря на совершенствование самого процесса получения ТФК (например, использование чистого кислорода при окислении п-ксиола по запатентованной технологии, проблема очистки образующихся сточных вод остается актуальной [1].

Традиционные методы (физико-химические, многостадийная аэробная биологическая очистка и др.) не всегда обеспечивают требуемое качество очищенной воды или экономически невыгодны из-за высокой энергоемкости. В этой связи актуально внедрение анаэробных биотехнологий очистки, способных эффективно удалять органические загрязнения и одновременно генерировать биогаз в качестве побочного энергетического продукта [1].

Целью дипломного проекта является разработка и обоснование эффективной технологии очистки сточных вод производства терефталевой кислоты с использованием анаэробной биологической очистки. Предполагается снижение нагрузки органических загрязнений на последующие этапы очистки и получение возобновляемого энергетического ресурса (биогаза).

Новизна проекта заключается в рассмотрении и анализе применения анаэробной биологической очистки для специфических сточных вод терефталевого производства, содержащих трудноокисляемые ароматические соединения.

Предложено использовать специализированный штамм микроорганизмов (*Bacillus subtilis* BKM B-1742Д) в сочетании с активным илом, что ранее не применялось в практике очистки сточных вод ТФК-производства.

Показано, что внедрение анаэробного биореактора с псевдоожженным слоем носителя позволит достичь высокой степени превращения органических загрязнений в метан и углекислый газ, значительно снизив остаточную загрязненность воды [1].

Актуальность проекта заключается в том, что разработка и внедрение эффективной системы очистки сточных вод производства терефталевой кислоты (ТФК) имеет ключевое значение для промышленной и экологической устойчивости Казахстана. В условиях активного расширения мощностей по выпуску полиэтилентерефталата (ПЭТ) на территории республики — особенно с учётом планируемых и реализуемых инвестиционных проектов в Атырауской

и Алматинской областях — возрастает и объём побочных потоков, образующихся при синтезе ТФК [1].

Сырьём для получения ТФК служат ароматические углеводороды нефти, прежде всего пара-ксилол. При окислении этого вещества в технологическом цикле неизбежно образуются трудноудаляемые остатки ароматических соединений, таких как бензойная и фталевая кислоты, которые проявляют высокую устойчивость в водной среде, токсичны и кумулятивны [1].

Сброс таких загрязнений в водоёмы без глубокой предварительной очистки представляет серьёзную угрозу водным экосистемам и здоровью населения. В этом контексте создание очистных сооружений, способных не только эффективно удалять ХПК, но и перерабатывать остаточную ароматическую органику, приобретает критическую важность [1].

Предложенное техническое решение позволяет достигать более 98% снижения органических загрязнений, включая трудноокисляемые ароматические фракции, что обеспечивает соответствие жёстким нормативам и стратегическим целям Республики Казахстан в области охраны окружающей среды и устойчивого индустриального развития.

Новизна проекта заключается в комплексном подходе, объединяющем биологическую технологию очистки и биоэнергетическую утилизацию органических отходов.

Практическая значимость. Результаты проекта могут быть напрямую применены при проектировании или модернизации очистных сооружений на предприятиях по производству терефталевой кислоты и родственных органических продуктов.

Предложенная технология позволит повысить эффективность работы существующих очистных сооружений за счет сокращения энергозатрат на аэрацию и уменьшения количества образующегося избыточного ила.

Выработка биогаза в анаэробном реакторе может частично компенсировать энергопотребление предприятия. Выполненное технико-экономическое обоснование подтверждает возможность внедрения анаэробной стадии очистки с точки зрения экологии и экономики.

1 Литературный обзор

1.1 Обзор технологий очистки сточных вод

Очистка промышленных сточных вод обычно включает сочетание нескольких методов – механических, физико-химических и биологических – в зависимости от характера загрязнений. На практике предприятия в СНГ чаще отдают предпочтение аэробной технологии, несмотря на её высокие энергозатраты. В Казахстане же до сих пор отсутствует масштабное внедрение анаэробных технологий, несмотря на их эффективность при работе с концентрированными органическими загрязнителями — как это доказано при работе с ТФК-стоками [1].

Механическая очистка предназначена для удаления крупных включений и взвешенных частиц. К ней относятся решетки и сетки для задержания крупных примесей, отстойники-усреднители для выравнивания расхода и предварительного отстаивания. Например, на предприятиях по производству ТФК сточные воды сначала поступают в приемные резервуары-усреднители значительного объема (до нескольких тысяч кубометров), где происходит выравнивание состава и расхода, а также частичное охлаждение стоков [1].

Физико-химические методы направлены на удаление тонкодисперсных и растворенных примесей путем введения реагентов или применения физических воздействий. Широко применяется коагулирование и флокулирование – добавление коагулянтов (например, солей железа или алюминия) и флокулянтов для укрупнения коллоидных частиц с последующим осаждением в отстойниках. Такой подход эффективен для удаления взвешенных веществ и специфических примесей, например остатков катализаторов (солей кобальта и марганца) и продуктов окисления, присутствующих в сточных водах терефталевого производства [1].

Другие физико-химические методы включают нейтрализацию (для сточных вод, содержащих избыточные кислоты или щелочи), экстракцию и сорбцию (например, активированным углем) для удаления растворенных органических веществ, а также окислительные методы. К последним относятся озонирование, обработка пероксидом водорода (в том числе в сочетании с каталитическими системами – процесс Фентона), хлорирование и др. Эти методы позволяют разложить или преобразовать трудноокисляемые органические загрязнители в более простые соединения [2].

Однако применение сильных окислителей может быть дорогостоящим и образовывать вторичные побочные продукты, поэтому обычно физико-химическая очистка ограничивается стадиями коагуляции-осаждения и, при необходимости, локального окисления наиболее токсичных компонентов. Также могут использоваться мембранные технологии (ультрафильтрация, обратный осмос) для глубокой очистки и отделения примесей, но в случае больших объемов промышленных стоков мембранные методы экономически менее оправданы [2].

Биологические методы очистки основываются на способности микроорганизмов разрушать органические загрязнители. Их разделяют на аэробные и анаэробные [2].

Аэробная биологическая очистка – традиционный и широко распространенный способ для муниципальных и многих промышленных стоков. В аэротенках (биореакторах с принудительной подачей кислорода) гетеротрофные бактерии в присутствии кислорода окисляют органические вещества до углекислого газа, воды и новой биомассы. Метод эффективно снижает биохимическое потребление кислорода (БПК) и ХПК, способен удалять широкий спектр органики. Для сточных вод терефталевого производства внедрены многостадийные аэробные системы. Например, типичная схема включает двухступенчатые аэротенки (первичный и вторичный) и последующие отстойники. Суммарная степень удаления ХПК при трехстадийной аэробной очистке может превышать 90% [2].

Однако у аэробных методов есть ряд недостатков: высокая энергоемкость – требуется интенсивная аэрация, особенно для стоков с большой величиной ХПК (например, >2000 мг/л органики); (2) важность дозирования питательных элементов – таких как соединения азота и фосфора – в случае, если соотношение BOD:N:P в исходных стоках дисбалансирано (в терефталевых стоках обычно много углерода и мало биогенных элементов, поэтому для стабильной работы аэробных культур требуется добавлять источники азота и фосфора); образование значительного количества избыточного активного ила, требующего последующей обработки и утилизации; возможны проблемы со седиментацией биомассы – так называемый эффект всплывающего или плохо осаждающего ила (булкинг), что снижает эффективность отстаивания. Эти проблемы стимулируют поиск альтернативных или дополнительных методов, в частности, анаэробной очистки для наиболее концентрированных потоков. [3]

Анаэробная (безкислородная) биологическая очистка является перспективным направлением для сточных вод с высоким содержанием органических веществ. В анаэробных условиях специализируемые группы микроорганизмов разлагают органические соединения без участия кислорода, превращая их в метан и углекислый газ (биогаз), а также в биомассу. Данный процесс давно применяется для стабилизации осадков (метантенки на очистных сооружениях), а в последние десятилетия получил развитие и для очистки промышленных высококонцентрированных стоков (например, пищевой промышленности, спиртовых заводов, целлюлозно-бумажных комбинатов) [3].

Анаэробные реакторы способны эффективно снижать ХПК, превращая до 80–90% поступающей органики в газообразные продукты при благоприятных условиях. Основные преимущества анаэробной очистки: практически нулевое потребление электроэнергии на аэрацию (в виду отсутствия потребности в кислороде), более низкая чувствительность к дефициту питательных элементов (азота, фосфора), значительно меньшее образование избыточного ила (около 5–10% от массы удаленной органики против 50–60% в аэробных системах), образующийся биогаз может быть использован как энергоноситель [3].

Следовательно, можно отметить, что анаэробная технология является энергосберегающей и в ряде случаев самоокупаемой. К ограничениям анаэробной очистки относятся более жесткие требования к поддержанию стабильного режима (температура, pH, отсутствие токсических примесей) и относительно медленный рост анаэробных микробных сообществ, из-за чего при запуске требуется длительное время на развитие популяции (период пуска может составлять несколько недель) [3].

В целом, для сточных вод с высокой концентрацией органических веществ и присутствием трудноокисляемых соединений анаэробная очистка рассматривается как целесообразный этап вторичной очистки перед третичной доочисткой – предлагаются для очистки стоков терефталевого производства. [13]

1.2 Анаэробная очистка: теория и практическое применение

Микробиологические основы процесса. Анаэробное разложение органических веществ осуществляется консорциумом различных групп микроорганизмов. Процесс протекает в четыре основных стадии: гидролиз, кислотогенез, ацетогенез и метаногенез [4].

Вначале сложные высокомолекулярные соединения (полимеры, жиры, белки) гидролизуются внеклеточными ферментами до мономеров – сахаров, аминокислот, жирных кислот. Затем кислотообразующие бактерии превращают эти продукты в летучие жирные кислоты (уксусная, пропионовая, масляная и др.), спирты, CO₂, H₂ и другие метаболиты [4]. Далее на стадии ацетогенеза кислотоформирующие бактерии (например, *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter* и др.) превращают пропионат, бутират и прочие кислоты в уксусную кислоту, водород и диоксид углерода. Заключительная стадия – метаногенез – осуществляется метаногенными археями (род *Methanobacterium*, *Methanosaeta*, *Methanotherrix* и др.), которые потребляют уксусную кислоту, водород и CO₂, производя метан (CH₄) и воду [4].

Совместная деятельность этих групп обеспечивает полное минерализация органических веществ до CH₄ и CO₂. Характерно, что разные группы строго взаимосвязаны: например, метаногены потребляют водород, поддерживая низкое парциальное давление H₂, что термодинамически выгодно для ацетогенеза. В отсутствии метаногенов накопление жирных кислот и водорода подавляет предыдущие стадии и процесс останавливается [4].

Следовательно, можно отметить, что для устойчивой работы анаэробного бioreактора необходим сбалансированный микробный консорциум [4].

Условия протекания процесса.

Оптимальными условиями для большинства анаэробных систем являются: нейтральный pH ~7,0 (допустим диапазон 6,5–7,5); температура либо мезофильная (~30–37°C), либо термофильная (~50–55°C) – при постоянстве без резких колебаний; отсутствие растворенного кислорода; достаточное время удерживания субстрата и биомассы [5].

Анаэробные микроорганизмы чувствительны к ряду токсичных примесей: высокие концентрации солей, тяжелых металлов, некоторых органических растворителей могут подавлять метаногенез. Поэтому при проектировании учитывают важность предварительного разбавления или нейтрализации стоков, если в них экстремальные значения pH или ингибиторы [5].

Важный параметр – нагрузка по органическому веществу (кг ХПК на м³ реактора в сутки). Для традиционных метантенков (бродильных камер) нагрузка низкая (около 0,5–1 кг ХПК/м³·сут), а для современных высоконагруженных реакторов (с гранулированным илом, с бионосителями) она может достигать 5–10 кг ХПК/м³·сут и более. Соответственно, время гидравлического удерживания (HRT) стока в реакторе может варьироваться от нескольких суток до десятков часов [6].

В результате анаэробного разложения основными продуктами являются биогаз (содержит ~50–75% метана, остальное CO₂ и следы других газов) и минеральные вещества (NH₄⁺, HS⁻, фосфаты – из органических соединений азота, серы, фосфора соответственно). Значительная часть углерода превращается в газ, а не в биомассу, поэтому рост бактерий относительно невелик – что объясняет малый объем образующегося анаэробного ила. [7]

1.2.1 Применение анаэробных технологий

Изначально анаэробные реакторы применялись для брожения и стабилизации осадков в коммунальных очистных (метантенки). С 1970-х годов появились конструкции, позволяющие эффективно очищать жидкие стоки с высокой концентрацией органики [7].

