

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**О.И. Сергиенко  
Ю.А. Рахманов  
К.Г. Кузнецова  
Н.В. Курникова**

**НОВЫЕ  
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
В ЭКОНОМИКЕ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА**

**Научно-учебное издание**

**ИТМО**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2023**

**УДК 66:658.567**

**ББК 35.100.09**

**С32**

**С32 Сергиенко О.И., Рахманов Ю.А., Кузнецова К.Г., Курникова Н.В.** Новые энерго- и ресурсосберегающие процессы в экономике замкнутого цикла: Научно-учебное издание. – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 129 с.

**ISBN 978-5-7577-**

Научно-учебное пособие составлено при поддержке Благотворительного фонда Владимира Потанина при выполнении проекта № ГСГК-0144-21 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в экономике замкнутого цикла» Стипендиальной программы «Конкурса на предоставление грантов преподавателям магистратуры». Пособие обобщает научный и практический опыт коллектива авторов в области энергетической утилизации отходов в рамках концепции экономики замкнутого цикла. Рассмотрены современные подходы к обращению с отходами. Особое внимание уделяется процессам получения и рекуперации энергии из отходов. Приводятся методические рекомендации авторов и примеры решения практических задач, которые могут быть полезны при выборе наилучших доступных технологий в области обращения с отходами.

Пособие предназначено для специалистов индустрии переработки отходов, а также для магистрантов, обучающихся по направлениям 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 20.04.01 Техноферная безопасность и 05.04.06 Экология и природопользование.

Рецензенты:

доктор техн. наук, проф. Татьяна Валериановна Гусева,  
заместитель директора по научной работе Федерального государственного автономного научно-исследовательского института "Центр экологической промышленной политики"

к.х.н., ст. н. с. Евгения Борисовна Королева,  
заместитель генерального директора по научной работе ООО "Космос"

**ИТМО**

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2023

© Авторы, 2023

**ISBN 978-5-7577-**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. ОСНОВЫ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА.....</b>	<b>7</b>
1.1. Основные системы и принципы экономики замкнутого цикла .....	7
1.2. Бизнес-модели экономики замкнутого цикла .....	10
1.3. Нормативно-правовая база экономики замкнутого цикла .....	11
1.4. Иерархия обращения с отходами.....	14
1.5. Получение энергии из отходов в рамках экономики замкнутого цикла .	15
1.6. Технологии переработки отходов с получением энергии: пиролиз, газификация, инсинерация .....	16
1.6.1 Пиролиз отходов .....	16
1.6.2. Газификация отходов.....	20
1.6.3 Инсинерация отходов .....	21
1.6.4 Технологии мусоросжигательных заводов.....	22
1.6.5. Твердое топливо, получаемое из отходов .....	25
1.6.6. Экологические аспекты энергетических технологий.....	28
Вопросы для самопроверки.....	32
Литература к Главе 1.....	32
<b>Глава 2. БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ.....</b>	<b>35</b>
2.1. Анаэробное сбраживание органических фракций с получением биогаза.....	37
2.2. Получение биометана из свалочного газа .....	42
2.3. Ферментация с получением биоэтанола .....	44
2.4. Получение биодизеля.....	46
2.5. Аэробная ферментация. Компостирование органической фракции ТКО .....	48
Вопросы для самопроверки.....	52
Литература к Главе 2.....	52
<b>Глава 3. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И УТИЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>55</b>
3.1 Элементный состав твердых коммунальных отходов.....	55
3.2 Основы теории горения .....	57
3.3. Образование дымовых газов .....	58
3.4. Энтальпии воздуха и дымовых газов .....	60
3.5. Определение элементного состава и удельной низшей теплоты сгорания твердых коммунальных отходов (Задача 1) .....	61
3.5.1. Исходные данные .....	61
3.5.2. Основные теоретические сведения .....	62
3.5.3. Пример расчета.....	62
3.6. Определение расходных характеристик инсинератора (Задача 2) .....	64

