

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 технологического процесса мембранного компостирования ТКО

Студент

В.С. Семилуцкая

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.А. Мельникова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Аннотация

Тема работы: Оптимизация технологического процесса мембранного компостирования ТКО.

Целью данной работы является снижение антропогенного воздействия на окружающую среду путем оптимизации существующей технологии мембранного компостирования ТКО.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: изучить виды ТКО, поступающие на мембранное компостирование, проанализировать основные этапы технологического процесса мембранного компостирования ТКО и рассмотреть особенности технологии. После чего предложить техническое решение оптимизации мембранного компостирования твердых коммунальных отходов, произвести расчеты материального баланса и оценку эффективности данного процесса.

Бакалаврская работа состоит из трех разделов. В первом разделе представлены литературный обзор, на основе данных технической литературы и учебников, обоснование темы исследования, также рассмотрены патенты.

Второй раздел представлен описанием технологического процесса мембранного компостирования ТКО, предложено оборудование оптимизации данного процесса.

В третьем разделе представлен расчет материального баланса и оценки эффективности предлагаемого технологического решения, проанализированы преимущества технологии мембранного компостирования ТКО, произведена оценка эффективности усовершенствованного технологического процесса.

Структура и объем работы: данная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка используемой литературы из 32 источников. Общий объем работы 62 страницы, в том числе таблиц - 31, рисунков - 8.

## **Abstract**

The title of the graduation work is «Optimization of the technological process of membrane composting of municipal solid waste».

The graduation work consists of an explanatory note on 62 pages, introduction, three parts, including 8 illustrations, 31 tables, the list of 32 references including 5 foreign sources.

Much attention is given to improving the existing technology of membrane composting of solid municipal waste, by changing the waste sorting process, to obtain a quality product-compost.

The graduation work project describes in detail the main stages and features of the technological process of membrane composting of solid municipal waste. Next we consider the choice of equipment for optimizing the technological process and present calculations of the material balance and evaluation of the effectiveness of this process.

The issue of insufficient sorting of municipal solid waste for membrane composting are highlighted in the project's general part.

The special part of the project gives details about the ways how to solve the problem of insufficient sorting of municipal solid waste and offers an improved technological solution - the introduction of separators for metal and glass in the technological process.

At the end of the work a calculation of the material balance and an assessment of the efficiency of the improved technological process are provided.

## Содержание

Перечень сокращений и обозначений.....	5
Введение .....	6
1 Литературный обзор. Обоснование темы исследования .....	8
2 Оптимизация технологического процесса мембранного компостирования ТКО .....	13
2.1 Описание технологического процесса мембранного компостирования ТКО. Выявление недостатков .....	13
2.2 Определение путей совершенствования предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО. Описание предлагаемого технологического процесса .....	33
2.3 Выбор основного оборудования для оптимизации технологического процесса мембранного компостирования ТКО .....	37
3 Расчетная часть.....	41
3.1 Расчет материального баланса предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО .....	41
3.2 Анализ преимуществ предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО и оценка эффективности .....	48
Заключение .....	60
Список используемой литературы и используемых источников .....	61

## Перечень сокращений и обозначений

ТКО – твердые коммунальные отходы (ранее использовался термин ТБО – твердые бытовые отходы)

ГОСТ - государственный стандарт

ОМПП – органо-минеральный почвогрунт

СанПиН - санитарно-эпидемиологические правила и нормы

АСП (Aerated Static Pile (ASP) – аэрированный статистический бурт

ФККО – федеральный классификационный каталог отходов

## Введение

В связи с растущим уровнем потребления существенно возросло и образование отходов. Вопросы утилизации ТКО выходят на первое место в деятельности предприятий жилищно-коммунального хозяйства. В России 15 регионов не направляют твердые коммунальные отходы на обработку, лишь малая их доля подлежит утилизации (статистика Росприроднадзора по отходам за 2020 г.). В Самарской области производится до 1,2 миллиона тонн в год. Курирует данную отрасль региональный оператор Самарской области ООО «ЭкоСтройРесурс» [15,16].

По экологическим, экономическим и ресурсным аспектам внедрение безопасных для окружающей среды способов утилизации отходов, на сегодняшний день, является приоритетным по сравнению с полигонным захоронением или сжиганием. К такому способу относится экологически безопасная и эффективная технология – мембранное компостирование ТКО.

В то же время еще одной актуальной проблемой является – деградация почв и истощение их естественного плодородия. В этом случае целесообразно использовать компост, изготовленный из пищевых и сельскохозяйственных отходов, который имеет все необходимые компоненты для функционирования микробиоты, а также подходящую физическую структуру.

Технологический процесс компостирования ТКО направлен на полную утилизацию органических отходов, а также на получение качественного продукта – компоста по ускоренной технологии за относительно короткое время. После прохождения цикла мембранного компостирования, полученный продукт можно использовать в качестве органического удобрения для рекультивации почв, в том числе для почвы, загрязненной тяжелыми металлами и продуктами нефтепереработки. Компост используется в технологии полигонного захоронения ТКО (в качестве покрывающего материала), в качестве заполнителя для покрытия заболоченных земель и в качестве подготовленного топлива для производства энергии.

Производимый из ТКО компост не соответствует товарному качеству ввиду недостаточной подготовки сырья, поступающего на компостирование, при том, что применение технологии ускоренного компостирования позволяет увеличить использование ресурсного потенциала ТКО до 40 - 50 % и снизить количество захораниваемых отходов.

Цель бакалаврской работы – снижение антропогенного воздействия на окружающую среду путем оптимизации существующей технологии мембранного компостирования ТКО. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить виды отходов, поступающие на мембранное компостирование;
- проанализировать основные этапы технологического процесса мембранного компостирования ТКО и особенности данной технологии;
- выявить недостатки технологии компостирования;
- предложить техническое решение оптимизации мембранного компостирования твердых коммунальных отходов, произвести расчеты материального баланса и оценки эффективности данного процесса.

## 1 Литературный обзор. Обоснование темы исследования

Утилизация органических отходов является важнейшей задачей в деятельности предприятий жилищно-коммунального хозяйства во всем мире. В настоящее время одним из самых экономичных и эффективных способов переработки отходов ТКО является – мембранное компостирование с получением органо – минерального почвогрунта (ОМПГ).

В научной статье «Совершенствование технологии компостирования органических отходов» В.В. Миронова, В.И. Стяжкина и А.А. Седых описаны теоретические основы процесса компостирования, представлены исследования микробиологических процессов, происходящих при компостировании, описаны существующие проблемы процесса, такие как малая пропускная способность площадки компостирования и низкое качество компоста, а также представлено следующее альтернативное решение: «Предложен новый метод усовершенствования технологического процесса – внедрение АСП – компостирования, сочетающего преимущества как площадочного, так и камерного способов компостирования и обеспечивающего независимость от атмосферных осадков, высокие объемы переработки, улучшение качества компоста и значительное снижение выбросов загрязняющих атмосферу компонентов: микроорганизмы, меркаптаны, амины, аммиак, сероводород, пыль» [13].

В статье В.В. Миронова «Влияние режимов подготовки на агрохимический состав компоста» рассмотрены особенности компостирования органических материалов при использовании традиционного способа и ферментирующих добавок. Представлены показатели качества компостов, полученных с использованием препарата в качестве ферментирующей добавки. Проведено сравнение полученных образцов компостов по следующим показателям качества: влажность, кислотность, содержание органического вещества в пересчете на сухую массу, количество общего и аммонийного азота.



Патент «Способ переработки органических отходов с получением комплексного биоорганического удобрения и активатора компостирования одновременно» Р.М Хайруллина и В.В. Кинз посвящен способу переработки биогенных органических отходов методом компостирования, в результате которого из отходов получают биоорганическое удобрение – компост с сохраненной мезофильной микрофлорой и микробиологический активатор (биоактиватор) компостирования для органических отходов. Авторы описывают суть данного метода компостирования следующим образом: «Способ заключается в разделении процессов во времени: микробиологическое удобрение вносят в биогенные органические отходы не до начала компостирования, а в компостирующуюся массу в завершении термофильной стадии, при достижении ею температуры, оптимальной для роста микроорганизмов, входящих в состав микробиологического удобрения, но более высокой, чем начальная температура отходов. При этом соблюдение требования по такому критическому показателю, как влажность компостируемой массы, обеспечивается всегда «автоматически», так как сам процесс компостирования всегда требует такой влажности, при котором бы происходило активное размножение микроорганизмов» [27].

Патент «Линия ускоренного компостирования твердых органических отходов (варианты)» Г.М. Мхитаряна, А.Г. Пузанкова А.Ю. Семенцова относится к области переработки органической части твердых коммунальных отходов и рассматривается для использования в коммунальном хозяйстве для переработки отходов ТКО, а также в сельскохозяйственном производстве для экспресс-компостирования отходов животноводства и птицеводства. В данном патенте идет описание линии компостирования и ее использование в составе мусороперерабатывающих заводов, а также на животноводческих комплексах, птицефабриках и городских станциях аэрации для производства из органической части ТКО экологически чистых органических удобрений в условиях крупномасштабного производства. Включено проектирование и технологические схемы линии ускоренного компостирования ТКО [14].

В патенте А.А. Волковинского «Способ переработки твердых коммунальных отходов» подробно описан метод компостирования и такие процессы, как: разгрузка твердых коммунальных отходов, отбор крупногабаритных фракций и измельчение последних, подачу на сортировку отходов на перерабатываемые в компост и вторичное сырье, первичное и вторичное грохочение, биотермическое компостирование, выделение из компоста фракций, содержащих вредные вещества, магнитную сепарацию черного и цветного металла, созревание компоста и складирование. Выявлен недостаток способа переработки ТКО: применение для сепарации черного металла, дорогостоящих и трудоемких в обслуживании электромагнитов, отсутствие многоступенчатости селекции черного металла. Предложено решение более совершенного способа механизированной переработки – при сепарации для черного металла используются постоянные магниты на феррито-бариевых сплавах [2].

В научной статье А.В. Луканина «Комплексное компостирование коммунальных отходов городского хозяйства» подробно описана технология, позволяющая использовать ТКО и получать полноценный компост, который можно использовать как органическое удобрение, либо как основной компонент при приготовлении искусственных почв. Представлены оптимальные соотношения вводимых ингредиентов с целью получения компоста заданного состава из расчета на сухое вещество. Предложены основные конструктивные решения установки на основе данных теплообменного расчета и материального баланса процесса, также проведен гидравлический расчет установки [12].

В научной статье «Состав твердых бытовых отходов и их использование в качестве удобрения» Мухаммад Халид Икбал рассматривается метод компостирования твердых коммунальных отходов как один из эффективных методов утилизации. Описаны достоинства и недостатки метода, так же рассмотрен механизм процесса компостирования и условия проведения. Представлены результаты по исследованию химического состава компоста из

отходов ТКО [32].

В научной статье «Компостирование Твердых Бытовых Отходов: Физическая Переработка» Том Л. Ричард рассматривается проблема недостаточной подготовки ТКО к компостированию. В статье говорится о следующем: «ТКО содержат материалы, которые сильно различаются по размеру, влажности и содержанию питательных веществ, а органические фракции могут быть смешаны с различной степенью некомпостируемых отходов и, возможно, опасных компонентов. Производство товарного компоста из этого материала требует целого ряда физических технологий обработки в дополнение к биологическому управлению процессом» [31].

В статье предложено решение по улучшению сортировки ТКО – централизованное разделение компостируемого материала.

Обоснование темы: Анализ современных способов и технических средств ускоренного компостирования позволяет сделать вывод о том, что на данный момент интерес представляет АСП-компостирование, сочетающее преимущества площадочного способа компостирования, а именно: большие объемы переработки и сравнительно низкие эксплуатационные затраты, и камерного способа: независимость от атмосферных осадков, высокое качество компоста, значительное снижение выбросов загрязняющих атмосферу компонентов.

Технология с использованием мембранного покрытия позволяет контролировать условия разложения на комплексном предприятии. При этом данная технология экономически более эффективна в сравнении с технологией, требующей возведения закрытых сооружений, а при ее реализации отсутствуют выбросы вредных веществ и запахи [20].

В зависимости от исходного сырья и проведения соответствующих исследований готового продукта по физикомеханическим, агрохимическим, токсикологическим, ветеринарно-санитарным и гигиеническим показателям, полученный компост соответствует продуктам:

- «удобрения органические по ГОСТ 55571-2013 «Удобрения

органические на основе твердых бытовых отходов» при условии соблюдения входящего сырья по качеству» [3];

– ОМППГ по ТУ 20.15.80-002-70412224-2017 Органо-минеральный почвогрунт (ОМППГ).

Использование твердых коммунальных отходов в качестве сырья для компостирования не только позволяет исключить выбросы и сбросы загрязняющих веществ в окружающую среду, что гарантирует экологически благоприятную ситуацию для населения, но и обеспечивает поддержание замкнутых природных циклов круговорота органических веществ путем возврата их в почву в виде компостов.

Органо-минеральный почвогрунт применяется в дорожном и ландшафтном строительстве, в технологии полигонного захоронения ТКО (в качестве покрывающего материала), так же как заполнитель для покрытия заболоченных земель и благоустройства территории.

Таким образом, оптимизация процесса мембранного компостирования ТКО представляет научный и практический интерес.

Основной проблемой компостирования является недостаточная подготовка отходов перед ферментацией.

Полученный компост загрязнен черными металлами, включениями стекла и не соответствует требованиям к показателям компоста (почвогрунта ОМППГ) в соответствии с ГОСТ Р 55571-2013.