Одним из прорывов стало изобретение высоконагруженного анаэробного реактора с восходящим потоком и анаэробным слоем ила – UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). В реакторах типа UASB сточные воды равномерно подаются снизу вверх через слой гранулированного анаэробного ила. Образующийся биогаз всплывает и отделяется в газосборнике, а гранулы ила удерживаются внутри реактора благодаря специальным сепараторам (отделителям). Такая система не требует наполнителя – микрофлора самоорганизуется в виде гранул диаметром 1–5 мм, обладающих высокой плотностью и оседаемостью [7].

Аналогичные по принципу – реакторы с расширенным (псевдоожиженным) слоем, анаэробные фильтры (с неподвижной насадкой, на которой образуется био-пленка), реакторы с встряхиваемым или перемешиваемым носителем [8].

Современные 2-и 3-поколения анаэробных биореакторов характеризуются удержанием высокой концентрации биомассы (10–30 г/л сухого вещества ила) и способны эффективно очищать даже трудноразлагаемые отходы.

В литературе описан успешный опыт применения анаэробных методов для самых разных промышленных стоков: от переработки продуктов питания до нефтехимии [8].

Так, полноразмерные реакторы UASB внедрены для очистки сточных вод, содержащих фенол, толуол, бензол и бензойную кислоту. Бензойная кислота – ароматическое соединение – в анаэробных условиях может быть полностью минерализована до метана и CO₂ при участии смешанной культуры микроорганизмов [8].

Это свидетельствует о высокой потенции анаэробных сообществ к деструкции ароматических и других устойчивых соединений [8].

В контексте производства терефталевой кислоты анаэробная технология интересна тем, что основные органические загрязнители сточной воды (уксусная кислота, ароматические кислоты) теоретически могут быть превращены в метан [8].

Ранее анаэробные реакторы не находили широкого применения непосредственно на стадиях очистки терефталевых стоков – в основном использовались аэробные методики. Однако исследования конца XX – начала XXI века показали, что сочетание анаэробного и последующего аэробного этапов позволяет достичь наилучшего результата при очистке подобных стоков [9].

Анаэробный этап снимает основную нагрузку ХПК (60–80%) [9], а аэробный этап доокисляет остаточные трудноразлагаемые вещества, обеспечивая полный очистной эффект. Такая двухступенчатая схема характеризуется меньшим суммарным энергопотреблением и устойчивостью к перегрузкам по органике, по сравнению с чисто аэробной.

1.3 Применение анаэробной очистки в производстве ТФК

1.3.1 Характеристика сточных вод ТФК-производства.

Промышленные стоки, образующиеся при синтезе терефталевой кислоты, формируются преимущественно на стадиях окисления п-ксилола и последующей очистки продукта [10].

Современное производство ТФК (т.н. процесс Mid-Century/AMOCO) осуществляется жидкофазным окислением п-ксилола кислородом воздуха в среде уксусной кислоты при повышенных давлении и температуре в присутствии катализатора – солей кобальта и марганца (с добавкой бромидов).

В результате реакции образуется терефталевая кислота, которая выделяется из реакционной массы кристаллизацией, однако побочные продукты и растворитель остаются в маточном растворе [10].

Основные примеси – это пара-толуиловая кислота (4-метилбензойная кислота, неполно окисленный п-ксилол), паратолуиловый альдегид (4-карбоксибензойный альдегид), бензойная кислота (продукт окисления промежуточных толуолов) и другие ароматические кислоты. Также

значительная часть уксусной кислоты-растворителя уходит в сточные воды при промывке осадка ТФК и продувках [10].

В совокупности сточные воды терефталевого производства характеризуются высокой химической загрязненностью: ХПК может достигать 2000–15000 мг О₂/л, преобладают ароматические кислоты и ацетаты, pH обычно кислый (3–5) из-за остатка уксусной и органических кислот. Кроме того, в стоках могут присутствовать остаточные количества катализаторов (ионы Сo²⁺, Mn²⁺) и побочные неорганические соли. Такой состав предъявляет высокие требования к системе очистки – важно удалять как органические, так и неорганические компоненты. [10]

Существующая схема очистки на производстве. На действующих предприятиях по производству ТФК, как правило, реализована многостадийная система очистки.

Например, на ОАО «Полиэф» (Республика Башкортостан, РФ) применяют следующую последовательность стадий очистки сточных вод:

- Механическая стадия – накопление и усреднение стоков в резервуарах, выравнивание температуры (через теплообменники) и расхода;
- Физико-химическая очистка – реагентная обработка: дозирование коагулянта и флокулянта, смешение и отстаивание. Эта стадия предназначена для удаления взвешенных веществ и специфических загрязнителей, присущих терефталевому производству. В результате образуется осадок (шлам), содержащий, в частности, нерастворимые соли катализаторов и органические соединения, выпавшие с хлопьями. Осветленная после отстойников вода собирается в сборные емкости;
- Биологическая очистка – включает анаэробный и аэробный этапы. Сначала предочистка в анаэробных биореакторах: сточные воды высокой концентрации поступают в два параллельных анаэробных реактора, где происходит разложение части органических веществ без доступа кислорода;
- Анаэробные реакторы представляют собой вертикальные стальные аппараты, снабженные внутри сетчатой полиэтиленовой загрузкой (насадкой) для удержания микроорганизмов. После анаэробной стадии (которая снижает ХПК, например, на 50% и более) вода направляется на аэробную очистку – в аэротенки I и II ступени;
- Аэротенки работают по принципу проточной биореакции: в первом аэротенке происходит основное окисление оставшихся органических веществ кислородом (механические аэраторы насыщают воду воздухом), во втором – последующее доокисление и нитрификация аммония (если присутствует).
- Избыток активного ила из аэротенков удаляется в илоуплотнители. Очищенная в биореакторах вода проходит через вторичные отстойники-осветлители, где отделяется суспендированный ил, возвращаемый

- частично в аэротенки в качестве рециркуляции, а частично отводимый как избыточный;
- Стадия доочистки (третичная) – для обеспечения устойчиво высокого качества воды после биологической стадии применяются методы доочистки. Проектом ОАО «Полиэф» предусмотрены: фильтрование через зернистый загрузочный материал (песчано-гравийные фильтры) для удаления тонких взвесей, озонирование – для окисления остаточных органических примесей и обесцвечивания, и биосорбция – пропускание воды через колонны с активированным углем, на поверхности которого адсорбируются остатки органических веществ.
 - Озонирование и сорбция берут на себя основную нагрузку по удалению трудноразлагаемых загрязнений, доводя показатели качества воды до требуемых нормативов.

Такая комплексная схема (механическая + физико-химическая + анаэробная + аэробная + доочистка) обеспечивает глубину очистки более 95–98% по органическим показателям [11].

Исследования показывают, что путем модернизации анаэробной стадии можно значительно повысить степень очистки сточных вод терефталевого производства. В частности, перспективным направлением является инокуляция (заселение) анаэробных биореакторов специальными штаммами микроорганизмов-биодеструкторов, способными разлагать ароматические соединения, и использование усовершенствованных конструкций реакторов для удержания максимальной биомассы [12].

1.3.2 Обоснование анаэробного метода

В работе Ягафаровой и соавт. (2015) предложен подход к интенсификации анаэробной биоочистки стоков ТФК-производства путем ввода в систему культуры факультативного анаэробного штамма *Bacillus subtilis* ВКМ В-1742Д. Этот штамм непатогенен, неприхотлив к питательной среде и способен расти как в аэробных, так и в анаэробных условиях; известно, что он обладает способностью разрушать такие устойчивые соединения, как фенол, 2,4-дихлорфеноксикусусная кислота, акриловая кислота и ее производные [12].

Предполагалось, что добавление данного штамма к обычному анаэробному активному илу повысит степень биодеструкции ароматических компонентов сточной воды. Для проверки этой гипотезы были проведены лабораторные опыты: в анаэробных условиях (колбы без доступа воздуха, 30°C) инкубировали образцы сточной воды терефталевого производства в трех вариантах – (1) с добавлением чистой культуры *B. subtilis* ВКМ В-1742Д, (2) с добавлением избыточного активного ила с нефтехимических очистных (не содержащего данный штамм), (3) с добавлением консорциума, состоящего из активного ила + штамм *B. subtilis*. Объем инокулята составлял 3% от объема [12].

Через 4 суток культивирования измеряли снижение ХПК как показатель эффективности очистки. Результаты показали, что уже на 3-и сутки во всех вариантах наблюдалось снижение ХПК, однако наиболее значительное – в варианте с совмещенным инокулятом ил + *Bacillus*. Исходная величина ХПК в проводимом эксперименте ~2500 мг О₂/л снизилась до ~500 мг О₂/л (то есть на 80%) при совместном использовании активного ила и *B. subtilis*. В варианте с одной лишь монокультурой *B. subtilis* также отмечено существенное снижение ХПК – до ~550 мг О₂/л (~78% очистки). Напротив, в варианте с одним лишь активным илом снижение ХПК было незначительным, что свидетельствует о слабой способности исходной микрофлоры ила перерабатывать данные специфические загрязнения [13].

Следовательно, *Bacillus subtilis* ВКМ В-1742Д активно участвует в разложении органических компонентов сточных вод терефталевого производства и его присутствие резко повышает эффективность анаэробной очистки. При этом во всех вариантах отмечалось увеличение биомассы микроорганизмов и повышение pH среды (за счет образования щелочных продуктов метаболизма) в процессе очистки, что указывает на нормальное течение брожения и отсутствие угнетения культуры [13].

Полученные результаты обосновывают возможность применения анаэробной стадии очистки для стоков ТФК с инокуляцией адаптированным штаммом. В широком практическом применении рекомендуется именно сочетание *B. subtilis* ВКМ В-1742Д с анаэробным активным илом нефтехимических очистных сооружений в качестве стартовой культуры [13].

Также авторами предложена модернизация конструкции анаэробного реактора – использовать биореактор с псевдоожиженным (флюидизированным) слоем носителя. Такой тип реактора (описан в патенте РФ №2522105) представляет собой аппарат с восходящим потоком, оснащенный специальными сепараторами и устройствами для создания восходящего движения жидкости и биомассы. Псевдоожженный слой достигается за счет определенной скорости подачи сточной жидкости снизу, при которой частицы загрузки (носителя биопленки) и гранулы ила находятся во взвешенном (плавающем) состоянии, не вымываясь из реактора. На выходе установлен газоотделитель для сбора биогаза [13].

Преимущество такой конструкции – увеличение удерживаемой в реакторе биомассы и, как следствие, повышение степени преобразования органических загрязнений. Известно, что высокая степень очистки анаэробных стоков достигается только при наличии в реакторе большого количества активной биомассы, либо за счет ее роста в процессе эксплуатации [13].

В условиях псевдоожижения анаэробный активный ил ведет себя особым образом: постепенно образуются гранулы – плотные комочки из микроорганизмов диаметром 0,5–5 мм, с удельной плотностью примерно вдвое выше плотности воды. Такие гранулы обладают отличными седimentационными свойствами (иловый индекс 20–50 мл/г, что намного ниже, чем у дисперсного активного ила). [14].

2 Технологическая часть

2.1 Описание технологического процесса очистки

На основании рассмотренных данных предлагается следующая технологическая схема очистки сточных вод производства терефталевой кислоты. Она включает механическую стадию (усреднение и предварительная подготовка), реагентную очистку (коагуляция и отстаивание), анаэробный биореактор (основная стадия удаления органики), и блок глубокой доочистки (озонатор и фильтры).

Ниже приводится описание работы каждой ступени и принимаемые расчетные параметры.

2.1.1 Усреднение и подготовка стоков

Сточные воды от производства (реактор окисления, отделения и промывки ТФК) через сеть канализационных труб поступают в приемный резервуар-усреднитель. В данном резервуаре объемом $V=6000\text{ м}^3$ происходит выравнивание колебаний расхода и концентрации загрязнений. Суточный приток стоков $Q, \text{ м}^3/\text{сут}$, и их состав усредняются, что предотвращает гидравлические и концентрационные ударные нагрузки на последующие стадии.

В резервуаре предусмотрен медленный перемешивающий механизм или аэрация минимальной интенсивности для предотвращения осаждения твердых частиц и развития анаэробных зон (нежелательно на стадии усреднения).