Выводы к разделу:

В данном разделе проведен анализ использованной литературы на основе опыта ученых, также в представленном литературном обзоре приведена теоретическая база исследования, выявлены недостатки технологии мембранного компостирования, обозначена актуальность и обоснование темы работы.

## **2 Оптимизация технологического процесса мембранного компостирования ТКО**

Технологический процесс мембранного компостирования органических и производственных отходов, в том числе отходов ТКО после сортировки разработан с целью полной утилизации органических отходов по ускоренной технологии за относительно короткое время. Конечным результатом данной технологии является компост. В зависимости от исходного сырья можно получить органическое удобрение или органо – минеральный почвогрунт.

Рассматриваемая технология является экологически безопасной и снижает нагрузку на окружающую среду, при этом она эффективна и экономически выгодна.

### **2.1 Описание технологического процесса мембранного компостирования ТКО**

Компостирование – биологическое разложение и стабилизация органических материалов. При нормальных условиях мембранное компостирование представляет собой аэробный процесс – биотермическое разложение органических материалов в результате жизнедеятельности сапрофитных аэробных микроорганизмов. При протекании биохимических реакций обмена веществ аэробных микроорганизмов образуются побочные продукты их жизнедеятельности, состоящие в основном из углекислого газа, воды и тепла.

Для роста и размножения аэробных микроорганизмов, помимо кислорода и воды, необходимы источники углерода, азота, фосфора, калия и определенных микроэлементов. Эти потребности, как правило, удовлетворяются веществами, содержащимися в отходах [6,7].

В органических отходах обычно существует своя эндогенная смешанная микрофлора, которая необходима для протекания биотермического процесса. Для того, чтобы обеспечить активизацию ее жизнедеятельности, нужно

учитывать следующие параметры:

- увеличение удельной поверхности при измельчении;
- аэрация компостируемой массы в объемах 0,2-0,8 м<sup>3</sup> на 1 кг;
- вид перерабатываемого материала;
- перемешивание материала;
- поддержание влажности массы не ниже 45 и не выше 60 %;
- теплоизоляция, которая способствует сохранению выделяющегося

тепла и подъему температуры компостируемого материала [1].

Технологический процесс мембранного компостирования обеспечивает оптимальные параметры и условия для протекания процесса биоразложения органических отходов, такие как: влажность, кислотность, отношение углерода к азоту, дисперсность частиц, аэрация и температура [26].

Технологический процесс мембранного компостирования органических отходов, в том числе после сортировки производственных отходов и отходов ТКО проводится в несколько этапов, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Описание основных этапов технологического процесса мембранного компостирования

Этапы	Описание
Подготовительный этап	<p>Возводится площадка для мембранного компостирования, которая представляет собой сооружение прямоугольной формы с герметичным, перфорированным бетонным полом, в который встроены аэрируемые каналы и вентилирующие установки. В каждом бурте проложено по два аэрируемых канала.</p> <p>В случае избыточной влажности бурта площадку оснащают бетонными каналами и подземными емкостями для отвода процессной воды (фильтрата). Линия отвода предотвращает выход газов к резервуарам накопления фильтрата. При недостаточной влажности, устанавливаются емкости для орошения бурта.</p> <p>Накопленный фильтрат вывозится илососными машинами на станцию очистки коммунальных сточных вод или трубопроводом в центральную канализационную сеть.</p> <p>Для того, чтобы осуществить и проконтролировать оптимальные условия для компостируемого материала в тело бурта вставляются датчики температуры и давления.</p>

Продолжение таблицы 2

Этапы	Описание
Прием органической фракции ТКО	Отходы ТКО поступают на сортировочную станцию, после чего попадают на грохот, где механическим методом разделяются на крупную и мелкую (отсев) фракции. Отсев ТКО разгружают на бетонное основание площадки мембранного компостирования.
Этап №1	<p>На первом этапе, автопогрузчиком формируются бурты. Загрузка органической фракции в борт осуществляется ежедневно, что способствует постоянному перемешиванию компостируемой массы. Затем борт накрывается мембранным покрытием при помощи намоточного механизма. Для того, чтобы исключить развеивание сырья, накопление до рабочего объема в одном бурте происходит уже под мембраной.</p> <p>Вентиляция компостируемой массы воздухом под давлением и обезвоживание буртов осуществляется через бетонные каналы в перфорированном полу, в течение четырех недель.</p> <p>На данном этапе наступает активная фаза компостирования (термофильная). Компостируемая масса нагревается, увеличивается температура под мембранным покрытием, за счет выделения тепла аэробными микроорганизмами в процессах жизнедеятельности.</p>
Этап №1	<p>Компостируемая масса нагревается, увеличивается температура под мембранным покрытием, за счет выделения тепла аэробными микроорганизмами в процессах жизнедеятельности.</p> <p>При микробиологическом ферментировании происходит обеззараживание, обезвреживание и детоксикация компостируемого материала.</p>
Этап №2	<p>На втором этапе происходит перемещение и загрузка компостируемого материала из двух буртов в один, так как после первой фазы объем и масса, поступивших отходов ТКО, значительно уменьшаются. Предварительно компост охлаждается при помощи интенсивной аэрации воздухом, чтобы уменьшить образование пара во время перемещения компостируемой массы.</p> <p>После чего в бурте, под мембранным покрытием, продолжается процесс вызревания «нестабильного» компоста, в течение двух недель. К завершению этого этапа из тела бурта убираются температурные датчики, и при помощи намоточного механизма открывается мембранное покрытие.</p>
Этап №3	На этом этапе мембранное покрытие отсутствует, в течение двух недель протекает процесс дозревания компостируемой массы с отверждением органического вещества. После образования «стабильного компоста» его перемещают в кавальеры, где он может накапливаться сроком до шести месяцев.

## Продолжение таблицы 2

Этапы	Описание
Этап №4	На четвертом этапе полученный «стабильный», «зрелый» компост снова просеивается через грохот, чтобы отделить оставшиеся балластные включения, такие как: пленка, пластик, мелкий щебень и камни, обломки стекла. После чего отсев отправляется на полигон ТКО для захоронения или обезвреживания, а готовый продукт, после процесса мембранного компостирования, – почвогрунт или удобрение отправляются на площадку хранения – кавальеры, где могут храниться до шести месяцев.

Применяемый процесс мембранного компостирования представлен на рисунке 2.

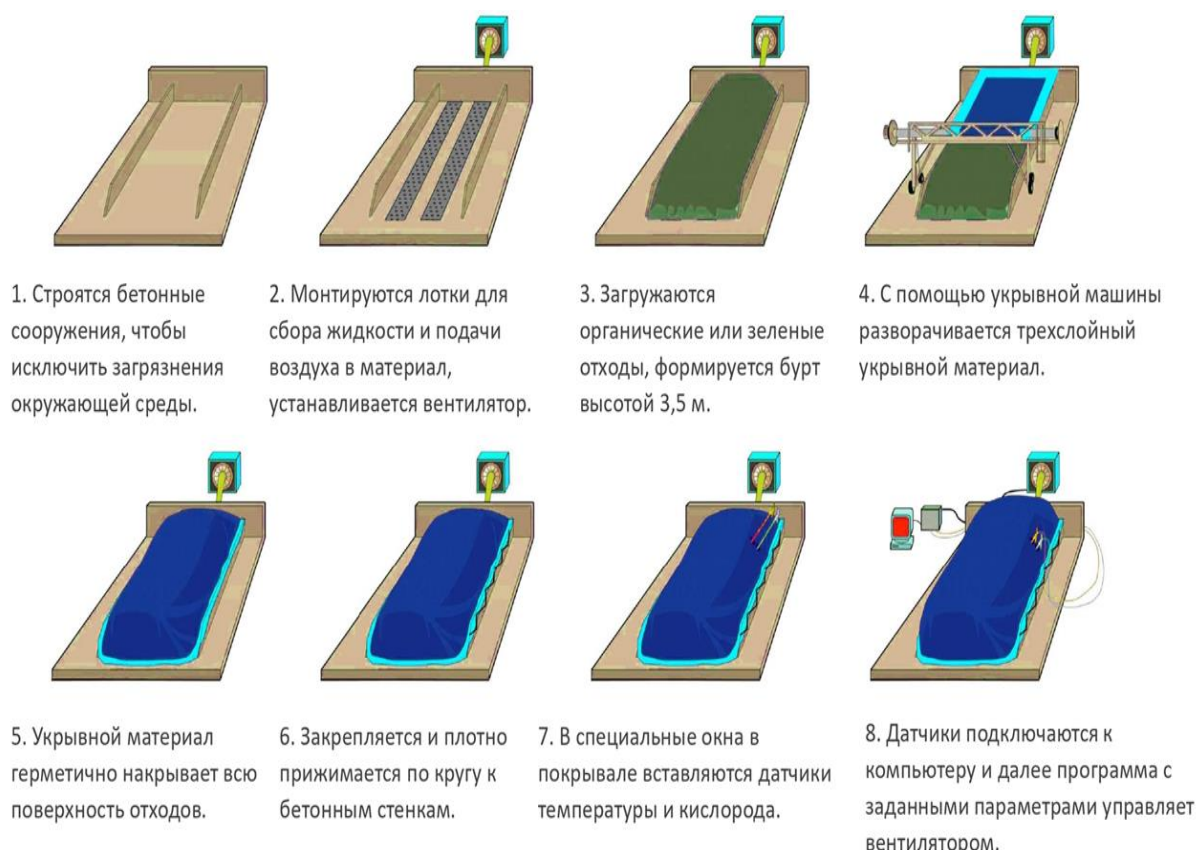


Рисунок 2 – Применяемый процесс мембранного компостирования

Технология мембранного компостирования сочетает в себе преимущества систем открытого и закрытого компостирования. Технология



аналогична компостированию в открытом бурте, но использование мембранного покрытия позволяет контролировать условия разложения как на комплексном предприятии.

Ежедневно на линию сортировки поступает 850 тонн отходов ТКО. После чего из отходов отбирается вторичное сырье и хвосты ТКО [17]. Фракции отходов, поступающие на компостирование: 1 хвост ТКО (пищевые отходы, песок и грунт, бумага, древесно–растительные отходы), органические отходы (пищевые остатки, древесина, навоз, отходы городского озеленения, вещества, полученные в процессе биологической очистки сточных вод).

Отходы сепарации после сортировки ТКО <70 мм представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Отходы поступающие на мембранное компостирование

Отходы сепарации после сортировки ТКО <70 мм	Содержание, %
Пищевые отходы	40,9
Песок, грунт	37,50
Бумага, картон	0,67
Древесно-растительные отходы	7,49

Массовый баланс отходов, поступающих на мембранное компостирование представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Массовый баланс отходов

Фракции	Количество отходов		Плотность, т/м <sup>3</sup>	Средняя доля от общего тоннажа входящего ТКО, %	Средняя доля от общего тоннажа входящего ТКО, т/ч
	тонн	куб.м			
Хвосты ТКО	567,72	5961,01		66,79	29,39
Хвосты >70 мм (сырье для RDF), в том числе:	338,73	2605,54	0,13	39,85	17,53

Продолжение таблицы 4

Фракции	Количество отходов		Плотность, т/м <sup>3</sup>	Средняя доля от общего тоннажа входящего ТКО, %	Средняя доля от общего тоннажа входящего ТКО, т/ч
	тонн	куб.м			
Биоген	152,15	434,71	0,35	17,90	7,88
Небиоген	186,57	1243,8	0,15	21,95	9,66
Хвосты <70 мм (сырье для компостирования), в том числе:	228,99	457,98	0,50	26,94	11,85
Биоген	80,75	230,71	0,35	9,50	4,18
Небиоген	148,24	988,27	0,15	17,44	7,67
Итого:	567,72	5961,01		100,00	29,39

На начальном этапе процесса компостирования отходы ТКО помещаются в бурт и накрываются специальным покрытием. После чего в бурте начинают протекать биохимические процессы, характеризующиеся фазами. В таблице 5 представлены фазы процесса мембранного компостирования и характеристика данных фаз.

Таблица 5 – Фазы мембранного компостирования

Фазы	Название	Описание
1	Активная фаза компостирования (термофильная)	<p>В первой фазе загруженный бурт выдерживается при активной аэрации и увлажнении 28 суток, температура в бурте поднимается до 60°C (max - 85°C). Масса отходов по сухому веществу сокращается примерно на 20 – 30 % (объем условно «чистых» (зелёных) отходов уменьшается ориентировочно в 2 раза, отсев ТКО на 20 - 40%.</p> <p>Поступающие на компостирование органические материалы имеют влажность 40-60%.</p> <p>Для процесса мембранного компостирования оптимальным условием является – влажность 40 - 45%, при влажности менее 30% - активность аэробных микроорганизмов подавляется, а при влажности более 65% - останавливается диффузия воздуха, начинают протекать нежелательные анаэробные процессы.</p>

Продолжение таблицы 5

Фазы	Название	Описание
		<p>Для процесса мембранного компостирования оптимальным условием является – влажность 40 - 45%, так как при влажности менее 30% - активность аэробных микроорганизмов подавляется, а при влажности более 65% - останавливается диффузия воздуха, начинают протекать нежелательные анаэробные процессы, гниение.</p> <p>Биогенная часть отходов ТКО потребляется аэробными микроорганизмами в качестве источника питания и увеличения биомассы, в это время протекают процессы окисления органических соединений до углекислого газа и воды - в виде пара. При этом соединения азота из аммиачной формы переходят в белковую, в следствии чего устраняется неприятный запах.</p>
2	Фаза «нестабильного» компоста	<p>Длительность – 14 суток. Потеря веса от 10 - 15% по массе. Температура от 60°C (max – 85°C).</p> <p>В этой фазе происходит вызревание компостируемой массы под мембранным покрытием, за счет протекания биохимических процессов аэробных микроорганизмов. На данном этапе компостируемый материал переходит в продукт – «нестабильный» компост. Компостируемый материал полностью обеззараживается и обезвреживается.</p>
3	Фаза «стабильного» / «зрелого» компоста	<p>Длительность – до 15 суток. Потеря веса 10-15% по массе. Температура от 35 – 37°C с уменьшением до окружающей среды. Фаза протекает после снятия мембраны.</p> <p>В этой фазе протекает процесс дозревания компостируемой массы – процесс, который завершает трансформацию органического вещества, как итог – образование «стабильного» компоста. Фаза проходит без мембраны, запах практически отсутствует.</p>
4	Фаза просеивания и хранения	<p>В этой фазе производится отделение балластных примесей механическим методом. При просеивании на сите с ячейкой 25 мм получают 80% готового компоста. При вторичном просеивании на сите с ячейкой 12 мм получают 50% от начального объема готового компоста.</p> <p>Влажность готового продукта составляет около 35 – 40%.</p>

В начале процесса мембранного компостирования отходы находятся при температуре окружающей среды, рН в них слабокислое. В начальной мезофильной стадии микроорганизмы, присутствующие в отходах, начинают

быстро размножаться, за счет этого поднимается температура, а среда подкисляется за счет образования органических кислот.