Температура исходных стоков может достигать $60\text{--}80^\circ\text{C}$ (после реакторов окисления) [15], поэтому для защиты оборудования и оптимальной работы биореакторов стоки охлаждаются до $\sim 35^\circ\text{C}$ в теплообменнике. Охлаждение осуществляется за счет циркуляции охлаждающей воды через теплообменник. Также перед подачей на реагентную стадию осуществляется корректировка pH: добавляется раствор щелочи (например, NaOH) до нейтрального $\text{pH} \sim 6,5\text{--}7,0$, так как исходные стоки могут быть избыточно кислыми. Контроль pH важен для последующего анаэробного процесса [15].

При важности, на данной стадии дозируются дефицитные биогенные элементы – соединения азота и фосфора – чтобы соотношение BOD:N:P приблизилось к $100:5:1$ (оптимально для биологических процессов). В производственных условиях дефицит N,P можно покрывать подачей, например, раствора мочевины и ортофосфата [15].

2.1.2 Реагентная физико-химическая очистка

Из усреднителя сточная вода насосом дозируется в реактор-коагулятор. Здесь в потоке вводятся реагенты: коагулянт – сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ или

хлорное железо FeCl_3 (точная доза определяется по пробам, ориентировочно 50–150 мг/л), а также флокулянт – высокомолекулярный полиакриламид (дозировка ~1–5 мг/л) [16].

Коагулянт нейтрализует заряд коллоидных частиц и способствует образованию хлопьев гидроксидов, сорбирующих примеси, а флокулянт склеивает мелкие хлопья в более крупные агломераты. После быстрого перемешивания реагентов вода поступает в отстойник-осветлитель. В отстойнике происходит гравитационное осаждение образовавшихся хлопьев и частиц. Осадок, содержащий коагулированные примеси (нерасторимые органические смолы, частицы терефталевой кислоты, гидроксиды металлов катализатора), собирается на дне и периодически удаляется на уплотнение и утилизацию [16].

Осветленная вода с верхней части отстойника самотеком переливается в резервуар-сборник. На выходе из этой стадии удаляется до 70–80% взвешенных веществ и значительная доля нерастворимых органических загрязнений, снижается цветность и частично ХПК воды [16].

2.1.3 Анаэробная очистка

Расчетная нагрузка по органике на анаэробный реактор составляет ~5.81 кг ХПК/ $\text{м}^3\cdot\text{сут}$. При входной концентрации ХПК ~3530 мг/л и расходе на реактор ~4930 $\text{м}^3/\text{сут}$, объем ~3000 м^3 обеспечивает время гидравлического пребывания около 14.6 часов. Этого достаточно для превращения большей части легкоусвояемых веществ (уксусной кислоты, простых ароматических кислот) в биогаз. Степень удаления ХПК в анаэробном реакторе по расчетам достигает ~80%. С 3530 мг/л она снижается до ~494 мг/л на выходе.

2.1.4 Доочистка и обеззараживание.

Оставшиеся следовые количества органических веществ и возможные специфические примеси удаляются на завершающей стадии. Предусмотрены: фильтрация через зернистый материал (напорные фильтры), озонирование и сорбция на активированном угле. Вода после вторичного отстойника сначала проходит через песчаный фильтр, удаляющий мелкие частицы (помутнение снижается до <5 мг/л взвешенных).

Затем дозируется озон из генератора – сильный окислитель, который уничтожает остаточные органические вещества (например, следы красителей, фенолов) и обеззараживает воду. После озонатора вода поступает в колонну с активированным углем, где адсорбируются и биодеструктируются (путем активности прикрепленных на угле микроорганизмов) последние остатки органических примесей. Два последних процесса – озонирование и биосорбция – несут основную нагрузку по удалению из воды остаточных загрязнений. На

выходе из сорбционного фильтра вода считается очищенной до необходимых нормативов: ХПК < 50 мг/л, БПК₅ < 5 мг/л, отсутствие токсичных веществ (фенолы < 0,1 мг/л и т.д.), прозрачность высокая, цветность минимальная. Очищенная сточная вода либо сбрасывается в систему канализации общегородскую (при условии соответствия требованиям приемной организации) либо может возвращаться в технический водооборот предприятия (после дополнительной очистки – например, через обратный осмос – для удаления растворенных солей, если важно).

Для контроля качества на выходе предусмотрены автоматические анализаторы ХПК и содержания органического углерода, а также периодический лабораторный анализ на конкретные целевые примеси (например, бензойная кислота, содержание тяжелых металлов). Обеззараживание сточной воды озоном обычно достаточно, но при важности можно дополнительно применять ультрафиолетовое облучение или хлорирование, если вода будет храниться перед сбросом.

Утилизация образующихся побочных продуктов. Проектируемая технология помимо очищенной воды продуцирует следующие отходящие потоки: осадок коагуляции, содержащий неорганические и органоминеральные компоненты; биогаз с анаэробной стадии.

Осадок после уплотнения и обезвоживания может содержать токсичные металлы (Co, Mn) и органику, поэтому оптимальный способ – сжигание в специальной печи или совместно с бытовыми отходами. Зольный остаток после сжигания относительно мал и может быть захоронен. Избыточный активный ил также целесообразно обезвоживать и сжигать, либо использовать в качестве компостируемого материала (если нет токсичных компонентов). Биогаз от анаэробного реактора – ценный энергетический ресурс: его ожидаемое количество при удалении ~9476 кг ХПК/сут составляет до ~2900 м³/сут (с содержанием ~65% CH₄). Это эквивалентно ~9,63 МВт·ч тепловой энергии в сутки.

Предполагается использовать биогаз в существующей котельной для замещения части природного газа при парообразовании. Для этого биогаз может подаваться после очистки от H₂S (если он присутствует) в топку котла. Либо возможна установка газопоршневого генератора для выработки электроэнергии из биогаза, что покрыло бы значительную часть энергозатрат на работу насосов и аэраторов системы.

2.2 Описание технологической схемы установки

На рисунке 1 представлена технологическая схема установки. Установка направлена на глубокую очистку высококонцентрированных сточных вод, образующихся в результате производства терефталевой кислоты, важного сырья для производства полиэфирных материалов. Предлагаемая схема очистки состоит из нескольких последовательных технологических этапов, реализующих

комплексный подход с использованием механических, физико-химических и биологических методов очистки.

На начальном этапе сточные воды поступают в резервуар-усреднитель (1) большого объема, в котором осуществляется выравнивание состава и расхода сточных вод, а также нормализация температуры и pH. Из усреднителя сточные воды направляются в реактор-коагулятор (2), где подвергаются коагуляции и флокуляции с использованием солей алюминия (16) или железа (15), а также полимерных флокулянтов (14). Образующиеся хлопья осаждаются в отстойнике-осветлителе (3), значительно снижая содержание взвешенных веществ и нерастворимых органических загрязнений.

Следующий, центральный этап технологии – анаэробная биологическая очистка, осуществляется в биореакторе (4) с псевдоожиженным слоем носителя. Конструкция данного реактора обеспечивает эффективное удержание биомассы за счёт поддержания взвешенного состояния гранул активного ила и носителя, способствуя стабильному протеканию анаэробного процесса. Анаэробное разложение органических веществ происходит под действием специально подобранного консорциума микроорганизмов, включающего анаэробный активный ил и факультативный анаэробный штамм *Bacillus subtilis* BKM B-1742 Д. Данный штамм отличается способностью к интенсивной биодеструкции ароматических соединений, таких как бензойная кислота и другие трудноразлагаемые вещества, характерные для сточных вод производства ТФК [16].

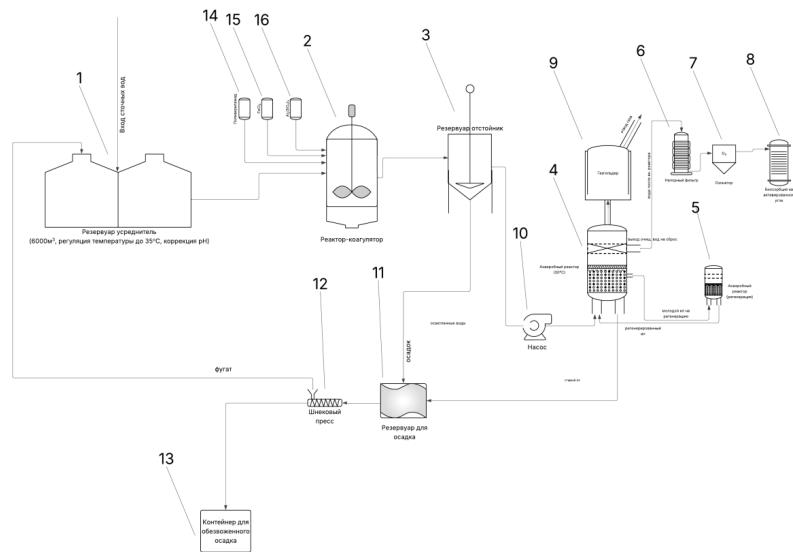


Рис.1 – Технологическая схема анаэробной очистной установки.

Анаэробный биореактор обеспечивает снижение химического потребления кислорода (ХПК) более чем на 80%, преобразуя органические загрязнения в биогаз (метан и углекислый газ). Получаемый биогаз направляется на утилизацию, что позволяет существенно снизить энергозатраты предприятий.

Последний этап очистки состоит из нескольких процессов, таких как фильтрация через зернистые материалы (6), озонирование (7) и сорбция на

активированном угле (8). Озонирование и сорбция предназначены для глубокого удаления следовых концентраций органических соединений и дезинфекции очищенных сточных вод, что обеспечивает высокое качество воды, соответствующее нормативным требованиям по сбросу или повторному использованию.

Следовательно, можно отметить, что предложенная технологическая схема позволяет эффективно удалять органические загрязнения и существенно снижать нагрузку на последующие вторичные стадии очистки. Применение специально подобранных микроорганизмов и оптимизированной конструкции анаэробного биореактора с псевдоожиженным слоем позволяет достигнуть высокой стабильности и эффективности работы всей установки, а также обеспечить дополнительное преимущество в виде выработки возобновляемого энергетического ресурса (биогаза). Данная схема является перспективной и практически значимой для предприятий, производящих терефталевую кислоту, и может быть успешно внедрена для минимизации экологического воздействия таких производств.

2.3 Применяемые штаммы микроорганизмов

Эффективность биологической очистки напрямую зависит от состава и активности участвующих микроорганизмов. В предлагаемой анаэробной установке ключевую роль играет смешанное сообщество бактерий и архей, способных разрушать присутствующие в сточной воде органические соединения. Основу сообщества составляет метаногенный активный ил, заимствованный с других анаэробных биореакторов (например, с установок очистки нефтехимических сточных вод).

В анаэробном иле присутствуют: гидролизующие бактерии (разлагающие полимеры и частицы ТФК до растворимых веществ), ацидогенные бактерии (преобразующие моносахариды, аминокислоты и др. в органические кислоты), ацетогенные бактерии (превращающие пропионат, бутырат, бензоат и прочие кислоты в ацетат, H_2 , CO_2) и метаногенные археи двух типов – ацетокластные (потребляющие уксусную кислоту) и водородотрофные (потребляющие H_2/CO_2). Такой комплекс обеспечивает полный цикл анаэробного разложения [17].

Особенностью нашего проекта является целенаправленное обогащение сообщества специализированным штаммом *Bacillus subtilis* ВКМ В-1742Д. Данный штамм был выбран на основе исследований [17], показавших его способность разлагать ароматические ксенобиотики (в том числе хлорфеноксикусные кислоты и акрилаты) и эффективно работать в анаэробных условиях как факультативный анаэроб. *B. subtilis* – грамположительная спорообразующая бактерия. В аэробных условиях он широко известен как производитель ферментов и деструктор различных субстратов; в анаэробных (факультативных) – может сбраживать органику до

органических кислот, спиртов, CO₂ и H₂. Присутствие *B. subtilis* в анаэробном реакторе, по-видимому, ускоряет начальные стадии разложения сложных ароматических соединений, таких как п-толуиловая и бензойная кислоты. Возможно, *B. subtilis* ферментирует их до более простых соединений (например, до ацетата, формиата), которые уже затем потребляются метаногенной частью сообщества. Следовательно, можно отметить, что этот штамм выступает как “первичный разрушитель” специфических субстратов, которые медленнее разлагаются обычным метаногенным илом. Экспериментально наглядно продемонстрировано, что консорциум активного ила с *B. subtilis* дает степень очистки >80%, тогда как один активный ил – лишь около 20% [18]. Это подтверждает важность присутствия подобного штамма.

Кроме *B. subtilis*, в анаэробном реакторе могут использоваться и другие полезные культуры. Например, для разложения бензойной кислоты известны синтрофные бактерии рода *Syntrophus*, которые в ассоциации с водородотрофными метаногенами способны декарбоксилировать бензоат до ацетата и H₂. Обогащение культуры такими бактериями также благоприятно.

Однако в практике чаще всего полагаются на естественную адаптацию: при длительной работе реактора микроорганизмы, для которых есть субстрат, размножаются сами. Поэтому главное – создать условия (температура, pH, отсутствие токсинов) и, при возможности, внести “стартер” в виде специфичного штамма. В рассматриваемом случае таковым является *B. subtilis* ВКМ В-1742Д. Его ввод осуществляют единожды при запуске, далее он размножается в составе сообщества. Возможно, периодически (например, раз в месяц) стоит подкультивировать *B. subtilis* отдельно и подсыпать в реактор, чтобы поддерживать его численность, особенно если исходный поток загрязнений непостоянен [19].

При дозировании озона и прохождении через активированный уголь на последней стадии также задействованы микроорганизмы: на угольных фильтрах поселяются аэробные биопленки, доокисляющие адсорбированные вещества (этот процесс называют биосорбцией). Обычно там обитают разного рода псевдомонады, ацинетобактер и др., питающиеся остаточной органикой [20].

В целом, комплекс используемых микроорганизмов в установке включает: анаэробные бактерии (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Syntrophus*, *Bacillus* и др.) и метаногенные археи (*Methanosaeta*, *Methanobacterium* и др.). Такой биоценоз, будучи правильно поддерживаемым, способен обеспечить практически полное удаление целевого загрязнения. Подбор штаммов в нашем проекте ориентирован на усиление анаэробной фазы за счет *B. Subtilis* [20].

Дальнейшие исследования могут выявить и другие штаммы-эффективные деструкторы, например, специальные археи, разлагающие ароматические кислоты напрямую до метана, или генно-модифицированные культуры с расширенными метаболическими путями. Но на данный момент *Bacillus subtilis* ВКМ В-1742Д – оптимальный выбор, подтвержденный экспериментально [21].

2.4 Характеристика исходных объектов и материалов

2.4.1 Объём сточных вод

Источник: производство терефталевой кислоты (ТФК)

Производственная мощность: 600 000 тонн ТФК в год

Удельный водоотвод: 3,0 м³/т ТФК

Годовой объём сточных вод: 1 800 000 м³

Суточный объём сточных вод: 4930 м³

Температура: 35–40 °C

pH: 8.0–9.0

В таблице 1 приведены характеристики исходных сточных вод производства терефталевой кислоты.

Таблица 1 - Химические характеристики сточных вод (до очистки)

Показатель	Концентрация, мг/л	Масса, кг/сут
Химическое потребление кислорода (ХПК)	3530	17 408
Биохимическое потребление кислорода (БПК5)	400	1973
Уксусная кислота	117.3	578
Этиленгликоль	17.3	85
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	71.08	351
Хлориды (Cl ⁻)	260.51	1285
Взвешенные вещества	60	296

В таблице 2 показан объем и время удержания сточных вод на каждом этапе очистки.

Таблица 2 - Объёмы и время удержания в аппаратах

Аппарат	Объём, м ³	Время удержания при 4930 м ³ /сут
Усреднитель	6000	1.23 суток (29.2 ч)
Реактор-коагулятор	250	1.22 ч
Отстойник	500	2.43 ч
Анаэробный реактор	3000	14.6 ч

2.5 Материальный баланс

2.5.1 Расчёт степени очистки загрязняющих веществ

Для оценки эффективности очистки сточных вод на всех стадиях обработки (коагуляция, отстаивание, анаэробная очистка) выполняется расчёт

концентраций загрязняющих веществ после каждой стадии. Расчёт ведётся по формуле

$$C_{\text{после}} = C_{\text{до}} \times (1 - \eta), \quad (1)$$

где $C_{\text{после}}$ — концентрация после стадии, мг/л;
 $C_{\text{до}}$ — концентрация до стадии, мг/л;
 η — эффективность удаления на данной стадии (доля от 1.0);

ХПК:

До очистки: 3530 мг/л;

После коагуляции: $3530 \times (1 - 0.3) = 2471.0$ мг/л;

После отстаивания: $2471.0 \times (1 - 0.0) = 2471.0$ мг/л;

После анаэробной очистки: $2471.0 \times (1 - 0.8) = 494.2$ мг/л;

БПК5:

До очистки: 400 мг/л;

После коагуляции: $400 \times (1 - 0.2) = 320.0$ мг/л;

После отстаивания: $320.0 \times (1 - 0.0) = 320.0$ мг/л;

После анаэробной очистки: $320.0 \times (1 - 0.85) = 48.0$ мг/л;

Уксусная кислота:

До очистки: 117.3 мг/л;

После коагуляции: $117.3 \times (1 - 0.2) = 93.84$ мг/л;

После отстаивания: $93.84 \times (1 - 0.0) = 93.84$ мг/л;

После анаэробной очистки: $93.84 \times (1 - 0.75) = 23.46$ мг/л;

Этиленгликоль:

До очистки: 17.3 мг/л;

После коагуляции: $17.3 \times (1 - 0.2) = 13.84$ мг/л;

После отстаивания: $13.84 \times (1 - 0.0) = 13.84$ мг/л;

После анаэробной очистки: $13.84 \times (1 - 0.8) = 2.77$ мг/л;

Сульфаты:

До очистки: 71.08 мг/л;

После коагуляции: $71.08 \times (1 - 0.0) = 71.08$ мг/л;

После отстаивания: $71.08 \times (1 - 0.0) = 71.08$ мг/л;

После анаэробной очистки: $71.08 \times (1 - 0.0) = 71.08$ мг/л;

Взвешенные вещества:

До очистки: 60 мг/л;

После коагуляции: $60 \times (1 - 0.5) = 30.0$ мг/л;

После отстаивания: $30.0 \times (1 - 0.4) = 18.0$ мг/л;

После анаэробной очистки: $18.0 \times (1 - 0.05) = 17.1$ мг/л;

2.5.2 Расчёт массы удаляемых загрязняющих веществ

На основании рассчитанных концентраций загрязняющих веществ после каждой стадии очистки определяется масса удаляемых примесей, образующихся в процессе очистки. Расчёт ведётся по формуле

$$W = (C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}}) \times Q, \quad (2)$$

где W — масса удалённого вещества, кг/сут;
 $C_{\text{нач}}$ — концентрация до стадии, мг/л;
 $C_{\text{кон}}$ — концентрация после стадии, мг/л;
 Q — расход сточных вод, м³/сут (принимается 4930 м³/сут).

2.5.3 Масса удалённых загрязнений по стадиям

ХПК:

Удаление на стадии коагуляции: $(3530 - 2471) \times 4930 / 1000 = 5220.87$ кг/сут;
Удаление на стадии анаэробной очистки: $(2471 - 494) \times 4930 / 1000 = 9746.61$ кг/сут;

Суммарное удаление: 14967.48 кг/сут;

БПК5:

Удаление на стадии коагуляции: $(400 - 320) \times 4930 / 1000 = 394.4$ кг/сут;
Удаление на стадии анаэробной очистки: $(320 - 48) \times 4930 / 1000 = 1340.96$ кг/сут;

Суммарное удаление: 1735.36 кг/сут;

Уксусная кислота:

Удаление на стадии коагуляции: $(117.3 - 93.84) \times 4930 / 1000 = 115.66$ кг/сут;
Удаление на стадии анаэробной очистки: $(93.84 - 23.46) \times 4930 / 1000 = 346.97$ кг/сут;

Суммарное удаление: 462.63 кг/сут;

Этиленгликоль:

Удаление на стадии коагуляции: $(17.3 - 13.84) \times 4930 / 1000 = 17.06$ кг/сут;
Удаление на стадии анаэробной очистки: $(13.84 - 2.77) \times 4930 / 1000 = 54.58$ кг/сут;

Суммарное удаление: 71.64 кг/сут;

Взвешенные вещества:

Удаление на стадии коагуляции: $(60 - 30) \times 4930 / 1000 = 147.9$ кг/сут;
Удаление на стадии анаэробной очистки: $(30 - 17.1) \times 4930 / 1000 = 63.6$ кг/сут;
Суммарное удаление: 211.5 кг/сут;

Сульфаты:

Удаление на стадии коагуляции: $(71.08 - 71.08) \times 4930 / 1000 = 0.0$ кг/сут;
Удаление на стадии анаэробной очистки: $(71.08 - 71.08) \times 4930 / 1000 = 0.0$

кг/сут;

Суммарное удаление: 0.0 кг/сут;

Хлориды:

Удаление на стадии коагуляции: $(260.51 - 260.51) \times 4930 / 1000 = 0.0$ кг/сут;

Удаление на стадии анаэробной очистки: $(260.51 - 260.51) \times 4930 / 1000 = 0.0$ кг/сут;

Суммарное удаление: 0.0 кг/сут;

2.5.4 Расчёт массы илового осадка и регенерации

Иловый осадок образуется исключительно на стадии анаэробной очистки, в которой задействован микроорганизм *Bacillus subtilis* ВКМ В-1742Д. Расчёт массы ила производится на основе удаления ХПК именно на данной стадии. Формула расчёта массы ила

$$M_{ил} = Y \times W, \quad (3)$$

где: $M_{ил}$ — масса образующегося ила, кг/сут;

Y — удельный выход ила, кг ила/кг удалённого ХПК (принято $Y = 0,07$);

W — масса удалённого ХПК на анаэробной стадии, кг/сут.

Удалённый ХПК на анаэробной стадии: $(2471 - 494) \times 4930 / 1000 = 9746.61$ кг/сут

Масса ила: $9746.61 \times 0.07 = 682.26$ кг/сут (Удаление ~9746 кг ХПК/сут соответствует выработке до **2900 м³/сут биогаза**, содержащего 60–70% CH₄) при влажности 98% (2% сухих веществ), объём ила:

$$682.26 / (1000 \times 0.02) = 34.11 \text{ м}^3/\text{сут}$$

2.5.5 Учет регенерации ила

В проекте предусмотрен второй анаэробный реактор объёмом 60 м³, используемый исключительно для регенерации активного ила. Это решение позволяет сохранять активную биомассу, и уменьшать количество ила, подлежащего удалению и утилизации.

2.5.6 Остаточная нагрузка и состав очищенной воды

На основании результатов очистки сточных вод после прохождения всех стадий обработки (коагуляции, отстаивания и анаэробной биологической очистки), рассчитывается остаточная концентрация и масса загрязняющих веществ в выходной воде. Расчёт проводится по формуле:

$$W = C \times Q / 1000, \quad (4)$$

где W — масса остаточного вещества, кг/сут;
 C — остаточная концентрация, мг/л;
 Q — объём сточных вод, м³/сут (в нашем случае — 4930 м³/сут).

В таблице 3 показаны концентрации и масса загрязнений после прохождения полной трёхступенчатой очистки

Таблица 3 - Остаточные концентрации и масса загрязнений

Показатель	Остаточная концентрация, мг/л	$Q, \text{м}^3/\text{сут}$	Масса остатка, кг/сут
ХПК	494	4930	2435.42
БПК ₅	48	4930	236.64
Уксусная кислота	23.46	4930	115.66
Этиленгликоль	2.77	4930	13.66
Взвешенные вещества	17.1	4930	84.3
Сульфаты	71.08	4930	350.42
Хлориды	260.51	4930	1284.31

Полученные значения показывают количество загрязняющих веществ, остающихся в воде после полной трёхступенчатой очистки. Дальнейшее сравнение этих показателей с нормативами сброса или требованиями к доочистке определит необходимость дополнительных стадий таких как озонирование, биосорбция или мембранный фильтрация.

2.5.7 Доочистка сточных вод после анаэробной стадии

После прохождения стадии анаэробной биологической очистки, сточные воды всё ещё содержат повышенные концентрации органических загрязнителей (ХПК, БПК₅, гликоли, кислоты), что требует применения дополнительных ступеней доочистки для достижения нормативных значений ПДК. Предлагается трёхступенчатая система доочистки: фильтрация, озонирование и биосорбция.