«При температуре выше 60°C начинают гибнуть исходные мезофилы и преобладать термофилы. При такой температуре грибы становятся неактивными» [5, 10].

«После 60°C в основном работают спорообразующие бактерии и актиномицеты, рН среды становится щелочной за счет выделения аммиака при распаде белков. В течение термофильной фазы наиболее легко разлагаемыми субстратами являются - сахара, жиры, белки, а скорость реакции начинает падать после того, как в нее вовлекаются более устойчивые субстраты. После чего компост вступает в стадию остывания» [4].

Данный процесс представлен на рисунке 3.

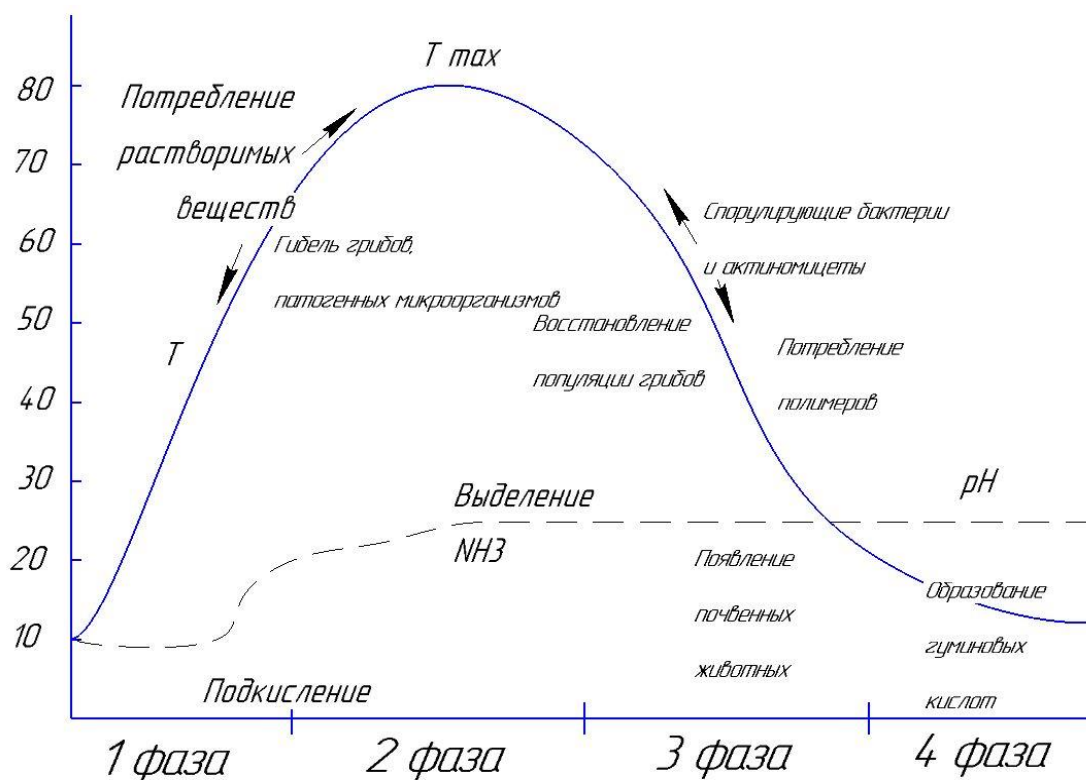


Рисунок 3 – Фазы компостирования

При компостировании органических отходов происходит биотермическое разложение органического вещества в результате

жизнедеятельности сапрофитных аэробных микроорганизмов, способных выделять при биохимических реакциях обмена веществ некоторое количество тепла [28].

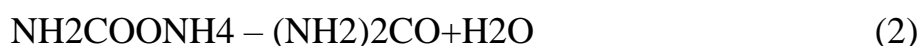
Основные группы организмов, принимающих участие в компостировании:

- микрофлора – бактерии, актиномицеты, грибы, дрожжи, водоросли;
- микрофауна – простейшие;
- макрофлора – высшие грибы;
- макрофауна – двупароногие многоножки, клещи, ногохвостки, черви, муравьи, термиты, пауки, жуки [27].

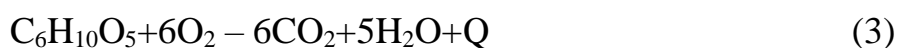
При наличии микроорганизмов, актиномицетов и грибов компостируемая масса (пищевые отходы, бумага, древесина, навоз, отходы обработки зерна и др.) разрушается по следующей схеме: протеин — пептиды — аминокислоты — аммиачные соединения — протоплазма бактерий + азот или аммиак. Это — для азотистых соединений.

Для углеродистых соединений: углеводы — простые сахара — органические кислоты — протоплазма бактерий + углекислый газ [29].

При разложении мочевины образуется аммиак, углекислый газ и вода (формулы 1, 2):

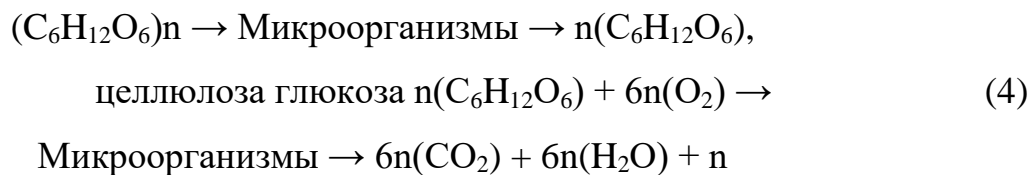


Клетчатка, содержащаяся в растительных остатках, разлагается с образованием углекислого газа, воды и выделением тепла (формула 3):



Аэробные биохимические реакции, протекающие при компостировании,

можно представить в следующем виде (формулы 4, 5, 6):



«Целлюлоза может быть окислена до углекислого газа и воды в аэробных условиях с выделением 2796 КДж на 1 моль глюкозы - составной части целлюлозы. Переработанные таким образом отходы вступают в естественный круговорот веществ в природе за счет их обезвреживания и превращения в компост» [27].

### **2.1.1 Морфологический состав твердых коммунальных отходов поступающих на мембранное компостирование**

Морфологический состав современных ТКО значительно отличается от того, что был несколько десятилетий назад. Широкое использование упаковочных материалов и полуфабрикатов в повседневной жизни большинства жителей привело к одновременному росту содержания бумаги и полимеров в ТКО [8, 9].

Традиционно в морфологическом составе ТКО выделяют до пятнадцати компонентов: бумага, картон, пищевые отходы, дерево, металл (черный и цветной), текстиль, кости, стекло, кожу, резину, полимерные материалы, прочее (дерево, подгузники, кожа и резина, электрошрот).

В ходе морфологического анализа, проведенного в соответствии с ПНД Ф 16.3.55-08, было установлено содержание компонентов в составе отхода «Остатки сортировки твердых коммунальных отходов при совместном сборе

практически неопасные». Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Морфологический состав ТКО, поступающих на компостирование

№ пробы	Наименование компонента (показателя)	Результат измерения, % масс	Содержание веществ, млн <sup>-1</sup>
1	Органические вещества (природная органика)	49,39	493900,00
	Бумага	0,67	6700,00
	Стекло	6,78	67800,00
	Песок, грунт	37,50	375000,00
	Черный металл	8,57	85700,00
	Ветошь	0,18	1800,00

В ходе морфологического анализа также было установлено содержание компонентов в ТКО после прохождения процесса сепарации (без балластных включений). Результат представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Морфологический состав ТКО после прохождения сепарации

№ пробы	Наименование компонента (показателя)	Результат измерения, % масс	Содержание веществ, млн <sup>-1</sup>
1	Органические вещества (природная органика)	48,67	486700,00
	Бумага	0,63	6300,00
	Песок, грунт	36,11	361100,00
	Ветошь	0,16	1600,00

Для того чтобы отнести готовый компост к удобрению или к ОМПГ, нужно определиться с видом используемого сырья. При закладке в бурты отходов городского озеленения (ветки, спилы деревьев, скошенная трава, осенние листья и т.д.) и прохождения всех этапов технологии мембранного компостирования на выходе получится компост, имеющий свойства удобрения. При формировании буртов из органических отходов после городских мусоросортировочных станций – ожидаемым продуктом

компостирования будет компост в виде ОМПГ. При закладке буртов и формировании партий смешивать данные отходы нецелесообразно.

В качестве исходного сырья в производстве компоста используются следующие виды отходов, включенные в ФККО (Федеральный классификационный каталог отходов, утвержден приказом Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22.05.2017 № 242 (с последующими изменениями)), имеющие следующие коды, представленные в таблицах 8 и 9.

Кроме перечисленных в таблице 8 отходов, в качестве исходного сырья, в производстве компоста используются следующие виды биологических и пищевых отходов:

- биоотходы, получаемые при переработке пищевого и непищевого сырья животного происхождения;
- биологические отходы, образуемые на предприятиях сферы обслуживания мясоперерабатывающей промышленности и птицефабрик, рыболовческих комплексов.

В качестве вспомогательных материалов для производства компоста могут использоваться:

- ОМПГ по ТУ 20.15.80-002-70412224-2017 влажностью не более 40% или естественный грунт влажностью до 30%;
- «Зола, образующаяся при сжигании отходов (IV-V класс опасности в соответствии с критериями, отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду Приказ 536 от 4 декабря 2014 г) (в качестве раскисляющего реагента)» [18];
- органическое удобрение по ГОСТ 55571-2013 влажностью не более 40% или естественный грунт влажностью до 30%;
- древесная щепа по ГОСТ 15815 с размером частиц 50-80 мм;
- вода по ГОСТ Р 51232.



Таблица 8 – Перечень отходов, принимаемых на компостирование с получением ОМПГ по ТУ 20.15.80-002-70412224-2017

Код ФККО-2017	Наименование отходов
1 12 121 11 20 4	Отходы подстилки из древесных опилок при содержании крупного рогатого скота
1 12 221 11 40 5	Отходы подстилки из древесных опилок и стружки при содержании лошадей практически неопасные
1 12 520 01 39 4	Отходы подстилки из древесных опилок при содержании свиней
1 12 791 01 33 4	Отходы подстилки из древесных опилок при содержании птиц
1 12 971 11 40 4	Отходы подстилки из древесных опилок при содержании собак
1 12 992 11 30 4	Отходы подстилки из древесных опилок при содержании диких животных в неволе
4 01 600 00 00 0	Продукты пищевые прочие, утратившие потребительские свойства
4 01 631 11 40 5	Чай в упаковке из разнородных материалов, утративший потребительские свойства
4 01 693 21 20 5	Сухофрукты в упаковке из полимерных материалов, утратившие потребительские свойства
4 92 111 11 72 4	Отходы мебели деревянной офисной
7 10 110 02 39 5	Отходы (осадки) водоподготовки при механической очистке природных вод
7 10 210 11 49 4	Песок фильтров очистки природной воды отработанный при водоподготовке
7 10 210 12 49 4	Песок фильтров очистки речной воды отработанный при водоподготовке с применением синтетического флокулянта
7 31 120 00 00 0	Отходы из жилищ при раздельном сборе
7 31 200 00 00 0	Отходы от уборки территории городских и сельских поселений, относящиеся к твердым коммунальным отходам
7 31 290 00 00 0	Прочие отходы от уборки территории городских и сельских поселений
7 31 300 00 00 0	Растительные отходы при уходе за газонами, цветниками, древеснокустарниковыми посадками, относящиеся к твердым коммунальным отходам
7 33 380 00 00 0	Растительные отходы при уходе за территориями размещения производственных объектов, объектов инженерной и транспортной инфраструктур
7 36 100 00 00 0	Отходы кухонь и предприятий общественного питания
7 39 413 11 29 5	Отходы волос
7 39 511 01 29 4	Отходы (ворс) очистки фильтров сушильных машин при чистке хлопчатобумажных текстильных изделий
7 39 515 11 49 5	Отходы зачистки гладильного, сушильного оборудования