2.6 Схема доочистки

Оптимальная последовательность доочистки включает:

- Фильтрацию (удаление остаточных взвешенных веществ);
- Озонирование (глубокое окисление органики);

- Биосорбцию с использованием бактерии *Pseudomonas putida* на активированном угле.

2.6.1 Эффективность по стадиям доочистки

Таблица 4 – Показания концентрации загрязнителей после очистки

Показатель	После анаэробной, мг/л	После фильтрации, мг/л	После озонирования, мг/л	После биосорбции, мг/л	Соответствие ПДК
ХПК	494	400	100	30	≤ 30
БПК ₅	48	35	7	2	≤ 5
Взвешенные вещества	17.1	3	3	3	≤ 5
Этиленгликоль	2.77	2.5	1.2	0.4	≤ 1

Таким образом, применение последовательной доочистки позволяет достичь нормативных требований по всем основным показателям. Использование *Pseudomonas putida* на стадии биосорбции обеспечивает биологическое дозложение остаточной органики, включая уксусную кислоту и следы этиленгликоля, устойчивые к окислению озоном. *P. putida* активно разрушает ароматические остатки и спирты, адсорбируемые на поверхности активированного угля, формируя аэробную биоплёнку.

2.7 Расчёт анаэробного биореактора

В данном разделе приведены расчеты анаэробного биореактора, в том числе:

- Размеры
- Время задержания
- Степень снижения ХПК

На рисунке 2 приведена схема анаэробного биореактора

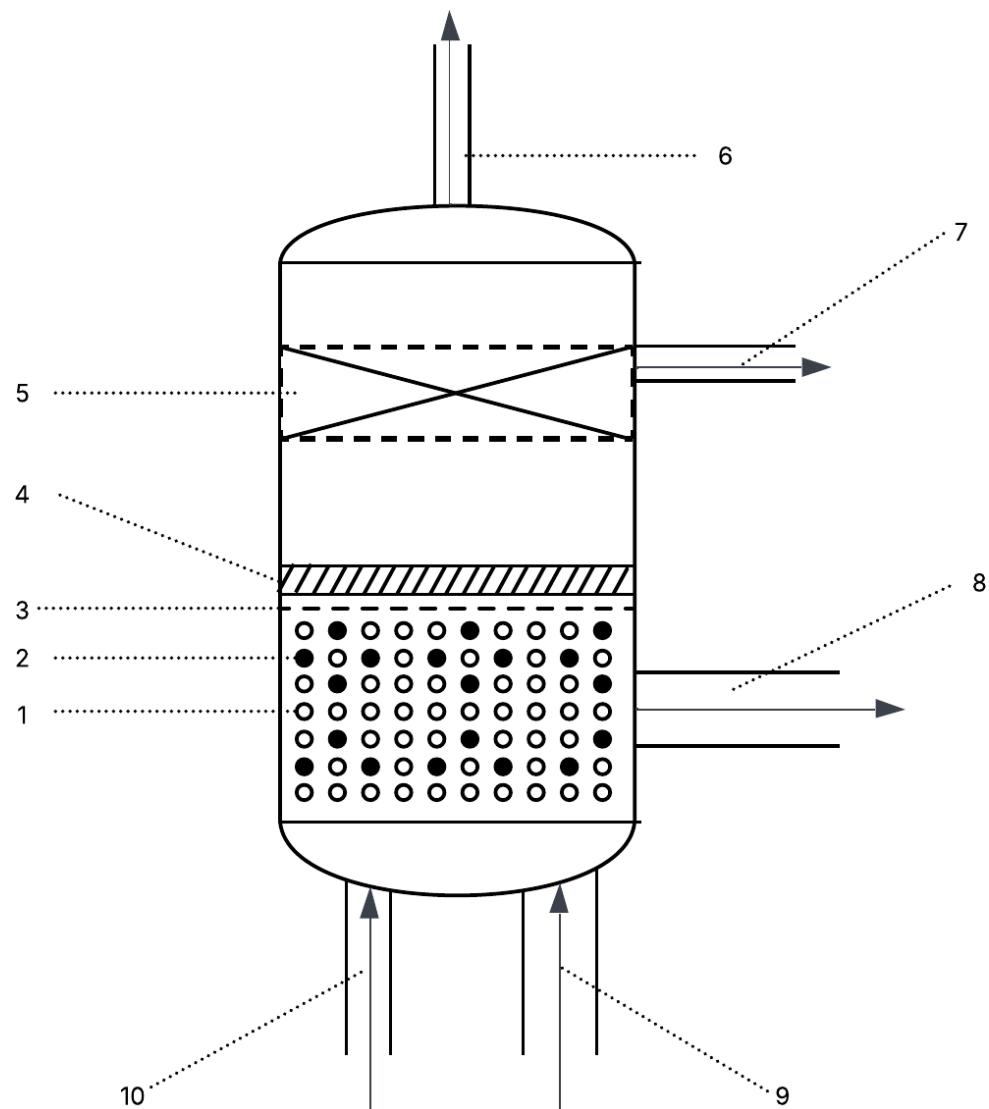


Рис. 2

1 - Гранулы активного ила, 2 - инертные носители, 3 - граница псевдоожиженного слоя, 4 - флотационный барьер, 5 - газосепаратор, 6 - выход газа, 7 - выход очищенной воды, 8 - отвод “старого” ила, 9 - введение регенерированного ила, 10 - поступление осветленной воды

В таблице 5 указаны данные входящих сточных вод, объем реактора и условия в нём

Таблица 5 – Исходные данные

Показатель	Значение
Суточный объём сточных вод	4930 м ³ /сут
Концентрация ХПК на входе	3530 мг/л
Требуемая степень очистки	80%
Концентрация ХПК на выходе	706 мг/л
Объём реактора	3000 м ³
Время гидравлического удержания	≈ 29.2 ч
Рабочая температура	32–37 °C

Гидравлическое время пребывания высчитывается по формуле

$$t = V / Q \times 24, \quad (5)$$

где V — объём реактора, м³; Q — расход сточных вод, м³/сут.
 $3000 / 4930 \times 24 \approx 29.2$ ч

Органическая нагрузка высчитывается по формуле

$$L_o = Q \times C_{xPK} / V \quad (6)$$

$$4930 \times 3.53 / 3000 \approx 5.8 \text{ кг ХПК/м}^3\cdot\text{сут}$$

Удаление ХПК в сутки высчитывается по формуле

$$\Delta XPK = Q \times (C_{bx} - C_{vyx}) \quad (7)$$

$$4930 \times (3.53 - 0.706) \approx 13.96 \text{ т/сут}$$

Образование биогаза

1 кг ХПК даёт ~0.6 м³ метана $\Rightarrow 13960 \times 0.6 \approx 8376$ м³/сут

Образование ила

На 1 кг ХПК ~0.07 кг ила $\Rightarrow 13960 \times 0.07 \approx 977$ кг/сут

Геометрические размеры реактора.

Для цилиндрического резервуара при диаметре 12 м ($r = 6$ м), высота рассчитывается по формуле

$$h = V / (\pi \times r^2) = 3000 / (3.14 \times 6^2) \approx 26.5 \text{ м} \quad (8)$$

3 Строительная часть

Строительная часть проекта предусматривает возведение комплекса сооружений для реализации технологии анаэробной очистки сточных вод, образующихся при производстве терефталевой кислоты (ТФК). Основное здание очистных сооружений включает в себя помещения для размещения коагуляционного оборудования, отстойников, анаэробных реакторов, озонатора, биофильтров, а также технические и вспомогательные помещения.

3.1 Архитектурно-строительное решение

Здание очистных сооружений представляет собой прямоугольное одноэтажное здание размером 40×60 м с общей площадью 768 м^2 . Каркас здания — сборный железобетон. Наружные стены выполнены из сэндвич-панелей толщиной 100 мм на металлическом каркасе, облицовка — профлист с антикоррозионным покрытием [15].

Фундамент ленточный монолитный железобетонный, глубина заложения 2.4 м, армирование выполнено арматурой А400. Полы — монолитные бетонные, с уклоном 2% к дренажным трапам, покрытие — эпоксидная смола. Кровля — односкатная, с теплоизоляцией из плит PIR толщиной 120 мм и гидроизоляционным слоем из ПВХ-мембранны. Скат кровли ориентирован на внутренний водосток. Высота от пола до потолка — 6 м [15].

3.2 Строительно-монтажные конструкции

Монтаж каркаса здания осуществляется из предварительно изготовленных железобетонных колонн и ригелей, соединяемых закладными деталями и сварными швами. Обвязка металлоконструкций крыши выполнена из стального швеллера №18, уклон обеспечивается продольным укладом стропильных ферм.

Соединения стеновых панелей осуществляются через шпунтовые соединения и уплотнительные прокладки, крепление к несущему каркасу — самонарезающими болтами с термошайбами. Все соединения антикоррозионные, с герметизацией монтажных стыков герметиком на основе полиуретана [15].

3.3 Коммуникации и инженерные системы

Внутри здания предусмотрены трубопроводы подачи стоков из усреднителя к коагулятору (диаметр DN200, материал — ПВХ), далее — к отстойнику и анаэробному реактору [15].

4 Автоматизация технологического процесса

Автоматизация установки по анаэробной очистке сточных вод производства терефталевой кислоты (ТФК) направлена на обеспечение непрерывной, стабильной и безопасной работы технологических процессов, минимизацию участия обслуживающего персонала и своевременное реагирование на отклонения параметров.

4.1 Цели автоматизации

Введение датчиков и контролёров преследует следующие цели:

- контроль расхода, уровня, температуры и давления на всех ключевых участках;
- автоматическое регулирование дозирования реагентов;
- поддержание стабильных условий в анаэробном реакторе (объемный расход, температура, давление газа);
- сигнализация о нештатных режимах работы оборудования;
- ведение архивов данных, дистанционный доступ и отчётность.

4.2 Основные автоматизируемые узлы

По всей установке используются следующие датчики и контролёры

1. Блок усреднения:

- датчики уровня (ультразвуковые), расхода (электромагнитные);
- автоматическое управление насосами перекачки.

2. Реактор-коагулятор:

- автоматическое дозирование коагулянтов и флокулянтов (на базе расходомеров и насос-дозаторов);
- контроль pH и температуры;
- управление мешалками по таймеру или сигналу от концентрации взвесей.

3. Отстойник:

- автоматический слив осадка с таймерным управлением;
- датчики уровня и мутности.

4. Анаэробный биореактор:

- датчики давления биогаза;
- температуры;
- уровня жидкости;
- датчик pH

Схема автоматизации анаэробного реактора представлена на рисунке 3

Все датчики подключаются к реакторной панели мониторинга, что дает быстрый доступ к показателям. Кроме того, вся информация дублируется на диспетчерский пункт.

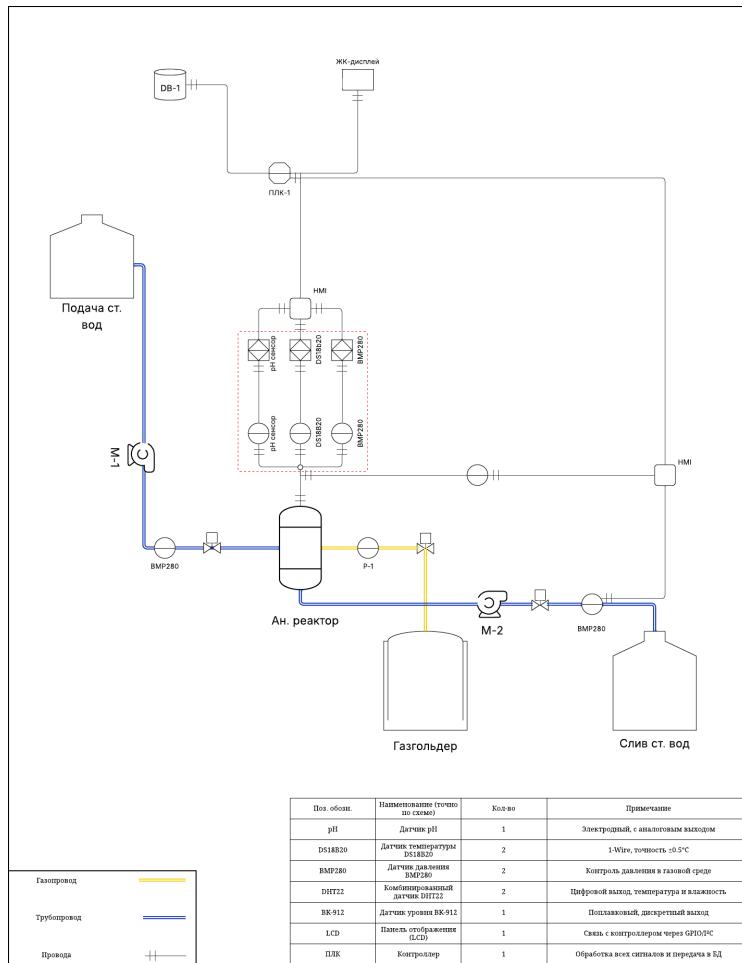


Рис. 3 – Схема расположения датчиков автоматизации на биореакторе

5. Озонатор и биофильтры:

- включение генератора озона по таймеру;
- контроль расхода воздуха и температуры колонн с *Pseudomonas putida*.