Продолжение таблицы 8

Код ФККО-2017	Наименование отходов
7 39 518 02 20 4	Отходы механической очистки сточных вод стирки и чистки текстильных изделий
7 39 950 00 00 0	Отходы от уборки и очистки акваторий и водоохраных зон водных объектов
7 41 100 00 00 0	Отходы сортировки отходов за исключением: 7 41 110 01 72 4 смесь отходов пластмассовых изделий при сортировке твердых коммунальных отходов; 7 41 113 41 72 4 отходы многослойной упаковки на основе бумаги и/или картона, полиэтилена и фольги алюминиевой, при сортировке твердых коммунальных отходов; 7 41 114 11 72 4 отходы полиэтилена, извлеченные при сортировке твердых коммунальных отходов; 7 41 114 21 72 4 отходы полипропилена, извлеченные при сортировке твердых коммунальных отходов; 7 41 115 11 20 5 лом стекла и изделий из стекла при сортировке твердых коммунальных отходов; 7 41 116 11 72 4 отходы черных металлов, извлеченные при сортировке твердых коммунальных отходов; 7 41 120 00 00 0 Отходы сортировки лома и отходов черных металлов; 7 41 130 00 00 0 Отходы сортировки лома и отходов цветных металлов; 7 41 150 00 00 0 Отходы сортировки отходов пластмасс
7 47 101 01 42 4	Пыль газоочистки узлов перегрузки твердых коммунальных отходов
7 47 110 00 00 0	Отходы при сжигании твердых коммунальных отходов, отходов потребления на производстве, подобных коммунальным
8 12 101 01 72 4	Древесные отходы от сноса и разборки зданий

Таблица 9 – Перечень отходов, принимаемых на компостирование с получением удобрения органического по ГОСТ 55571-2013

Код ФККО-2017	Наименование отходов
3 01 397 21 23 4	Фильтрующая загрузка из древесины в кусковой форме, отработанная при очистке вентиляционных выбросов в производстве табачных изделий
3 05 000 00 00 0	<b>ОТХОДЫ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДЕРЕВА</b>
3 05 010 00 00 0	Отходы транспортировки и хранения древесного сырья
3 05 011 11 71 4	Отходы зачистки транспортных средств и площадок разгрузки и хранения древесного сырья
3 05 100 00 00 0	Отходы окорки древесины
3 05 111 11 20 5	Отходы окорки древесины практически неопасные
3 05 200 00 00 0	Отходы распиловки и строгания древесины

Продолжение таблицы 9

Код ФККО-2017	Наименование отходов
3 05 220 02 21 5	Рейка из натуральной чистой древесины
3 05 220 03 21 5	Щепа натуральной чистой древесины
3 05 220 04 21 5	Обрезь натуральной чистой древесины
3 05 230 00 00 0	Опилки и стружка натуральной чистой древесины
3 05 230 01 43 5	Опилки натуральной чистой древесины
3 05 230 02 22 5	Стружка натуральной чистой древесины
3 05 290 00 00 0	Древесные отходы из натуральной чистой древесины несортированные
3 05 291 11 20 5	Опилки и стружка натуральной чистой древесины несортированные
3 05 291 91 20 5	Прочие несортированные древесные отходы из натуральной чистой древесины
3 05 305 00 00 0	Отходы первичной обработки древесины
3 05 305 71 23 4	Отходы зачистки оборудования при пропарке древесины
3 05 305 72 20 5	Отходы коры при зачистке оборудования гидротермической обработки древесного сырья
3 05 311 00 00 0	Отходы от шлифовки натуральной чистой древесины
3 05 311 01 42 4	Пыль древесная от шлифовки натуральной чистой древесины
3 05 311 02 39 5	Шлам древесный от шлифовки натуральной чистой древесины
3 05 311 03 42 5	Пыль древесная от шлифовки натуральной чистой древесины практически неопасная
3 05 314 01 29 5	Отходы шпона натуральной чистой древесины
3 05 305 00 00 0	Отходы первичной обработки древесины
3 05 310 00 00 0	Отходы производства фанеры, шпона, деревянных плит, панелей и изделий из них
3 05 311 00 00 0	Отходы от шлифовки натуральной чистой древесины
3 06 111 05 20 5	Отходы кородревесные несортированные при подготовке технологической щепы для варки целлюлозы при ее производстве
3 06 111 11 39 4	Отходы древесные процесса сортирования целлюлозы при ее производстве
3 06 111 14 29 4	Отходы древесные и минеральные в смеси процесса сортирования целлюлозной массы при ее производстве (непровар)
3 14 710 21 43 4	Опилки древесные, загрязненные минеральными удобрениями, содержащими азот, фосфор и калий
4 01 000 00 00 0	<b>ОТХОДЫ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ, НАПИТКОВ, ТАБАЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ</b>
4 01 100 00 00 0	Продукты из фруктов и овощей, утратившие потребительские свойства
4 01 400 00 00 0	Продукция мукомольно-крупяная, утратившая потребительские свойства
4 01 500 00 00 0	Изделия хлебобулочные и мучные кондитерские, утратившие потребительские свойства

Продолжение таблицы 9

Код ФККО-2017	Наименование отходов
4 04 100 00 00 0	Изделия из натуральной древесины, утратившие потребительские свойства, незагрязненные
4 04 190 00 51 5	Прочая продукция из натуральной древесины, утратившая потребительские свойства, незагрязненная
4 04 191 00 22 5	Отходы древесной шерсти (упаковочной стружки)
4 04 100 00 00 0	Изделия из натуральной древесины, утратившие потребительские свойства, незагрязненные
4 05 000 00 00 0	<b>БУМАГА И ИЗДЕЛИЯ ИЗ БУМАГИ, УТРАТИВШИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ СВОЙСТВА</b>
4 05 100 00 00 0	Отходы бумаги и картона без пропитки и покрытия незагрязненные
4 05 120 00 00 0	Отходы потребления бумаги и картона с однокрасочной и цветной печатью
4 05 180 00 00 0	Отходы упаковки и упаковочных материалов из бумаги и картона незагрязненные
4 05 900 00 00 0	Отходы бумаги и картона и изделий из них
4 05 913 00 00 0	Отходы упаковки и упаковочных материалов из бумаги и картона, загрязненные пищевыми продуктами
4 05 913 01 60 5	Отходы упаковочных материалов из бумаги и картона, загрязненные пищевыми продуктами
4 05 913 11 60 5	Упаковка из бумаги и/или картона, загрязненная растительными и животными жирами
4 05 919 00 00 0	Отходы упаковки и упаковочных материалов из бумаги и картона, загрязненные прочими веществами и продуктами
4 05 919 56 60 5	Упаковка из бумаги и/или картона, загрязненная грунтом
4 05 919 57 60 5	Упаковка из бумаги и/или картона, загрязненная древесной мукой
4 05 919 72 60 4	Упаковка из бумаги и/или картона, загрязненная органоминеральными удобрениями

Таким образом, отнесение готового компоста к удобрению или к ОМПГ определяется, в первую очередь, видом используемого сырья. При закладке буртов и формирования партий смешивать вышепредставленные отходы не целесообразно.

### **2.1.2 Характеристика производимого продукта – компоста**

Конечным продуктом технологии мембранного компостирования является компост. В зависимости от исходного сырья полученный компост

соответствует продуктам: удобрения органические по ГОСТ 55571-2013 «Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов» или ОМПП по ТУ 20.15.80-002-70412224-2017 Органо-минеральный почвогрунт (ОМПП).

По физико-химическим показателям, химическому и санитарно-эпидемиологическому состоянию, компост (почвогрунт (ОМПП) и/или удобрение) должны соответствовать требованиям, приведенным в таблицах 10 и 11.

Таблица 10 – Требования к показателям компоста (почвогрунта ОМПП) в соответствии с ТУ 20.15.80-002-70412224-2017

Показатели	Характеристика материала	Нормативные документы на методы контроля
Внешний вид	Рыхлая масса от светло-коричневого до светло-желтого цвета, а также неплотная, полностью однородная структура, имеющая земляной запах	«Методические рекомендации по приготовлению и использованию почвогрунтов с заданными свойствами на основе котлованных грунтов и биокомпостов для целей озеленения» (утв. Постановлением Правительства Москвы от 17 июня 2008 г. N 514-ПП). СанПиН 2.1.7.1287-03 с изменениями «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы».
Влажность	Массовая доля влаги - не более 50%.	
Содержание органических веществ	Массовая доля органических веществ - не менее 25%	
Показатель pH	Показатель pH солевой вытяжки - 6,0- 8,0	
Содержание механических примесей	Содержание древесной щепы - не более 20% (по массе)	
Содержание нитроцеллюлозы	Остаточное содержание нитроцеллюлозы - не более 5%	
Содержание элементов питания	в мг/кг: азот (NO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> ) 50-200 фосфор (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 100-200 калия (K <sub>2</sub> O) 100-200	
Валовое содержание тяжелых металлов	в мг/кг не более: Cu 300 Zn 1500 Co 25	

Продолжение таблицы 10

Показатели	Характеристика материала	Нормативные документы на методы контроля
	Содержание примесей токсичных элементов: Cd 5 Pb 500 Cr 300 Ni 100 As 10 Hg 10	
Микробиологические и санитарно-паразитологические показатели	Бактерии группы кишечной палочки - 10 клеток/г Энтерококки -10 клеток/г продукта Патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы, клеток/г продукта – отсутствие. Яйца гельминтов, экз./кг продукта – отсутствие.	МУ 2.1.7.730-99 МУК 4.2.796-99 ГОСТ 17.4.1.02-83

Таблица 11 – Требования к показателям компоста (удобрения) в соответствии с ГОСТ 55571-2013

Наименование показателя	Норма
Массовая доля примесей токсичных элементов (валовое содержание), в том числе отдельных элементов, мг/кг сухого вещества, не более:	
- свинец	200,0
- кадмий	5,0
- цинк	500,0
- медь	300,0
- никель	100,0
- хром	300,0
- ртуть	10,0
- мышьяк	0,02
Удельная эффективная активность природных радионуклидов, Бк/кг сухого вещества, не более	300,0
Удельная эффективная активность техногенных радионуклидов (ACs/45 + ASr/30), не более	1 относительная, ед

Продолжение таблицы 11

Наименование показателя	Норма
Массовая концентрация остаточных количеств пестицидов в сухом веществе, мг/кг сухого вещества, не более: ГХГЦ (сумма изомеров) ДДТ и его метаболиты (суммарные количества)	0,1 0,1
Индекс санитарно-показательных микроорганизмов, кл./г: - колиформы - энтеробактерии	1-9 1-9
Наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, в том числе энтеробактерии (патогенных серовариантов, кишечной палочки, сальмонелл, протей), энтерококков (стафилококков, клостридий, бацилл), энтеровирусов, кл./г	Не допускается
Наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, в том числе нематод (аскаридат, трихо-цефалов, стронгилят, стронгилоидов), трематод, цестод	Не допускается
Цисты кишечных патогенных простейших	Не допускается
По физико-механическим и агрохимическим показателям удобрения должны соответствовать нормам:	
Размер частиц удобрения, мм, не более	25,0
Содержание балластных, инородных механических включений, % от массы удобрения нормативной влажности, не более, в т.ч. содержание частиц стекла размером:	
- от 3 до 5 мм, не более	1,5
- от 5 до 10 мм, не более	0,2
- более 10 мм	Не допускается
содержание полимерных материалов, не более	0,8
содержание прочих балластных включений, не более	2,5
Массовая доля влаги, %, не более	50,0
Массовая доля органического вещества на сухой продукт, %, не менее	45,0
Показатель активности водородных ионов солевой суспензии, ед. рН	6,0-8,0
Массовая доля питательных элементов в удобрениях с исходной влажностью, %, не менее:	
- азота общего	0,5
- фосфора общего, в пересчете на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4
- калия общего, в пересчете на K <sub>2</sub> O	0,3

Таким образом, требования по ГОСТ отличаются в зависимости от исходного сырья.

### **2.1.3 Характеристика мембраны**

В основе концепции технологии мембранного компостирования лежит применение специального покрытия, в основе которого используется полупроницаемая мембрана, которая непроницаема для больших молекул биоаэрозолей и газообразных веществ с неприятным запахом, но не препятствует прохождению воздуха, углекислого газа и водяных паров. Биоаэрозоли конденсируются с внутренней стороны мембранной системы и остаются в компостируемой массе, где впоследствии разлагаются микроорганизмами. Мембрана также является непреодолимым барьером для микроорганизмов и их спор.

Для ускоренного процесса компостирования применяется специальная микропористая мембрана марки - GORE® Covers, на основе PTFE (политетрафторэтилена), которая заламинирована между внешним пластом - износостойкими и устойчивыми к ультрафиолетовому излучению слоями.

Мембранное покрытие имеет следующую структуру:

- внешний пласт обладает высокой устойчивостью к атмосферным осадкам и ультрафиолетовому излучению;
- следующий слой – это полупроницаемая мембрана, которая препятствует проникновению запахообразующих субстанций и бактерий;
- сразу под мембраной расположен защитный слой, который защищает мембрану от механических повреждений со стороны компостируемого материала.

Политетрафторэтилен (PTFE) образует 3-мерную паутинообразную структуру, с микроскопическими порами. Эта структура обладает гидрофобностью и низкой адгезией, что позволяет удалять частицы, захваченные поверхностью мембраны. При этом воздух свободно проникает через мембрану, а частицы размером 0,1 мкм задерживаются на поверхности.



Покрытие из политетрафторэтилена обеспечивает химически устойчивый барьер от микроорганизмов и твердых частиц.

Мембрана обладает следующими характеристиками (таблица 12).

Таблица 12 – Характеристика мембраны

Характеристика	Значение
Толщина, мм	0,1-0,2
Общая пористость, %	60
Размер пор, мкм	0,2
Воздухопроницаемость по EN ISO 9237: 1995 с использованием испытательного давления 200 Па, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> / ч	2-6

Таким образом, мембранное покрытие защищает бург от погодных условий и соответственно – от нежелательных процессов гниения и препятствует выбросу неприятных запахов, также мембрана обладает свойствами воздухопроницаемости и проницаемости водяного пара, в следствии чего регулирует высвобождение влаги, при этом не допуская пересушивания компостируемой массы.

## **2.2 Определение путей совершенствования предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО. Описание предлагаемого технологического процесса**

Как правило мусоросортировочные предприятия оснащены оборудованием для трех основных технологических операций, обеспечивающих производство компоста: частичной предварительной подготовки ТКО, биотермического аэробного компостирования, очистки компоста от примесей и складирования компоста. На некоторых заводах, кроме того, предусмотрена термическая обработка (сжигание, пиролиз) не компостируемой фракции [30].

Такой подготовки ТКО к компостированию и процессов сортировки

недостаточно для получения компоста, который бы соответствовал ГОСТу, поэтому получаемый компост характеризуется низким качеством и имеет низкий спрос. К тому же компост из отходов ТКО может быть существенно загрязнен включениями стекла и черными металлами.

Таким образом, технология мембранного компостирования ТКО имеет следующие проблемы: мало учитывается состав и свойства исходного сырья и недостаточная подготовка отходов ТКО к компостированию, чем и объясняется низкое качество готовой продукции.

Для того, чтобы улучшить качество компоста, нужно в первую очередь усовершенствовать процесс сортировки отходов ТКО <70 мм, поступающих на ферментацию. В этом случае на выходе будет произведен компост хорошего качества, который можно использовать как на продажу, так и для сельскохозяйственных культур, а также в качестве органического удобрения для рекультивации земель (в том числе после добычи полезных ископаемых), в технологии полигонного захоронения ТКО (в качестве покрывающего материала), в качестве заполнителя для покрытия заболоченных земель, для производства этанола и в качестве подготовленного топлива для производства энергии.

Анализируя существующий технологический процесс сортировки ТКО на ООО «ЭкоРесурсПоволжье» (рисунок 4), можно увидеть, что отходы сепарации после сортировки ТКО <70 мм недостаточно очищаются от черного металла и включений стекла.

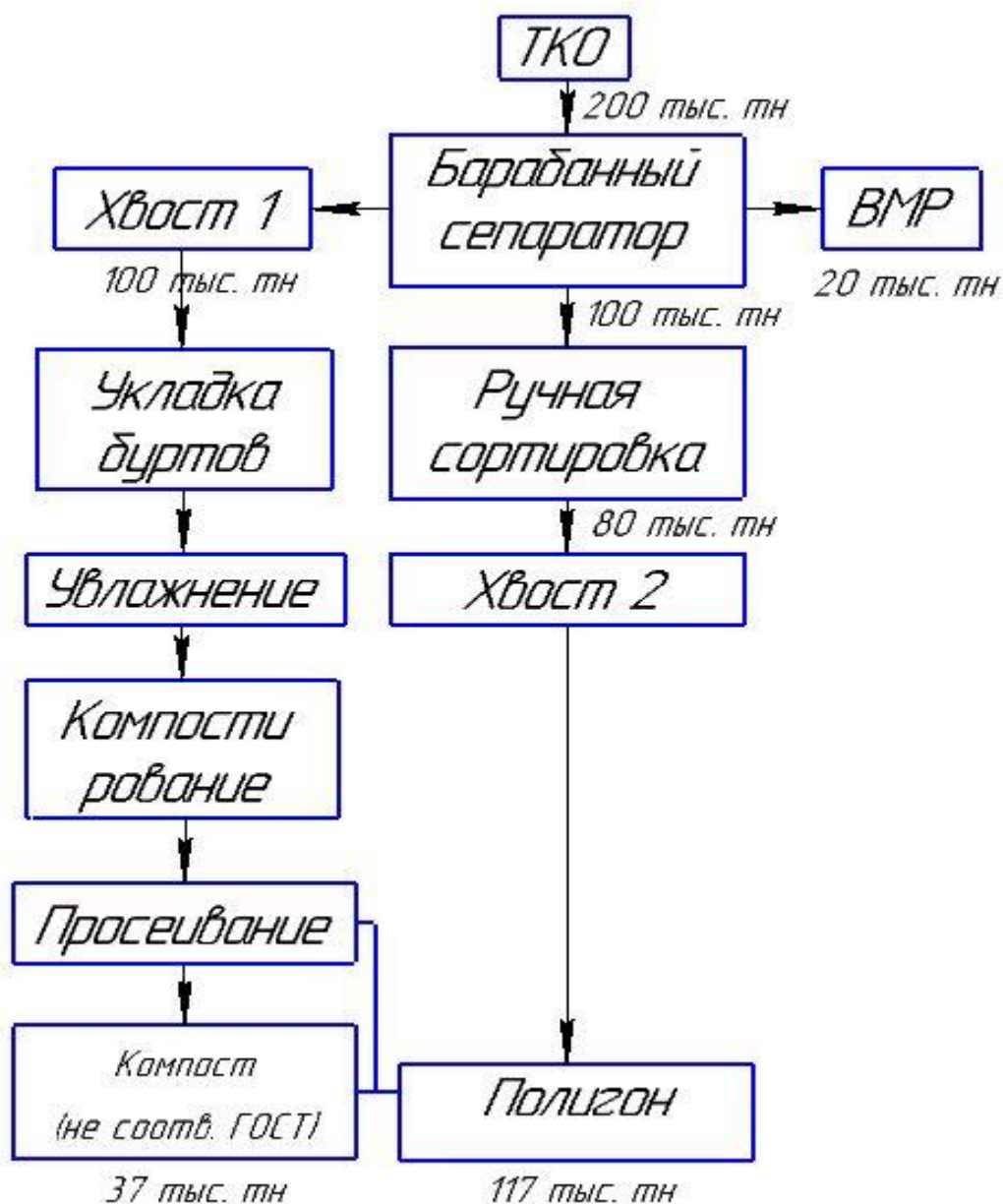


Рисунок 4 – Существующий технологический процесс компостирования

Предлагаемое технологическое решение для оптимизации процесса мембранного компостирования:

- установка баллистического сепаратора (для отбора стекла);
- установка магнитного сепаратора (для отбора черного металла).

Включение блоков сепарации в процесс подготовки сырья, поступающего на мембранное компостирование, позволит изготавливать компост, соответствующий качеству по ГОСТ Р 55571-2013.

Преимуществом данного технологического решения является - экономия места на полигоне и выручка от продажи компоста.

Предлагаемый технологический процесс компостирования представлен на рисунке 5.

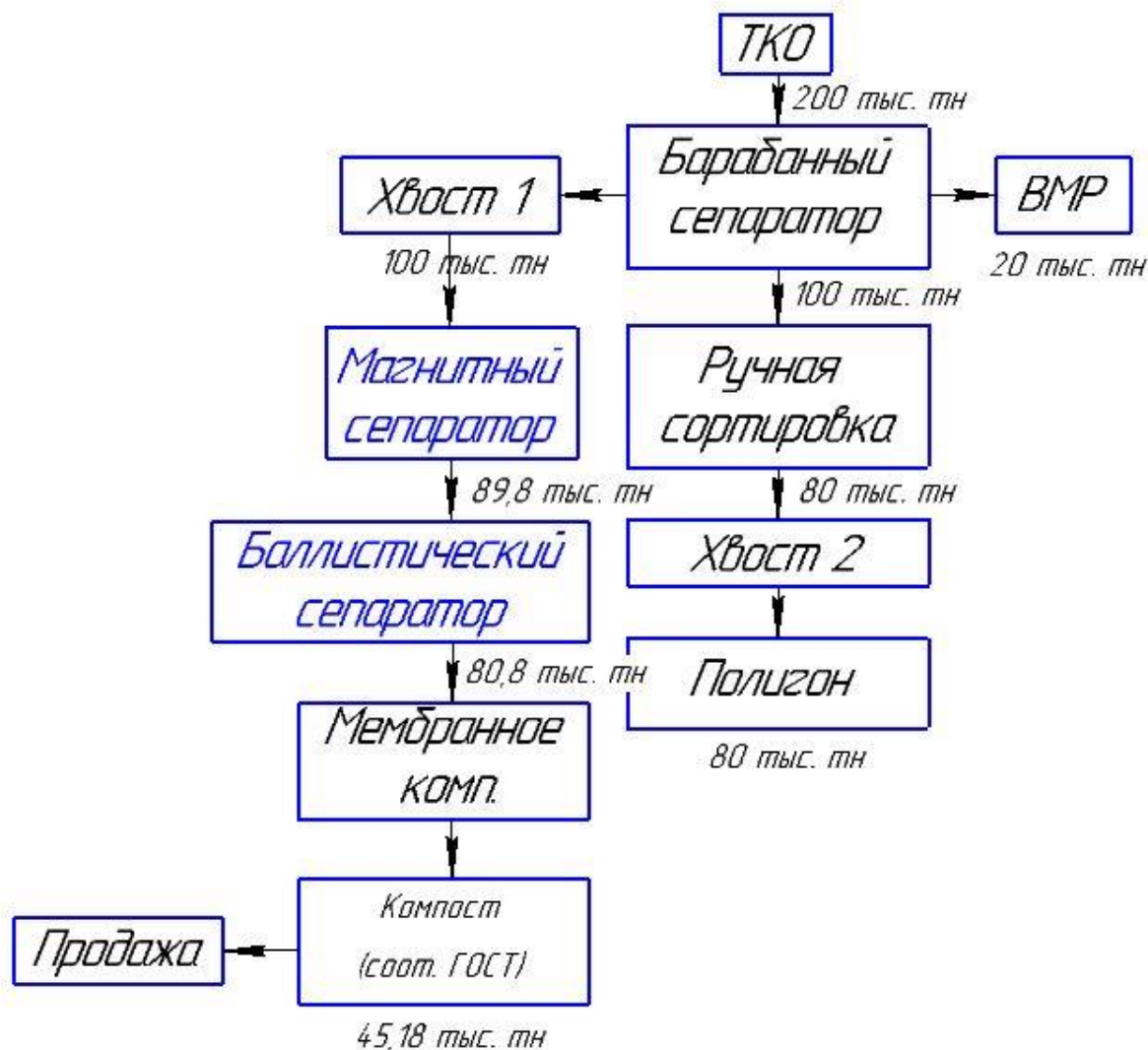


Рисунок 5 – Предлагаемый технологический процесс компостирования

Таким образом, при недостаточной подготовке сырья на ферментацию, будет получен компост, загрязненный посторонними примесями, такими как черные металлы и стекло, что будет негативно влиять как на процесс мембранного компостирования, так и на готовый продукт - компост. В предлагаемом технологическом процессе компостирования, сырье проходит

полный цикл сортировки и очищается от включений металлов и обломков стекла, поэтому получаемый компост будет соответствовать качеству по ГОСТ.

## **2.3 Выбор основного оборудования для оптимизации технологического процесса мембранного компостирования ТКО**

### **2.3.1 Магнитный сепаратор**

Основными характеристиками для выбора оборудования являются – мощность, производительность и морфология сепарируемых отходов.

Основной характеристикой при выборе магнитного сепаратора является – размер сепарируемой фракции и мощность электромотора.

При выборе магнитного сепаратора было рассмотрено несколько вариантов оборудования: сепаратор марки - Gauss Magnetti SM 120.120 NS, остаток mix 70-300 / Fe 70-300 и сепаратор магнитного типа Gauss Magnetti SM 80.120 NS, отсеv < 70 / Fe < 70.

В качестве предлагаемого оборудования выберем магнитный сепаратор марки - Gauss Magnetti SM 80.120 NS, отсеv < 70 / Fe < 70. Данное оборудование подходит для сепарации 1 хвоста ТКО с размером фракций < 70 мм.

Основная задача магнитного сепаратора — извлечение ферромагнитного материала, присутствующего в инертном материале и разгрузка извлеченного металла отдельно в специальные емкости. Эффективность магнитного разделения зависит от толщины слоя отходов на конвейере, а также размера и формы немагнитных материалов.

Предложенный сепаратор непрерывно выделяет из 1 хвоста ТКО ферромагнитные компоненты (черные металлы и нержавеющую сталь) при помощи постоянных магнитов. Магниты работают при любой температуре окружающей среды (до 200°С для ферритовых магнитов и до 100°С для неодимовых магнитов).

Предлагаемый магнитный сепаратор представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Магнитный сепаратор марки Gauss Magnetti SM 80.120 NS

В таблице 13 представлены характеристики рассматриваемого оборудования.

Таблица 13 – Технические характеристики магнитных сепараторов

Gauss Magnetti SM 80.120 NS, отсеб < 70 / Fe < 70		Gauss Magnetti SM 120.120 NS, остаток mix 70-300 / Fe 70-300
Параметр	Значение	Значение
Мощность электромотора, кВт	3	3
Размеры сепаратора, мм	2410 x 1595 x 540	2420 x 1703 x 400
Изготовлен в соответствии с правилами	ЕС 42/2006/СЕ	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- усиленная металлическая рама, плазменная резка,</li> <li>- постоянный магнит «St-Ferrite»,</li> <li>- резиновая лента из износостойкой резины на синтетических тканях. Данный материал устойчив к износу и механическим повреждениям,</li> <li>- защита из нержавеющей стали,</li> <li>- высококачественный мотор-редуктор с высоким ресурсом на износ.</li> </ul>		

### 2.3.2. Баллистический сепаратор

Основными критериями для выбора баллистического сепаратора являются – мощность и производительность.