4.3 Средства автоматизации

В проекте применяются контроллеры типа Siemens S7-1200 с аналоговыми и дискретными модулями ввода-вывода. Связь с операторами обеспечивается через панель оператора (HMI) с возможностью отображения текущих параметров, журналов аварий и архива. Вся система объединена в единый шкаф управления (ШУ), размещённый в операторской. Датчики уровня — Siemens, pH-метры — Endress+Hauser, расходомеры — Krohne, температура — Pt100 [16].

5 Охрана труда и окружающей среды

В данном разделе рассматриваются вопросы обеспечения безопасных условий труда работников очистных сооружений, а также меры по минимизации негативного воздействия проекта на окружающую среду. Проект разработан в соответствии с требованиями Трудового кодекса Республики Казахстан, санитарными нормами, СНиП РК, а также экологическим законодательством.

5.1 Обеспечение безопасных условий труда

Работа на объекте связана с эксплуатацией оборудования для коагуляции, анаэробной очистки и третичной доочистки сточных вод, поэтому предусматриваются следующие меры:

- Все производственные помещения обеспечены естественным и искусственным освещением;
- На рабочих местах установлена принудительная вентиляция, включая локальные отсосы у коагуляторов и фильтров;
- Проходы между оборудованием шириной не менее 1.2 м обеспечивают безопасный доступ и эвакуацию;
- Все поверхности полов водостойкие, с противоскользящим покрытием и уклоном к водоотводам;
- Оборудование снабжено аварийными кнопками отключения питания и надписями по технике безопасности.

Персонал обеспечивается средствами индивидуальной защиты: защитной спецодеждой, резиновыми перчатками, защитными очками, респираторами при работе с порошковыми реагентами. Перед допуском к работе проводится инструктаж по технике безопасности, раз в полгода – повторный инструктаж, ежегодно – обучение по охране труда.

5.2 Электробезопасность

Все токоведущие части оборудования заземлены. Распределительные щиты размещаются в отдельных помещениях. Кабельные трассы защищены от попадания влаги и механических повреждений. На щитах установлены автоматические выключатели с УЗО.

5.3 Пожарная безопасность

Объект отнесен к категории В1 по пожарной опасности. Здание оборудовано системой пожарной сигнализации, внутренним водопроводом пожаротушения с рукавами и кранами, наружной гидрантной системой. В

местах размещения электрооборудования установлены огнетушители ОП-5. Из всех помещений предусмотрены не менее двух эвакуационных выходов, в том числе — аварийные двери с антипаникой.

5.4 Защита окружающей среды

Установка анаэробной очистки стоков спроектирована с целью предотвращения загрязнения поверхностных и подземных вод. Сточные воды, сбрасываемые после третичной очистки, соответствуют требованиям по ХПК, БПК, ПАВ и другим показателям, регламентированным нормами ПДК для сброса в централизованную канализацию.

Для предотвращения загрязнения воздуха применяются герметичные соединения трубопроводов и вентиляционные системы с фильтрами. Образующийся биогаз используется в технологических целях (теплогенерация), что снижает выбросы парниковых газов. Ил после анаэробной очистки обезвоживается и направляется на дальнейшую переработку или утилизацию в соответствии с санитарными нормами.

В рамках оценки экологических преимуществ разработанной установки особое внимание уделено снижению углеродного следа. Производство терефталевой кислоты сопровождается значительным объёмом сточных вод с высокой концентрацией органических веществ, способствующих образованию парниковых газов при неконтролируемом разложении.

В предложенной технологии используется анаэробный биореактор с псевдоожиженным слоем, в котором происходит переработка органических загрязнителей с образованием биогаза (основным компонентом которого является метан). Получаемый метан используется для генерации энергии внутри предприятия, что позволяет частично заместить внешние источники электроэнергии, преимущественно углеродного происхождения. Это влечёт за собой сокращение выбросов CO₂ эквивалента.

Дополнительно, за счёт сокращения объёма загрязнений, сбрасываемых в окружающую среду, уменьшается косвенный углеродный след, связанный с воздействием на водные экосистемы и необходимостью последующей очистки на централизованных станциях.

Сброс даже частично неочищенных ТФК-стоков в водные объекты влечёт за собой биоаккумуляцию ароматических соединений в донных отложениях и фитопланктоне. Для Каспийского региона это представляет угрозу не только экологии, но и рыбной промышленности. Проект направлен на предотвращение таких последствий.

5.5 Меры по снижению шума и вибраций

Для оборудования с повышенным уровнем шума (насосы, вентиляторы) предусмотрены виброизолирующие основания. Шумозащитные кожухи устанавливаются на источниках с уровнем выше 85 дБ. Общий уровень шума в рабочих зонах не превышает допустимых 80 дБ.

5.6 Контроль и мониторинг

На объекте осуществляется регулярный контроль условий труда и состояния окружающей среды. Предусмотрена система мониторинга качества очищенной воды (по ХПК, БПК, мутности и пр.), а также контроль микроклимата в помещении (температура, влажность, вентиляция). Все данные регистрируются в электронном журнале.

6 Экономическая часть

Главными требованиями к выбранной схеме очистки стали соблюдение нормативов по сбросу, надёжность, высокая степень удаления ХПК, энергоэффективность и допустимый уровень затрат. В качестве базового решения принята многоступенчатая технология, включающая стадии усреднения, коагуляции, отстаивания, анаэробного сбраживания, а также третичную доочистку озонированием и биосорбцией.

Основную нагрузку по удалению органики несёт анаэробный биореактор с псевдоожиженным слоем объёмом 3000 м³. Его работа обеспечивает снижение ХПК примерно на 80%, что позволяет перейти от исходных 3530 мг/л до уровня около 30 мг/л — соответствующего санитарным требованиям для сброса в централизованную канализацию. Суточный объём сточных вод — 4930 м³. Годовой объём удаляемых загрязнений оценивается в более чем 6200 тонн.

Для размещения оборудования после усреднителя предусмотрено здание площадью 2400 м². Вся установка включает в себя:

- резервуар-усреднитель на 6000 м³;
- коагуляционный реактор на 250 м³;
- отстойник на 500 м³;
- анаэробный реактор на 3000 м³;
- реактор для регенерации ила на 60 м³;
- озонатор производительностью 3 кг/ч;
- три биофильтра с загрузкой активированным углём и микроорганизмами *Pseudomonas putida*;

В таблице 6 приведены вложения на покупку и оборудование всех элементов установки

Таблица 6 - Капитальные вложения

Элемент	Сумма, млн тг	Цена за единицу (млн тг)	Комментарий
Усреднитель 6000 м ³	230	0.038	Железобетон, фундамент, гидроизоляция
Коагулятор 250 м ³	42	42	Сталь с мешалками и дозаторами
Отстойник 500 м ³	38	0.075	Железобетонный резервуар с механикой
Анаэробный реактор 3000 м ³	290	0.096	Псевдоожиженный слой, газосбор, КИПиА
Реактор ила 60 м ³	12	0.2	С насосами, возможной аэрацией
Озонатор 3 кг/ч	13	4.3	Генератор + охладитель
Биофильтры (3 колонки)	41	13.6	Уголь, <i>Pseudomonas putida</i>
Здание под оборудование	115	0.16	Металлокаркас, 2400 м ²
ИТОГО	781		Общие капитальные затраты

6.1 Расходные материалы и эксплуатационные затраты

Химические реагенты

Коагулянт – хлорид железа (FeCl_3);

Дозировка: ~40 мг/л

Суточный объём стоков: 4930 м³

Потребление в сутки: $4930 \times 0.04 = 197.2$ кг

Годовое потребление: $197.2 \times 365 = \sim 72$ т/год

Цена: ~150 тг/кг

Итого в год: $72\ 000 \times 150 = 10.8$ млн тг

Флокулянт – полиакриламид (ПАА);

Дозировка: ~1.5 мг/л

Потребление в сутки: $4930 \times 0.0015 = 7.4$ кг

Годовое потребление: ~2.7 т/год

Цена: ~1000 тг/кг

Итого в год: $2700 \times 1000 = 2.7$ млн тг

Щёлочь (NaOH) – для нейтрализации;

Оценочная доза: ~30 мг/л

Годовой расход: $4930 \times 0.03 \times 365 = \sim 54$ т/год

Цена: ~170 тг/кг

Итого в год: $54\ 000 \times 170 = 9.2$ млн тг

Озон (расход по энергии и кислороду);

Производительность: 3 кг/ч × 24 ч = 72 кг/сут

Годовое производство: $72 \times 365 = 26.3$ т/год

Условная стоимость с учётом генерации и кислорода: ~900 тг/кг

Итого в год: $26\ 300 \times 900 = \sim 23.7$ млн тг

Биозагрузка и фильтры

Загрузка в биофильтры (уголь + микрофлора);

Объём загрузки: ~3 × 1.5 м³ = ~4.5 м³

Замена угля: 1 раз в год

Цена угля активированного: ~120 000 тг/м³

Итого в год: $4.5 \times 120\ 000 = 540\ 000$ тг

Поддержка культуры *Pseudomonas putida*

Обновление культуры: каждые 6 месяцев (2 раза в год)

Стоимость одной инокуляции (штамм + носитель): ~300 000 тг

Итого в год: 600 000 тг

В таблице 7 указаны затраты, необходимые для поддержания элементов установки в штатном состоянии, в том числе, расходы на утилизацию

Таблица 7 - Эксплуатационные расходы

Статья	Оценка, млн тг/год
--------	--------------------

Продолжение таблицы 7

Электроэнергия	22
Химикаты и реагенты	47.5
Обслуживание оборудования	13
Персонал	22
Утилизация ила	4
ИТОГО	108.5

В таблице 8 приведены значения получаемого из биогаза метана, его тепловые характеристики, а так же экономический анализ эффекта от его эксплуатации

Таблица 8 - Расчет по теплогенерации

Показатель	Значение	Примечание
Выработка биогаза	2900 м ³ /сут	≈1 058 500 м ³ /год
Доля метана	65%	Типовое содержание в биогазе
Чистый метан	688 000 м ³ /год	65% от объема
Теплотворность метана	9.6 кВт·ч/м ³	
Итого теплоты	≈6.6 ГВт·ч/год	≈23 328 ГДж/год
Эквивалент природного газа	675 000 м ³	1 м ³ = 34.5 МДж
Стоимость газа	38 тг/м ³	Средний тариф
Экономия в год	≈25.7 млн тг	
Капвложения	~20 млн тг	Теплогенератор, монтаж
Окупаемость	~0.8 года	≈10 месяцев

В таблице 9 показаны экономические преимущества при внедрении установки на новое производство.

Таблица 9 - Экономический эффект

Источник	Экономия, млн тг/год
Снижение платы за сброс ХПК	231
Экономия от биогаза (теплогенерация)	25.7
ИТОГО	256.7

С экономической стороны проект показывает устойчивую эффективность. Общие капитальные затраты, включая строительство, оборудование и пусконаладку, составляют 781 млн тенге. При этом ежегодная экономия на плате за сброс загрязнённых стоков и за счёт использования биогаза в качестве теплоисточника достигает 256.7 млн тенге.