При выборе баллистического сепаратора было рассмотрено следующее оборудование: BS Hartner различных серий (25, 45, 60, 90, 120).

В качестве баллистического сепаратора выберем сепаратор марки - BS 120 Hartner. Этот сепаратор имеет наиболее высокую мощность привода и производительность в сравнении с другими сепараторами.

Данный сепаратор разделяет материал на три фракции. Процесс разделения происходит в один этап: движение лопастей вызывает вибрацию подаваемого материала в вертикальном и горизонтальном направлениях транспортировки, что приводит к разделению и высокому качеству сепарации.

Объемные и громоздкие предметы, камни, бутылки и другие полые предметы попадают в нижнюю часть машины (3D). Легкие и плоские материалы, фольга, текстиль и бумага перемещаются в верхнюю часть сепаратора (2D).

Третья фракция – песок, органика и прочая мелкая фракция, просеивается через отверстия в лопастях.

Предлагаемый баллистический сепаратор представлен на рисунке 7.

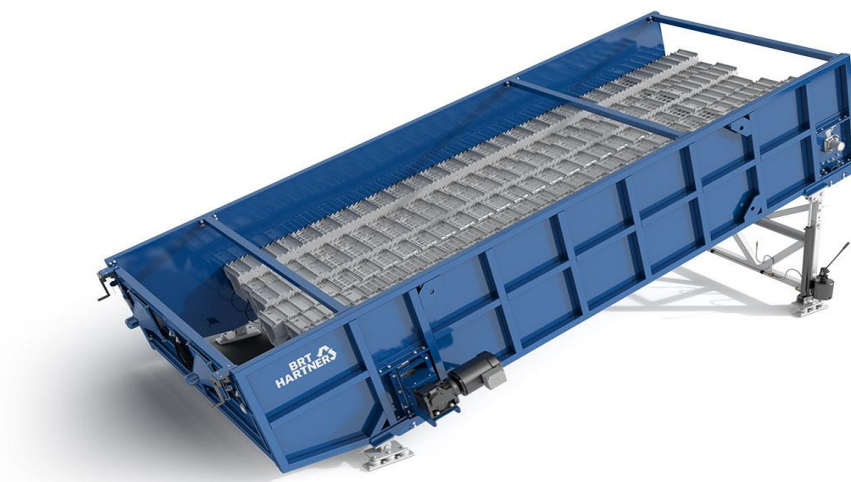


Рисунок 7 – Баллистический сепаратор марки BS Hartner

Технические характеристики рассматриваемого оборудования представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Технические характеристики баллистических сепараторов

Характеристики	BS 25	BS 45	BS 60	BS 90	BS 120
Ширина (м)	1,5	2,1	2,7	4,2	5,4
Лопатка длина (м)	4,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Мощность привода (кВт)	7,5	11	11	15	22
Производительность (м <sup>3</sup> /ч)	0-30	45-60	60-90	90-120	120-200
Площадь сита (м <sup>2</sup> )	6,4	13,2	17,1	25,2	34,1
Лопатка количество	6	8	8	12	16

Выводы к разделу:

В данном разделе рассмотрены основные этапы применяемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО, биохимические фазы компостирования и особенности данной технологии.

Изучены виды отходов, поступающие на мембранное компостирование, представлены нормативы качества компоста по ГОСТ Р 55571-2013.

Рассмотрена основная проблема процесса компостирования – недостаточная подготовка отходов перед ферментацией. Предложено технологическое решение - включение блоков сепарации в процесс подготовки сырья, поступающего на мембранное компостирование для получения качественного компоста.

Подбор оборудования выполнен с учетом мощности, морфологии и размера сепарируемого сырья < 70 мм.



### **3 Расчетная часть**

#### **3.1 Расчет материального баланса предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО**

Ежедневно на линию сортировки поступает 850 т отходов ТКО – 20000 т в месяц. После чего из отходов отбирается вторичное сырье и хвосты ТКО. Отходы сепарации после сортировки < 70 мм – 224,5 т – 6733 т в месяц, сырье для компостирования. Данные взяты на «ЭкоРесурсПоволжье».

Загрузка в бурты происходит ежедневно. Накопление до рабочего объема в одном бурте производится в количестве 100 м<sup>3</sup>. Для расчета используем плотность отходов сепарации после сортировки < 70 мм – 0,50 м<sup>3</sup>.

Биодеградация ингредиентов, составляющих компостируемую массу, приводит к потере 30–40% органического вещества в виде углекислого газа и воды [22].

При расчетах принимаем, что при начальной массе компостируемого материала - 100%, конечная масса составит - 60%. Удаляемая часть компоста в соответствии с технологическим процессом просеивается.

Примем следующие параметры температуры и относительной влажности воздуха: +60°C,  $c_p = 57,73\%$  (с учетом буртового покрытия). Для нахождения относительной влажности воздуха, была рассчитана абсолютная влажность воздуха - 0,07%.

Расчетные параметры процесса мембранного компостирования:

- входная масса – 6733 т;
- плотность отходов: 1 хвост < 70 мм – 0,50 м<sup>3</sup> (биогаз – 0,35 м<sup>3</sup>, неббиогаз – 0,15 м<sup>3</sup>);
- количество буртов – 18;
- рабочий объем бурта – 100 м<sup>3</sup>;
- температура +60°C, относительная влажность воздуха  $c_p = 57,73\%$  (с учетом буртового покрытия);

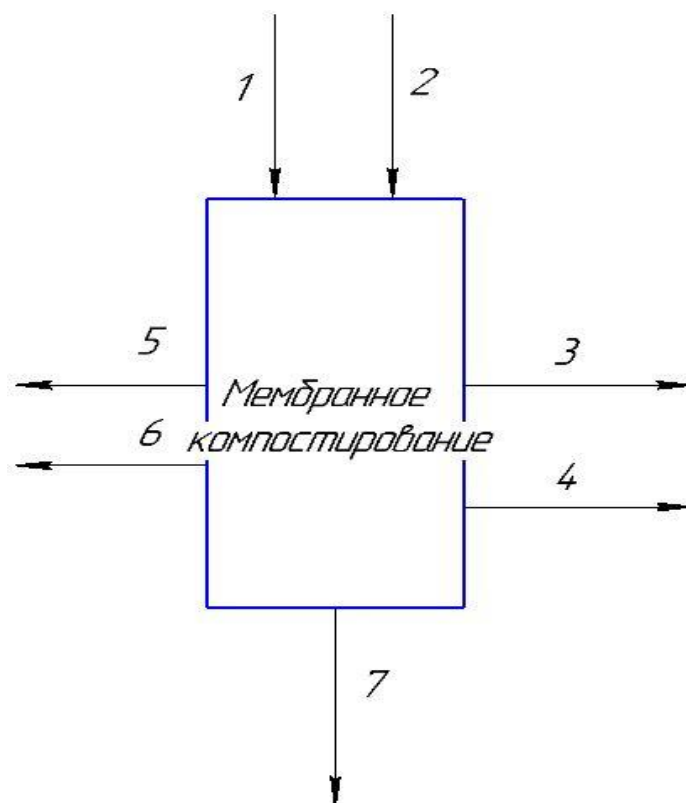
- парциальное давление пара у поверхности испаряющейся воды при 60°C – 2032 кг/м<sup>2</sup> [22];

- парциальное давление пара в воздухе при 60°C – 370 кг/м<sup>2</sup> [22];

- газовая постоянная для 1 кг пара  $R_n = 461,5$  Дж/кг · град;

- высота бурта – 2 м.

Схема материальных потоков технологического процесса мембранного компостирования представлена на рисунке 8.



1- компостируемая масса, 2 – воздух; 3– выделение фильтрата; 4 – парообразование; 5 – выделение углекислого газа, 6 – потери процесса, 7 – компост

Рисунок 8 – Схема материальных потоков мембранного компостирования

1. Запишем материальный баланс в общем виде (формула 7):

$$G_{\text{возд}} + G_{\text{орг.отходы}} = G_{\text{компост}} + G_{\text{фильтрат}} + G_{\text{вод.исп}} + G_{\text{CO}_2} + G_{\text{потерь}}, \quad (7)$$

где  $G_{\text{орг.отх}} = 6733$  т.

2. Массу полученного компоста рассчитаем по формуле 8:

$$G_{\text{компост}} = G_{\text{орг.отходы}} - (G_{\text{фильтр}} + G_{\text{вод.исп}} + G_{\text{CO}_2} + G_{\text{потерь}}) \quad (8)$$

3.  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  составляют 40% исходной массы, в соотношении 0,3:0,7 [22]. Тогда рассчитаем количество процессной воды (фильтрата) и углекислого газа (формулы 9, 10):

$$G_{\text{фильтр}} = G_{\text{орг.отходы}} \cdot 0,4 \cdot 0,3 \quad (9)$$

$$G_{\text{CO}_2} = G_{\text{орг.отходы}} \cdot 0,4 \cdot 0,7 \quad (10)$$

Подставим исходные данные в формулы (9, 10):

$$G_{\text{фильтр}} = 6733 \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 807,96 \text{ т}$$

$$G_{\text{CO}_2} = 6733 \cdot 0,4 \cdot 0,7 = 1885,24 \text{ т}$$

4. При расчете примем потери равными – 5% (формула 11). Тогда:

$$G_{\text{потерь}} = 0,05 \cdot G_{\text{орг.исх}} \quad (11)$$

Подставим исходные данные в формулу 11:

$$G_{\text{потерь}} = 0,05 \cdot 6733 = 336,65 \text{ т}$$

5. Удельная теплота парообразования воды при  $60^\circ\text{C}$  составляет 2356,9

кДж/кг. Однако с учетом теплотерь и нагревания материала на испарение 1 кг влаги нужно затратить в среднем 4 МДж теплоты [10].

Найдем количество испарившейся жидкости с поверхности бурта (кг/ч) по формуле 12:

$$G_{\text{вод.исп}} = F \cdot \kappa \cdot \beta \cdot (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{в}}), \quad (12)$$

где  $G_{\text{вод.исп}}$  – количество испарившейся жидкости, кг/ч;

$\beta$  – коэффициент испарения, м/ч;

$\kappa$  – коэффициент пропорциональности (поправочный коэффициент) = 0,001;

$F$  – свободная поверхность испарения, м<sup>2</sup>;

$P_{\text{н}}$  – парциальное давление пара у поверхности испаряющейся воды (при 60°C), кг/м<sup>2</sup>;

$p_{\text{в}}$  – парциальное давление пара в воздухе (при 60°C), кг/м<sup>2</sup>.

Учитывая, что данная формула справедлива для испарения с зеркала жидкости, а в нашем случае вода распределена во всем объеме компостируемой массы, что создает существенное сопротивление испарению, в формулу вводим поправочный коэффициент  $K$ .

6. Для определения коэффициента испарения обычно применяют следующие критериальные выражения (формула 13):

$$Nu' = f \cdot (Re \cdot Gr \cdot Pr' \cdot Gu), \quad (13)$$

где  $Nu' = \beta l / D$  – диффузионный критерий Нуссельта ( $l$  – характерный линейный размер, м;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/ч), за характерный размер в расчетах принимаем высоту бурта равной 2 м;

$Re = c_0 / \nu$  — критерий Рейнольдса ( $c_0$  — скорость воздуха над поверхностью жидкости, м/с;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с), значение кинематического коэффициента вязкости принимаем

равным  $15,11 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ .

7. Диффузионный критерий Грасгофа найдем по формуле 14:

$$Gr' = \frac{gl^3}{\nu^2} \left( \frac{m_{\text{П}} \cdot T_{\text{В}}}{m_{\text{В}} \cdot T_{\text{П}}} \right), \quad (14)$$

где  $gl^3/\nu^2$  - ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$m_n, m_e$  — молекулярный вес паровоздушной смеси непосредственно у поверхности воды и в среднем в объеме воздуха;

$T_n, T_e$  — температура поверхности воды и температура воздуха, К.

8. Диффузионный критерий Прандтля найдем по формуле 15. Отнесение количества пара  $G_{\text{исп.вод}}$  к разности парциальных давлений влияет на запись критерия Прандтля, поэтому формула будет иметь вид:

$$Pr' = \frac{\nu}{D_{\text{П}} \cdot R_{\text{П}} \cdot T}, \quad (15)$$

где  $R_n$  — газовая постоянная для 1 кг пара.

9. Критерий Гухмана найдем по формуле 16:

$$Gu = \frac{T_{\text{В}} - T_{\text{М}}}{T_{\text{В}}} \quad (16)$$

где  $T_{\text{В}}, T_{\text{М}}$  - температура воздуха по сухому и мокрому термометрам, К.

10. Коэффициент диффузии ( $\text{м}^2/\text{ч}$ ) найдем по формуле 17:

$$Gu = 0,0754 \left( \frac{T}{273} \right)^{1,82} \cdot \frac{760}{p_0} \quad (17)$$

11. Таким образом, выражение (14) примет следующий вид (формула

18):

$$Nu = A Re^m \cdot Gr^n \cdot Pr^o \cdot Gu^p, \quad (18)$$

где величины  $A, m, n, o, p$  – постоянные, взятые из справочных данных [11].

По условиям процесса мембранного компостирования выбираем случай свободной конвекции. Тогда коэффициенты  $m, p$  будут равны нулю. Соответственно, критерии Рейнольдса и Гухмана в выражении (18) не учитываются.

«Процесс биотермического разложения органического вещества включает три стадии: фазу увеличения температуры, фазу высоких температур (50—80°C) и фазу падения температуры» [21].