Текущие эксплуатационные расходы составляют порядка 108.5 млн тенге в год. Это позволяет рассчитывать на чистую экономию в размере около 148.2 млн тенге ежегодно и срок окупаемости менее 5.2 года. Расчётная рентабельность проекта — около 19% годовых.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения дипломного проекта можно сделать следующие *выводы*:

- разработана технологическая схема многоступенчатой очистки сточных вод, образующихся при производстве терефталевой кислоты;
- в соответствии с исходными данными к дипломному проекту проведены инженерные расчёты на заданный объем и состав сточных вод, рассчитаны материальные потоки;
- инновационность, заключающаяся в том, что предложено использование анаэробного реактора с псевдоожиженным слоем в сочетании с озонатором и биофильтрами на основе штамма *Pseudomonas putida*. Такая комбинация стадий повышает эффективность удаления трудноокисляемых органических соединений, характерных для ТФК-производства, и обеспечивает глубокую доочистку без необходимости применения дорогостоящих мембранных технологий;
- с целью поддержания параметров непрревынного технологического режима установки составлена функциональная схема автоматизации биоректора;
- произведена технико-экономическая оценка установки анаэробной очистки сточных вод. Уровень снижения ХПК после полного цикла очистки достиг 99.1%, что соответствует требованиям для сброса в городскую канализацию.

Как следствие вытекают следующие *преимущества* проектируемой установки:

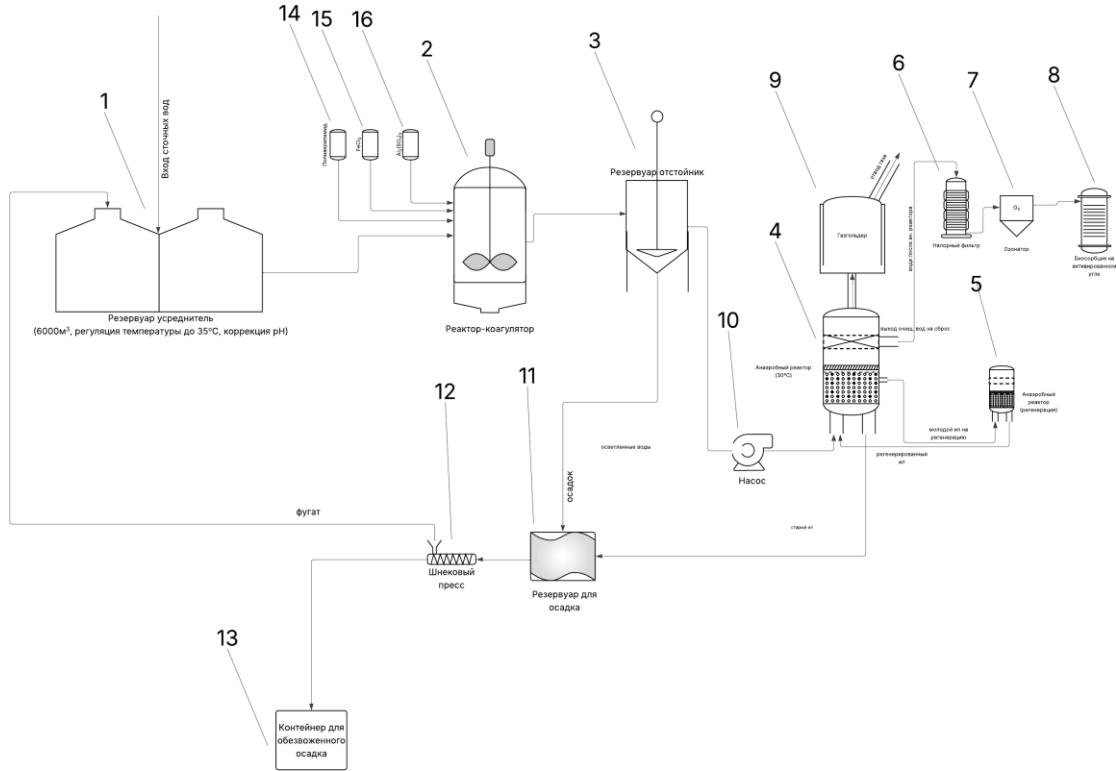
- 1) вклад в охрану окружающей среды, выражющийся в том, что проект демонстрирует экологическую целесообразность за счет значительного снижения ХПК, концентрации ПАВ и других загрязняющих веществ, что уменьшает нагрузку на городскую канализационную систему и водные объекты. Использование метанового биогаза для теплогенерации снижает выбросы парниковых газов и уменьшает потребность в ископаемом топливе.
- 2) предложенный проект имеет экономическую эффективность, расчёты показали высокую рентабельность проекта: при капитальных вложениях около 781 млн тг и годовой экономии ~148 млн тг (за счёт снижения платы за сброс и использования биогаза), срок окупаемости установки составляет примерно 5.3 года. Это подтверждает жизнеспособность внедрения подобной схемы в условиях химических предприятий РК.
- 3) технологическая гибкость и масштабируемость, что означает возможность адаптирования предлагаемой очистной системы для других типов производственных сточных вод с аналогичной органической нагрузкой. Модульность технологической схемы позволяет расширять производительность установки без кардинального изменения конструкции и без снижения эффективности очистки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягафарова Г.Г., Леонтьева С.В., Вержбицкая Ф.Г., Сафаров А.Х. Установка анаэробной очистки сточных вод производства терефталевой кислоты // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18, №9. – С. 251-253.
2. RU 2114818 C1. Способ производства терефталевой кислоты и установка для его осуществления / Дж. Кингсли, А. Роби; Патентообладатель Praxair Technology, Inc. – опубл. 10.0.1998.
3. Noyola A., Macarie H., Guyot J. Anaerobic treatment of terephthalic acid plant wastewater in a fixed-film reactor // Biotechnology Letters. – 1990. – Vol.12, No.1. – P. 21-26.
4. Поруцкий Г.В. Биохимическая очистка сточных вод органических производств. – М.: Химия, 1975. – 256 с.
5. Гараева Г.Т., Суворова И.А., Анисимова В.И. Технология получения терефталевой кислоты из пара-ксилола // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18, №10. – С. 40-45.
6. Платэ Н.А., Сливинский Е.В. Основы химии и технологии мономеров. – М.: Наука, 2002. – 696 с.
7. ТЭО ОТФК–ПЭТ (ПредОВОС): Производство очищенной терефталевой кислоты и полиэтилентерефталата (Том 2). – ТОО "Almex Petrochemical"; АО НИПИ "Каспиймунайгаз", [предварительный отчет ОВОС, г. Алматы], 2013.
8. Стахов Е. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов. – Л.: Недра, 1983. – 263 с.
9. Долина Л. Ф. Современная технология и сооружения для очистки нефтесодержащих сточных вод: монография. – Днепропетровск: Континент, 2005. – 296 с. – ISBN 966-7873-75-7.
10. Козлова С. А. Разработка технологии очистки нефтесодержащих сточных вод: бакалаврская работа. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. – 165 л.
11. Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Акулинин Е. И., Темнов М. С. Методология проектирования биотехнологических производств: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-8265-2191-5.
12. Ручай Н. С., Маркевич Р. М. Экологическая биотехнология: учебное пособие. – Минск: БГТУ, 2006. – 312 с. – ISBN 985-434-657-9.
13. Злыднев Н. Н., Еськин А. А., Ткач Н. С., Кириллов В. В. Источники нефтесодержащих сточных вод // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 36. – С. 127–136.
14. Кленкин А. А., Павленко Л. Ф., Темердашев З. А. Некоторые методические особенности определения уровня нефтяного загрязнения водных экосистем // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 2. – С. 31–35.

15. Абдрахимов Ю. Р. и др. Анализ химико-технологических водных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 6. – С. 222–260.
16. Москвичева Е. В., Быков А. А., Алексиков А. Е., Геращенко А. А. Повышение эффективности работы сооружений очистки нефтесодержащих сточных вод // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2007. – Вып. 2(3). – С. 136–142.
17. ГН 2.1.5.1315-03. Ориентировочные допустимые уровни (ОДУ) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М.: ФГУН ЦГиЭ Роспотребнадзора, 2003.
18. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 208 с.
19. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.
20. Вершинин В. И., Перцев Н. В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента. – СПб.: Лань, 2019. – 236 с.
21. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
22. Волова Т. Г. Экологическая биотехнология. – Новосибирск: Сиб. хронограф, 1997. – 144 с.
23. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2002. – 703 с.
24. Хенце М., Хараремо Х., Ла-Кур-Егсен Дж. и др. Очистка сточных вод. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
25. Сметанин В. И. Защита окружающей среды от отходов производства и потребления. – М.: КолосС, 2000. – 230 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Технологическая схема очистной установки:

- 1 – резервуар усреднитель, 2 – реактор-коагулятор, 3 – резервуар-отстойник,
- 4 – анаэробный реактор, 5 – анаэробный реактор (регенерация), 6 – напорный фильтр,
- 7 – озонатор, 8 – биосорбционная колонна, 9 – газгольдер, 10 – насос,
- 11 – резервуар для осадка, 12 – шнековый пресс, 13 – контейнер для обезвоженного осадка,
- 14 – резервуар с полиакриламидом,
- 15 – резервуар FeCl_3 , 16 – резервуар с $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

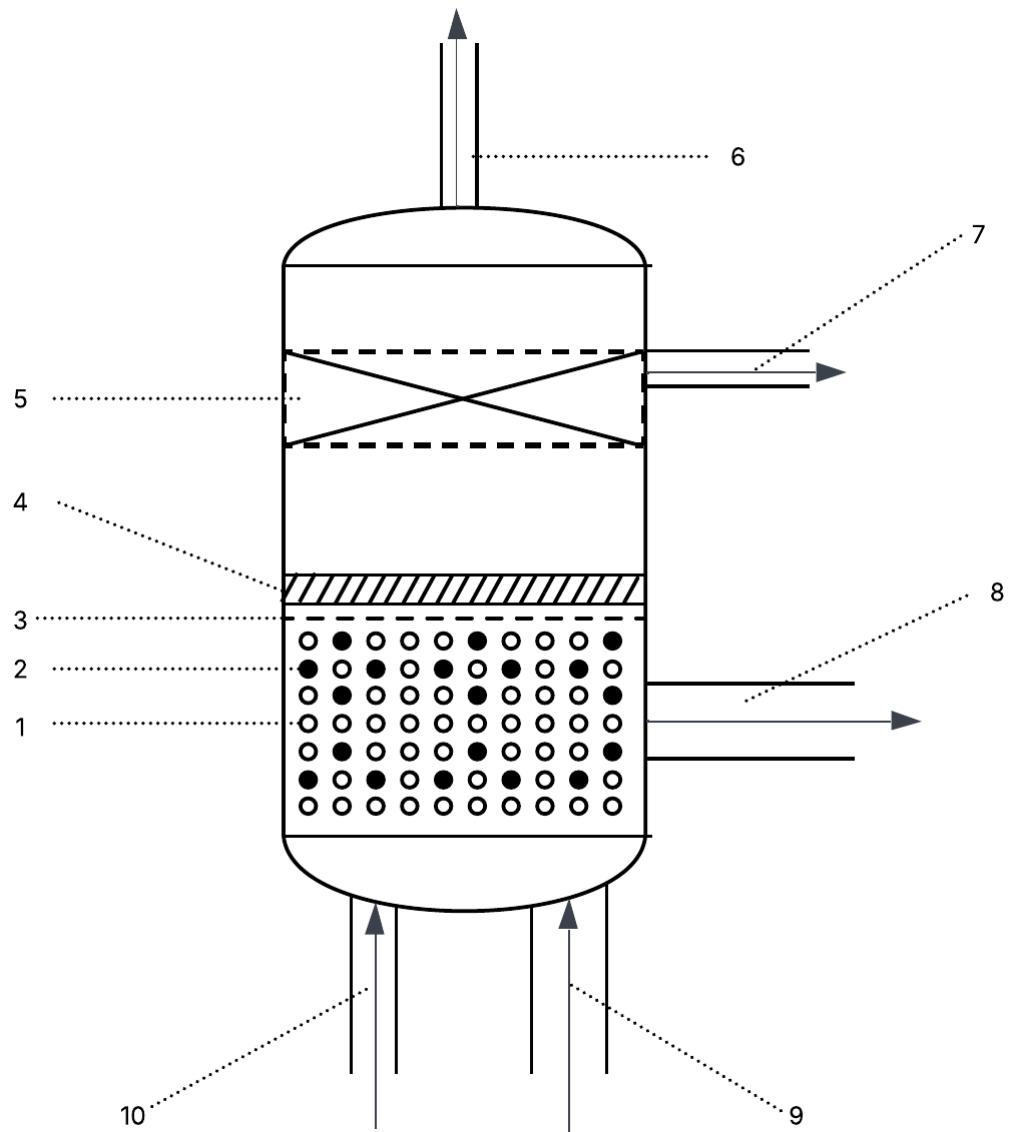
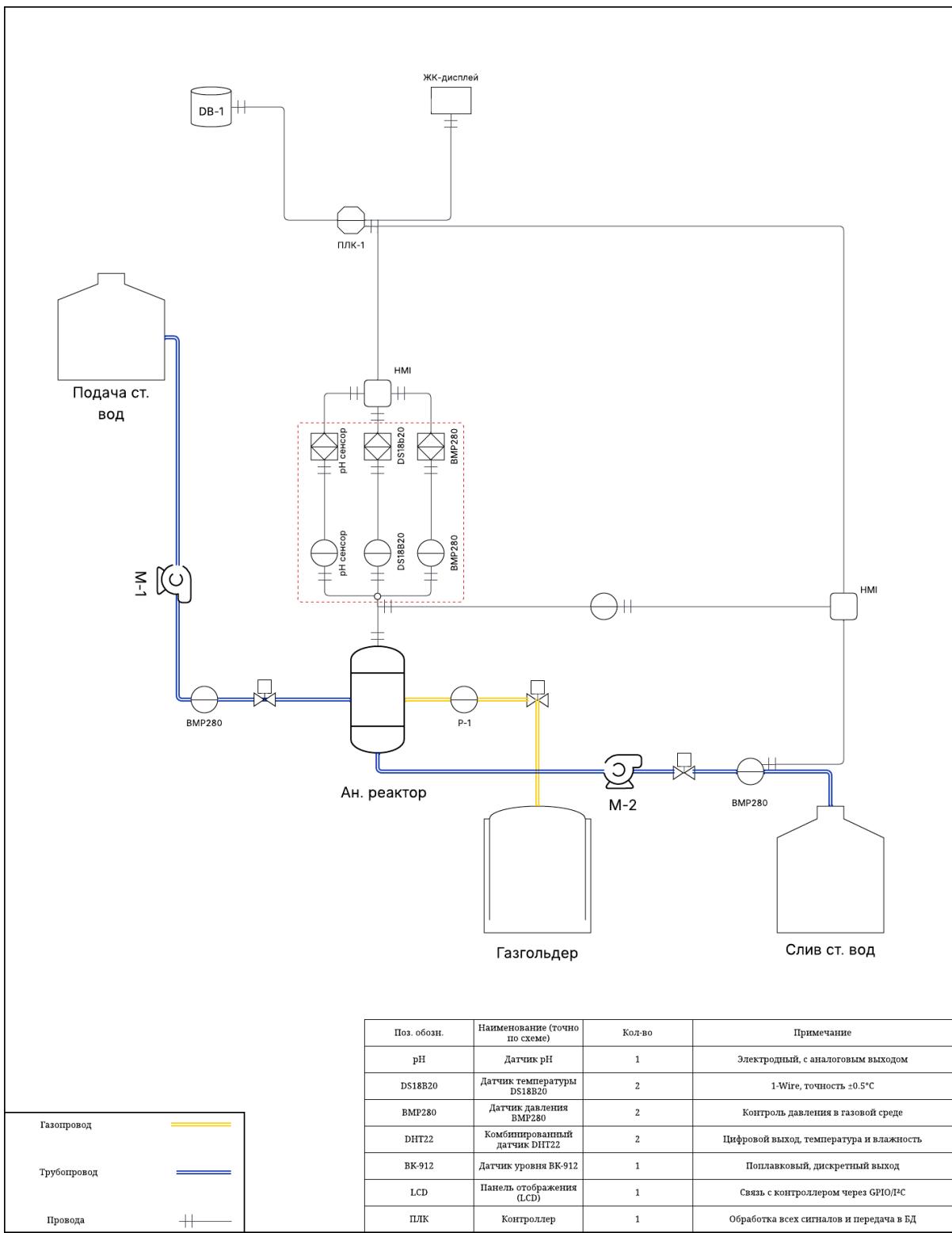