Для того, чтобы значения критериев Грасгофа и Прандтля получились более достоверными, их рассчитывали для нескольких диапазонов температур (диапазон 10°C) и потом усредняли результаты.

По результатам расчетов усредненные критерии Грасгофа и Прандтля равны  $3,964 \cdot 10^{10}$  и  $1,143 \cdot 10^{-8}$  соответственно [11].

12. Критерий Нуссельта определим из соотношения (формула 18):

$$Nu = 0,065 \cdot (3,964 \cdot 10^{10})^{0,248} \cdot (1,143 \cdot 10^{-8})^{0,248} = 0,296$$

13. Для определения коэффициента испарения  $\beta$  воспользуемся формулой 19:

$$\beta = \frac{Nu \cdot D}{I}, \quad (19)$$

где  $Nu$  - критерий Нуссельта = 0,296;

$D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/ч;

$I$  – высота бурта – 2 м.

Исходные данные подставим в формулу 19:

$$\beta = \frac{0,296 \cdot 0,086}{2} = 0,013 \text{ м/ч}$$

14. Тогда найдем количество испарившейся жидкости с поверхности бурта по формуле 12:

$$G_{\text{вод, исп}} = 1800 \cdot 0,001 \cdot 0,013 \cdot (2032 - 370) = 38,9 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 28,008 \text{ т/мес}$$

15. Массу полученного компоста рассчитаем по формуле 8:

$$G_{\text{компост}} = 6733 - (807,96 + 28,008 + 1885,24 + 336,65) = 3765,142 \text{ т}$$

Сведем результаты в таблицу 15.

Таблица 15 – Материальный баланс

Начало процесса			Конец процесса		
Компонент	Масса, т/мес.	Содержание, %	Компонент	Масса, т/мес.	Содержание, %
Материал компостирования	6733	100	Компост	3765,14	55,18
Воздух	-	100	Вода, образующаяся в процессе биоразложения	807,96	11,84
-	-	-	Испарившаяся жидкость	28	0,42
-	-	-	Углекислый газ, образующийся в процессе биоразложения	1885,24	27,63
-	-	-	Потери процесса	336,65	4,93
Итого:	6733	100	Итого:	6822,99	100

Таким образом, получен компост - 3765,14 т в месяц, соответствующий качеству по ГОСТ Р 55571-2013.

## **3.2 Анализ преимуществ предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО и оценка эффективности**

### **3.2.1 Анализ основных методов компостирования**

#### **3.2.1.1 Компостирование в мешках**

Система компостирования представляет собой технологию, основанную на использовании дешевого, одноразового закрытого контейнера и способности контролировать процесс, происходящий в массе заряда компоста [19].

Биореактор представляет собой тонко настроенный тоннель из фольги из трехслойной высокопрочной полиэтиленовой пленки с повышенной устойчивостью к УФ-излучению. Туннель из фольги изолирует стабилизированную партию от неблагоприятных воздействий окружающей среды, насекомых, грызунов, птиц и других животных. Создавая барьер с окружающей средой, он обеспечивает более легкий контроль процесса биостабилизации.

Исходным материалом для компостирования служит отсев ТКО фракция 0-70 мм для последующей загрузки в мешки. Оптимальный срок 1 цикла компостирования – от 28 до 35 суток. В результате после выгрузки получается стабильный материал, который подлежит просеву 0-20 мм для удаления неорганических включений.

В биореакторе используется статический режим - в результате избыточного давления, создаваемого в мешке после каждого цикла продувки воздухом, кислород «пропитывает» исходный материал [23].

Закрытая технология с принудительной аэрацией исходного сырья и фильтрацией технологического воздуха имеет следующие преимущества и недостатки, представленные в таблице 16.



Таблица 16 – Характеристика технологии компостирования в мешках

Преимущества	Недостатки
Низкая стоимость инвестиций	Отсутствие возможности вносить серьезные изменения в созревание после комплектования
Низкие эксплуатационные расходы	Невозможно скорректировать продолжительность компостирования
Простота обслуживания и удобство управления	Плохой товарный вид конечной продукции
Обеспечивает эффективное использование территории	

### 3.2.1.2 Компостирование в тоннелях

Тоннели для компостирования предназначены для аэробной обработки органических материалов. Исходным материалом для компостирования служит отсев ТКО фракция 0-80 мм. В тоннелях параметры процесса кислорода, влаги и температуры можно регулировать. Основные преимущества и недостатки обработки в замкнутой системе представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Характеристика технологии тоннельного компостирования

Преимущества	Недостатки
Высокая скорость обработки	Высокие требования к качеству перемешивания и влажности загружаемой смеси
Низкое разбрызгивание материалов	Образуется полупродукт (потеря массы 20-30 %)
Контроль углекислого газа	Высокие строительные и эксплуатационные расходы
Значительно снижает негативное воздействие на окружающую среду	
Обеспечивает эффективное использование территории	

Тоннель для компостирования состоит из железобетонной камеры. В полу тоннеля находится аэрационный пол, состоящий из труб, установленных в продольном направлении и параллельных друг другу, которые снабжены

отверстиями, в которых установлены вентиляционные сопла.

Камера давления за задней стенкой туннеля подает технологический воздух в отдельные вентиляционные трубы. Каждый тоннель имеет свою камеру. Эта камера высокого давления обеспечивает равномерное распределение воздуха по отдельным каналам аэрации.

В аэрационном полу встроена дренажная труба, так что вода, отводимая из материала, собирается и при необходимости может быть очищена.

Чтобы уменьшить выбросы во время наполнения и опорожнения, все компостные туннели находятся под отрицательным давлением с помощью центральной вытяжной системы, выходящей из задней стенки.

В начале процесса компостирования скорость разложения органического вещества высока. В дальнейшем в процессе снижаются скорости разложения и потребления кислорода.

Уровень влажности зависит от состава обрабатываемого материала и степени аэрации. Во время процесса компостирования уровень влажности постоянно снижается в зависимости от расхода воды. Если уровень влажности падает ниже 30%, биологическая активность уменьшается, и вода будет удаляться в основном при насыщении воздуха. Если влажность становится слишком высокой, проницаемость материала для кислорода и внутри него биологическая активность падает. Хорошо сбалансированный уровень влажности обеспечивает основу для хорошей биологической активности.

Температура обрабатываемого материала также играет важную роль в процессе компостирования в тоннелях. Температура напрямую зависит от выработки тепла, вызванного деятельностью микроорганизмов, которая также зависит от температуры в тоннеле, уровня влажности, уровня кислорода и наличия питательных веществ. Экстремальные температуры негативно влияют на биологический процесс: при более низких температурах разложение происходит медленно, материал остается очень влажным. Если температура слишком высокая, активен только минимум термофильных микроорганизмов, что отрицательно влияет на процесс разложения.

### 3.2.1.3 Мембранное компостирование

Типичный процесс компостирования длится восемь недель и разделен на 3 фазы.

1. Исходный материал накрывается ламинированным 3-слойным буртовым покрытием и в течение четырех недель находится в фазе I, подвергаясь интенсивному разложению.

2. Мембрана снимается с бурта, компостируемая масса переносится фронтальным погрузчиком на площадку следующего бурта для второй фазы компостирования и снова накрывается мембраной для последующего биологического разложения на протяжении следующих двух недель фазы II.

3. Для того, чтобы биоматериал соответствовал нормативным показателям ГОСТ, материал необходимо подвергнуть окончательному двухнедельному процессу вызревания. Оно происходит в 3 фазе, которая может происходить без участия буртового покрытия. Здесь материал из фазы 2 помещается на новую буртовую площадку, где фиксируется только лишь температура.

Мембрана обладает полупроницаемыми свойствами, что позволяет поддерживать постоянный климат внутри бурта. Буртовое покрытие защищает внутреннее содержимое бурта от влаги, ветра и различных воздействий окружающей среды, и тем самым от нежелательных процессов гниения. Благодаря свойствам воздухопроницаемости и проницаемости водяного пара она регулирует высвобождение влаги и делает возможным выделение газов, не допуская при этом пересушивания компостируемой массы.

Хорошее проветривание внутри капсулы способствует образованию воздушного изолирующего слоя, который вызывает равномерное распределение температуры по всему основанию бурта и обеспечивает равномерное обеззараживание (гигиенизацию). По достижении температуры гигиенизации (до +80°C) уничтожаются все вирусы и бактерии.

Основные преимущества и недостатки мембранного компостирования

представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Характеристика технологии мембранного компостирования

Преимущества	Недостатки
Низкие строительные и эксплуатационные расходы	Длительность процесса
Сочетание открытой и замкнутой системы компостирования: Снижение выбросов парниковых газов; Постоянная контролируемая работа системы, есть возможность скорректировать процесс	Высокие требования к компостируемой массе и предварительной сортировке отходов ТКО
Значительно снижает негативное воздействие на окружающую среду	
Обеспечивает эффективное использование территории	

Из таблицы можно сделать вывод о том, что технология мембранного компостирования предполагает небольшие эксплуатационные расходы, при этом обладает высокой эффективностью.

### 3.2.2. Основные преимущества и недостатки методов компостирования

Сравнительная характеристика вышерассмотренных методов компостирования представлена в таблицах 19 и 20. Для оценки площади принята мощность предприятия в 50 000 тонн /год.

Таблица 19 – Сравнительная характеристика основных методов компостирования

№	Вид компостирования	Время компостирования	Занимаемая площадь (га)	Эксплуатационные расходы и энергозатраты, (Евро/т·год)
1	В мешках	от 28 до 35 дней	До 0,6	30-50
2	В тоннелях	19 дней	0,5-0,7	200-250
3	Мембранное	42 дня	0,8-1,2	50-80

Таблица 20 – Сравнительная характеристика основных методов компостирования

Вид компостирования	Органолептические показатели	Готовый продукт	Эффективность	Снижение НВОС
В мешках	Низкие	Рекультивант, компост	Низкая	+
В тоннелях	-	Рекультивант, компост, RDF	Очень высокая	+
Мембранное	-	Рекультивант, компост, RDF	Высокая	+

Таким образом, технология с наименьшей стоимостью и наименьшей эффективностью - компостирование в мешках. Наиболее эффективной технологией, с точки зрения процесса и внешнего восприятия является - компостирование в закрытых туннелях, но данный метод имеет наиболее высокую стоимость. Оптимальной технологией является – мембранное компостирование, метод предполагает небольшие эксплуатационные расходы, при этом обладает высокой эффективностью.

### 3.2.3 Оценка эффективности

#### 3.2.3.1 Расчет стоимости компоста

1. Сведем расчет амортизационных отчислений используемого оборудования и техники в производстве компоста в таблицу 21.

Таблица 21 – Данные расчета амортизационных отчислений оборудования

Наименование оборудования	Количество, ед.; комплект	Цена за единицу, тыс. руб.	Сумма затрат	Срок полезного использования, мес.	Сумма амортизации в год, тыс. рублей
Комплект оборудования	1	190 096,95	190 096,95	83	27 484
Площадка для компостирования	1	30 566,06	30 566,06	119	3 082
Погрузчик АМКАДОР	1	4 817,67	4 817,67	37	1 562
ИТОГО		225 480,68	225 480,68		32 128

Расходы на ремонт и техническое обслуживание комплекта оборудования для компостирования принимаются на уровне не более 3% от амортизационных отчислений.

2. Расчёт затрат на обслуживающий персонал сведен в таблицу 22.

Таблица 22 – Сумма расходов на персонал

Наименование показателей	Кол-во, чел	Зарботная плата в месяц, руб	Сумма расходов в год, тыс.руб.
Оператор	5	25 000	1 500
Водитель погрузчика	2	30 000	720
Начальник участка, технолог	1	50 000	60
Итого расходов на заработную плату	8	-	2 820
Отчисления на социальные нужды	-	-	846
Расходы на охрану труда и улучшение условий труда	-	-	91
ИТОГО	-	-	6037

На основании части 3 статьи 226 ТК РФ финансирование мероприятий по улучшению условий и охраны труда определены в размере 0,2% от суммы затрат по производству.

3. Сведем расчёт затрат на топливо и на технологические цели в таблицу 23:

Таблица 23 – Данные о затратах на топливо и технологические цели

Наименование техники	Часы работы в год	Расход топлива, л/час	Стоимость топлива руб/литр	Сумма расходов в год, тыс.руб.
Машина для наполнения плёночных рукавов	905	8	39,17	284
Погрузчик	3650	7,2	39,17	1 029
ИТОГО				1 313

4. Сведем расчет расходов на электроэнергию технологическую в таблицу 24.

Таблица 24 – Сумма расходов на технологическую электроэнергию

Наименование показателей	Потребляемая мощность, кВт/час	Годовой фонд рабочего времени	Стоимость 1 кВт/час в руб без НДС	Сумма расходов в год, тыс.руб.
Комплект оборудования для компостирования	166	3285	3,92	2 138

5. Расчет на электроэнергию осветительную представлен в таблице 25.

Таблица 25 – Сумма расходов на осветительную электроэнергию

Наименование показателей	Потребляемая мощность, кВт/час	Годовой фонд рабочего времени	Стоимость 1 кВт/час в руб без НДС	Сумма расходов в год, тыс.руб.
Лампа накаливания	4	604	3,92	9

6. Расход на трубы нагнетения и отвода воздуха в технологическом процессе представлен в таблице 26.

Таблица 26 – Сумма расходов в технологическом процессе

Наименование показателей	Кол-во на 1 рукав, п.м.	Норматив на 1 цикл	Кол-во закладок (рукавов) в цикле	Кол-во циклов в год	Стоимость трубы, руб за п/м	Сумма расходов в год, тыс.руб.
Трубы нагнетения воздуха	60	0,5	15	12	45	243
Трубы отвода воздуха	60	2	15	12	45	972

7. Сведем расчет расходов на мембрану в технологическом процессе в таблицу 27.

Таблица 27 – Сумма расходов на мембрану для компостирования

Наименование показателей	Длина покрытия на 1 бурт, м	Покрытие на годовую программу, м	Стоимость 1 кв.м в руб без НДС	Сумма расходов в год, тыс.руб.
Мембрана для компостирования	100	5000	210	1 050

8. Сведем расчет расходов на спецодежду и СИЗ в таблицу 28.

Таблица 28 – Сумма расходов на спецодежду и СИЗ

Наименование	Стоимость за единицу без НДС	Операторы		Водитель погрузчика		Начальник участка	
		Кол-во, шт.	Сумма, в руб	Кол-во, шт.	Сумма, в руб	Кол-во, шт.	Сумма, в руб
Куртка	2 118					1	2118
Жилет	220	5	1100	5	1100	1	220
Комбинезон	2 268	5	11340	2	4536		
Дождевик	134	5	670				
Футболка	180	5	900	2	360		
Кепка	180	5	900	2	360	1	180
Сапоги резиновые	2 475	5	12375				
Сапоги ПВХ	464			2	928	1	464
Перчатки	12			2	24		
Перчатки МБС	195	5	975				
Ботинки	1 680	5	8400	5	8400		
Ботинки для ИТР	2 280					1	2280
Респираторы 3М	3 638	5	18190				
Итого лето			54850		15708		5262
Костюм зимний	3 000	5	15000	2	6000		
Толстовка	258	5	1290	2	516		



Продолжение таблицы 28

Перчатки	46	5	230				
Шапка утепл.	714	5	3570	2	1428		
Шарф	183	5	915				
Ботинки утепл.	1 644	5	8220	2	3288		
Ботинки утепл.	1 992					1	1992
Рукавицы	202	5	1010				
Итого зима			30235		11232		1992

9. Сведем сумму расходов на производственный инвентарь в таблицу 29.

Таблица 29 – Сумма расходов на производственный инвентарь

№ п/п	Наименование	Потребное кол-во в год, штук	Стоимость 1 единицы в руб без НДС	Сумма расходов в год, руб.
1	Лопаты совковые	10	400	4 000
2	Грабли винтовые	10	547	5 470
	ИТОГО			9 470

10. Стоимость транспортировки ТКО на полигон и плата за НВОС (существующего и предлагаемого технологического процесса) рассчитаны в таблице 30.

Таблица 30 – Расходы за транспортировку ТКО на полигон и плата за НВОС

Показатель	Тариф руб. тн	Затраты, млн. руб Типовой процесс	Затраты, млн.руб Предлагаемый процесс
Тариф полигона на захоронение ТКО без НДС	352,98	117 тыс. тн $117 \text{ тыс.тн} \cdot 352,98 = 41,3$	80 тыс.тн $80000 \cdot 352,98 = 28,24$
Стоимость транспортировки ТКО	465	$117 \text{ тыс. тн} \cdot 465 = 54,41$	$80 \text{ тыс. тн} \cdot 465 = 37,2$
Общая стоимость транспортировки, млн. руб		$11,12 + 41,3 + 54,41 = 106,89$	$7,6 + 28,24 + 37,2 = 73,04$

Продолжение таблицы 30

Ставка плата за НВОС, руб IV класс	95	117 тыс. тн · 95 = 11,12	80 тыс. тн · 95 = 7,6
ИТОГО, млн. руб		118,01	80,64
Выручка			
Стоимость компоста с учетом НДС (за 1 тонну), руб			1500
Стоимость компоста, млн. руб			45,18 тыс. тн · 1500 руб = 67,77
ИТОГО, млн. руб			67,77

Сведем результаты расчета в итоговую таблицу 31.

Таблица 31 – Итоговая таблица расходов

Наименование	Ед. изм.	Значение
Производство компоста (фракции 0-20мм) в год	тонн	45 000
Капитальные затраты:		
Стоимость оборудования	тыс. руб.	190 097
Стоимость техники в технологическом процессе	тыс. руб.	4 817
Обслуживающий персонал	чел.	8
Смета расходов		
Расходы на заработную плату персонала	тыс. руб.	2 820
Отчисления с заработной платы персонала на социальное страхование	тыс. руб.	846
Амортизационные отчисления	тыс. руб.	32 128
Расходы на топливо	тыс. руб.	1 313
Расходы на электроэнергию	тыс. руб.	2 147
Расходы на мембрану в технологическом процессе	тыс. руб.	1050
Расходы на ремонт и техническое обслуживание оборудования	тыс. руб.	737

Продолжение таблицы 31

Расходы в технологическом процессе на трубы нагнетания и отвода воздуха	тыс. руб.	1 215
Расходы на охрану труда, спецодежду и СИЗ, на материалы, инструмент и инвентарь	тыс. руб.	220
ИТОГО расходов в год	тыс. руб.	46 607
Себестоимость 1 тонны компоста	руб.	1 035,71
Цена реализации без НДС	руб./тонна	1250,00
Цена реализации с НДС	руб./тонна	1500,00

Из итоговой таблицы расходов было определено, что суммарное количество расходов составляет – 46607 тыс.руб в год. Себестоимость 1 тонны компоста – 1035,71 руб, а цена реализации – 1500 руб, значит выручка от продажи 1 тонны компоста составляет - 464,29 руб.

Из таблицы расчета эффективности можно сделать следующие выводы:

- сокращение затрат по плате за НВОС на 3,52 млн. руб. в год;
- сокращение количества захораниваемых отходов ТКО на 37 тыс. тн в год;
- сокращение затрат на транспортировку отходов ТКО на 33,38 млн.руб. в год;
- увеличение прибыли от продажи компоста на 67,8 млн. руб. в год.

Выводы к разделу:

В данном разделе выполнен анализ преимуществ предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО в сравнении с основными технологиями компостирования.

Произведен расчет материального баланса и оценка эффективности предлагаемого технологического процесса мембранного компостирования ТКО. Рассчитано количество получаемого компоста, соответствующего качеству по ГОСТ Р 55571-2013, определена стоимость компоста.

## Заключение

В данной бакалаврской работе для решения поставленных задач были проанализированы основные этапы технологического процесса мембранного компостирования ТКО, фазы и процессы, протекающие во время компостирования, изучены особенности данной технологии и выявлены основные недостатки процесса - полученный компост загрязнен черными металлами, включениями стекла и не соответствует требованиям к показателям компоста (почвогрунта ОМПГ) в соответствии с ГОСТ Р 55571-2013.

Изучены виды отходов, поступающие на мембранное компостирование. На основе документов ГОСТа определен видовой состав, допустимый для сырья, поступающего на ферментацию.

Предложено техническое решение по оптимизации мембранного компостирования в части подготовки сырья, с улучшением производства компоста соответствующего качеству ГОСТ.

Подобрано оборудование – магнитный и баллистический сепараторы, которое позволит улучшить качество компоста за счет удаления из компостируемого сырья стекла и черных металлов.

Произведены расчеты материального баланса и оценка эффективности технологического процесса мембранного компостирования ТКО.

Эффективность:

- сокращение затрат по плате за НВОС на 3,52 млн. руб. в год;
- сокращение количества захораниваемых отходов ТКО на 37 тыс. тн в год;
- сокращение затрат на транспортировку отходов ТКО на 33,38 млн.руб. в год;
- увеличение прибыли от продажи компоста на 67,8 млн. руб. в год.

Таким образом, поставленные цель и задачи были выполнены.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Васильева Е.А., Левин А.В. Технология обращения с твердыми коммунальными отходами: Учебное пособие часть. ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2019. Часть 1. – 61 с.
2. Волковинский А.А. Способ переработки твердых бытовых отходов. [Электронный ресурс]. URL: <https://patentdb.ru/patent/2241554/> (дата обращения: 11.03.2021).
3. ГОСТ Р 55571-2013 Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов - Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105940/> (дата обращения: 21.02.2021).
4. Демьянова В.С. Д30. Процессы и аппараты переработки твердых бытовых отходов: Учебное пособие по выполнению курсового и дипломного проектирования. Пенза: ПГУАС. – с. 80
5. Друзьянова В.П. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» Диссертация: Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота, Улан – Уде – 2016 г.
6. Заболотских В.В., Гомоницкая А.С., Кутмина С.В. Статья: Технологические приемы улучшения качества компоста, получаемого из органических отходов. Тольяттинский Государственный Университет, 2016 г.
7. Имранова Е.Л, Кириенко О.А. – Хабаровск: Изготовление компоста из растительных отходов. Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, – 17 с.
8. Ильиных Г.В. Использование результатов определения морфологического состава твердых бытовых отходов для обоснования системы обращения с отходами. Пермский нац. исследовательский политехнический университет [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/52843164/> (дата обращения: 13.04.2021).
9. Ильиных Г.В. Геоэкологическая оценка технологий обработки

твердых коммунальных отходов различного компонентного состава. Пермский нац. исследовательский политехнический университет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dslib.net/geo-ekologia/> (дата обращения: 15.04.2021).

10. Луканин А.В. Инженерная экология: защита литосферы от твердых промышленных и бытовых отходов: Изменение температуры при компостировании. Учебное пособие 2018 г.

11. Лурье Ю.Ю. Москва «Химия» – Справочник по аналитической химии.

12. Луканин А.В., Васильева Т., д-р технических наук, профессор, Российский университет дружбы народов, г. Москва. Научная статья: Комплексное компостирование бытовых отходов городского хозяйства – 2019 г.

13. Миронов В.В., Стяжкин В.И., Седых А.А: Совершенствование технологии компостирования органических отходов. №3(27)-2017.

14. Мхитарян Г.А., Пузанков А.Г., Семенцов А.Ю. Линия ускоренного компостирования твердых коммунальных отходов (варианты). Патент РФ 2271883 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2271883/> (дата обращения: 17.01.2021).

15. Министерство энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Самарской области: Редакция территориальной схемы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Самарской области от 27.12.2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.samregion.ru/2020/03/04/> (дата обращения: 27.04.2021).

16. Министерство энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Самарской области: Отчет о деятельности Регионального оператора по обращению с ТКО за IV квартал 2020 года в соответствии с соглашением от 01.11.2018 [Электронный ресурс] URL: <https://minenergo.samregion.ru/2021/01/29/> (дата обращения: 27.04.2021).

17. Материалы от «ЭкоРесурсПоволжье». Экомашгруп – Технологии

переработки отходов: Система компостирования органической фракции ТКО, 2020 г.

18. ОМППГ по ТУ 20.15.80-002-70412224-2017 Органо-минеральный почвогрунт (ОМППГ) – Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://всероссийская-база-ту.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-udobreniya-organicheskie-1/> (дата обращения: 21.02.2021).

19. Пиотровский Д.Л. Вопросы автоматизированного управления процессом компостирования: Научный журнал КубГАУ, №123(09), 2016 г.

20. Пляскина Н.И., Харитонов В.Н., Вижина И.А. Утилизация твердых коммунальных отходов: эколого – экономическая оценка использования инновационных технологий // Экологический вестник России. – 2016. – №2. – С. 34-39.

21. Суслов Д.Ю., Темников Д.О. Тепловой баланс биореактора с барботажным перемешиванием биомассы. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015 №1. С. 182-185.

22. Справочник химика. Химия и химическая технология / Экологическая биотехнология [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chem21.info/18019222003242/> (дата обращения: 14.11.2020).

23. Тулохонова А. В., Уланова О. В. Монографии, изданные в издательстве Российской Академии Естествознания: Оценка жизненного цикла интегрированных систем управления отходами.

24. Торопов И.В. Обработка и утилизация / Современная технология компостирования биоразлагаемых отходов. Статья Грунт Эко – твердые бытовые отходы - №2 2019 г. – 37 с.

25. Технология переработки органических отходов / Статья – 2019 г [Электронный ресурс]. URL: [www.kompostanlagen.de](http://www.kompostanlagen.de) (дата обращения: 15.10.2020).

26. Фазы разложения компоста: Статья – 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncsemena.ru/article/fazy-razlozheniya-komposta/> (дата

обращения: 15.10.2020).

27. Хайруллин Р.М., Кинз В.В. Способ переработки органических отходов с получением комплексного биоорганического удобрения и активатора компостирования одновременно. Опубликовано: 29.11.2018 Бюл. № 34 [Электронный ресурс] URL: <https://patent.ru/patent/RU2673738C1> (дата обращения: 03.10.2020).

28. Abdennaceur Hassen, Khaoula Belguith, Naceur Jedidi, Ameer Cherif. *Bioresource Technology* 80(3):217-25: Microbial characterization during composting of municipal solid waste.

29. Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—Anaerobic digestion and composting: Long Lin, Fuqing Xu, Xumeng Ge, Yebo Li. January 2019.

30. *Critical Reviews in Biotechnology* 31(2):112-36: Composting of municipal solid waste: Sunil Kumar / National Environmental Engineering Research Institute (NEERI) [Council of Scientific and Industrial Research (CSIR)], Zonal Laboratory I-8, Sector "C", Kolkata, India.

31. *Municipal Solid Waste Composting: Physical Processing*. Tom L. Richard. Department of Agricultural and Biological Engineering Cornell University.

32. *Soil Productivity Enhancement: Composing of Municipal Solid Waste and Its Use as Fertilizer*. Muhammad Khalid Iqbal / National Bureau of Agriculturally Important Microorganisms, Mau, ICAR, Govt. of India · Bioinformatics Ph.D.