Схема анаэробного реактора:

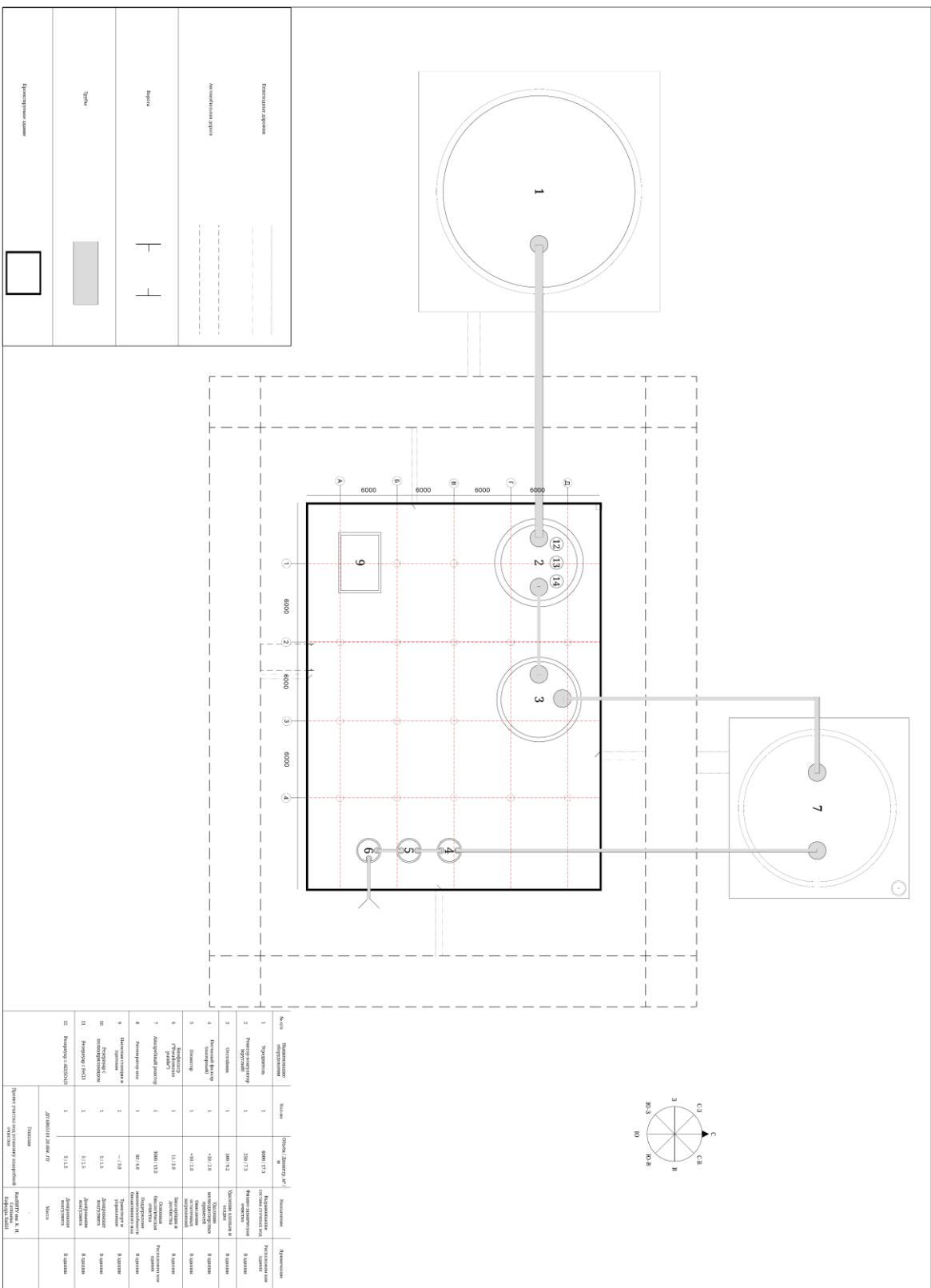
- 1 - гранулы активного ила, 2 - инертные носители, 3 - граница псевдоожженного слоя, 4 - флотационный барьер, 5 - газосепаратор,
- 6 - выход газа, 7 - выход очищенной воды, 8 - отвод “старого” ила,
- 9 - введение регенерированного ила, 10 - поступление осветленной воды

ПРИЛОЖЕНИЕ В



Функциональная схема автоматизации биореактора

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект

(наименование вида работы)

Иванова Романа Владимировича

(Ф.И.О. обучающегося)

6B05101 Химическая и биохимическая инженерия

(шифр и наименование ОП)

На тему: Проект установки анаэробной очистки сточных вод производства терефталевой кислоты

Выполнено:

- а) графическая часть на 4 листах
- б) пояснительная записка на 38 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Представленную выпускную работу, посвященную разработке технологии анаэробной биологической очистки производственных сточных вод, следует рассматривать в контексте реализации перспективного проекта KMG PetroChem совместно с китайской компанией Sinopec по выпуску терефталевой кислоты (ТФК) в Атырауской области на основе параксилола, поставляемого Атырауским НПЗ. Сложность такой очистки составляет содержание трудноокисляемых ароматических соединений в сточных водах производства ТФК. С учетом этого в работе предложено использовать специализированный штамм микроорганизмов (*Bacillus subtilis* ВКМ В-1742Д) в сочетании с активным илом, что ранее не применялось в практике очистки сточных вод ТФК-производства. Повышение эффективности очистки достигнуто за счёт применения анаэробного биореактора с псевдоожиженным слоем носителя. Кроме того, выработка биогаза в анаэробном реакторе может частично компенсировать энергопотребление предприятия. Выполненное технико-экономическое обоснование подтверждает возможность внедрения анаэробной стадии очистки с точки зрения экологии и экономики.

Пояснительная записка содержит все необходимые для дипломного проекта разделы, выполнена грамотно, аккуратно, оформлена в соответствии с требованиями к выпускным работам бакалавриата.

Оценка работы

С учетом вышесказанного считаю, что дипломный проект Иванова Романа заслуживает высокой оценки при условии успешного выступления на процедуре защиты.

Рецензент

КазНУ им.Аль-Фараби, доктор PhD, профессор
Акимбеков Нурадын Шардарбекұлы

« 3 » июня 2025 г.

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на дипломный проект
(наименование вида работы)

Иванова Романа Владимировича
(Ф.И.О. обучающегося)

6B05101 Химическая и биохимическая инженерия
(шифр и наименование ОП)

Тема: Проект установки анаэробной очистки сточных вод производства терефталевой кислоты

Дипломный проект Иванова Романа посвящен теме очистки сточных вод производства нефтехимического профиля, которое находится на стадии реализации в рамках углубления нефтепереработки и расширения линейки производимых продуктов из углеводородного сырья. Местоположение производственного объекта в непосредственной близости от жилых районов придает важность и ответственность проблеме очистки сточных вод с точки зрения концепции устойчивого развития и уменьшения углеродного следа.

В процессе работы над дипломным проектом было видно, что предложенная тема студента заинтересовала, проделана большая работа по литературному обзору, систематизации и анализу собранных данных. Относительно работы студента по инженерным расчетам и графической части следует отметить самостоятельность, критический подход и добросовестность к замечаниям, своевременное выполнение разделов пояснительной записки. При устном общении грамотно излагает материал, скромен, честен, совестлив, не стесняется задавать вопросы и спрашивать непонятные моменты, независимый.

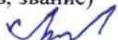
Учитывая объем проделанной работы, отношение к выполнению заданий и полученные результаты, считаю, что дипломный проект соответствует всем предъявляемым требованиям, и Иванов Роман Владимирович заслуживает присвоения степени бакалавра по образовательной программе 6B05101 Химическая и биохимическая инженерия.

Научный руководитель

PhD, ассоц.профессор

(должность, уч. степень, звание)

Наурызова С.З.



(подпись)

«2» июня 2025 г.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Установка анаэробной очистки сточных вод производства терефталевой кислоты

Автор Научный руководитель / Эксперт

Иванов РоманСаяле Наурызова

Подразделение

ИГиНГД

Объем найденных подобий

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1



КП2



КЦ

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2

9197

Количество слов

73092

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		66
Интервалы		0
Микропробелы		16
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		3

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

		Цвет текста
--	--	-------------

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://cyberleninka.ru/article/n/ustanovka-anaerobnoy-ochistki-stochnyh-vod-proizvodstva-tereftalevoy-kisloty	12 0.13 %
2	https://cyberleninka.ru/article/n/ustanovka-anaerobnoy-ochistki-stochnyh-vod-proizvodstva-tereftalevoy-kisloty	11 0.12 %

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из домашней базы данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из программы обмена базами данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://cyberleninka.ru/article/n/ustanovka-anaerobnoy-ochistki-stochnyh-vod-proizvodstva-tereftalevoy-kislotoy	23 (2) 0.25 %

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---