3.6.1. Исходные данные .....	64
3.6.2. Пример расчета.....	65
3.7. Газификация твердых коммунальных отходов (Задача 3).....	71
3.7.1. Исходные данные .....	71
3.7.2. Основные теоретические сведения .....	72
3.7.3. Пример расчета.....	75
3.8. Пиролиз твердых коммунальных отходов (Задача 4) .....	79
3.8.1. Исходные данные .....	79
3.8.2. Основные теоретические сведения .....	79
3.8.3. Пример расчета.....	84
3.9. Утилизация теплоты дымовых газов с получением водяного пара для целей теплоснабжения (Задача 5) .....	86
3.9.1. Исходные данные .....	86
3.9.2. Основные теоретические сведения .....	88
3.9.3. Пример расчета.....	91
3.10. Получение электрической и тепловой энергии в паровой турбине (Задача 6) .....	94
3.10.1. Исходные данные .....	94
3.10.2. Основные теоретические сведения .....	96
3.10.3. Пример расчета.....	99
3.11. Утилизация генераторного газа в двигателе внутреннего сгорания (Задача 7) .....	102
3.11.1. Исходные данные .....	102
3.11.2. Основные теоретические сведения .....	103
3.11.3. Пример расчета.....	105
Вопросы для самопроверки .....	107
Литература к Главе 3.....	110
<b>Глава 4. ВЫБОР НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ.....</b>	<b>112</b>
4.1. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами .....	112
4.1.1 Основные понятия и определения.....	112
4.1.2 Законодательная база по определению наилучших доступных технологий обращения с отходами .....	112
4.1.3 Сущность реформы обращения с отходами.....	114
4.2 Определение экологических результатов и экономической эффективности проектов энергетической утилизации отходов .....	117
4.2.1 Технико-экономическое обоснование проекта по внедрению НДТ .....	118
4.2.2 Показатели экономической эффективности.....	123
Вопросы для самопроверки .....	126
Литература к Главе 4.....	126
<b>Заключение .....</b>	<b>128</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее издание подготовлено в рамках «Конкурса на предоставление грантов преподавателям магистратуры» Стипендиальной программы Благотворительного фонда Владимира Потанина, проект № ГСГК-0144-21 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в экономике замкнутого цикла».

Издание подготовлено авторским коллективом факультета экотехнологий Университета ИТМО и обобщает накопленный научный и практический опыт в области обращения с отходами в рамках концепции экономики замкнутого цикла. Оно направлено на решение актуальной научной и практической задачи – на создание в России индустрии переработки отходов, отвечающей как глобальным вызовам устойчивого развития, так и принятой в нашей стране Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года.

Рассмотрены общие принципы экономики замкнутого цикла, иерархия обращения с отходами, происходящий переход к технологическому нормированию на основе наилучших доступных технологий и соответствующая институциональная поддержка в Российской Федерации.

Особый акцент сделан на применение энергетических технологий утилизации твердых коммунальных отходов, представляющих существенную проблему, которую требуется решить в нашей стране в достаточно сжатые сроки. Применение энергетической утилизации в контролируемых условиях с рекуперацией энергии является более предпочтительным, чем прямое захоронение отходов на полигонах.

Отходы можно превратить в энергию с помощью аэробных и анаэробных биохимических процессов, а также с помощью термохимических процессов – сжигания, газификации и пиролиза. В предлагаемом издании рассматриваются указанные технологии и варианты их практического применения, анализируются их достоинства и недостатки.

Практическую значимость представляют методические разработки авторов по определению элементного состава и теплотехнических характеристик твердых коммунальных отходов и выбору наилучших доступных технологий термической утилизации – газификации, пиролиза и инсинерации отходов. Рассматривается использование теплоты дымовых газов для получения водяного пара, тепловой энергии для целей теплоснабжения в утилизационном котельном агрегате; получение электрической и тепловой энергии в паровой турбине и в двигателе внутреннего сгорания в процессе газификации отходов, а также утилизация жидкого пиролизного топлива и пирогаза. Все практические задачи сопровождаются примерами решения, что позволит читателям получить навыки расчета энергетических параметров установок для дальнейшего выбора технологического оборудования и выполнения технико-экономического обоснования проектов.

Применение энергетических технологий утилизации отходов создает большие возможности для сокращения размещения отходов на полигонах, а также

для снижения негативного воздействия на окружающую среду, позволяя при этом получать дополнительную экономию и доходы от реализации получаемой энергии и побочных продуктов. На основе расчетов экологических сбережений при внедрении проектов энергетической утилизации можно сделать экономически обоснованный вывод об экологических аспектах технологий и целесообразности их применения в целом.

Издание предназначено для широкой аудитории – для специалистов, занятых в области создания индустрии переработки отходов и экономики замкнутого цикла, а также для всех желающих повысить свою квалификацию в области утилизации и термического обезвреживания отходов производства и потребления. Оно также может быть использовано для преподавания в вузах для студентов магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 20.04.01 «Техносферная безопасность» и 05.04.06 «Экология и природопользование».

# Глава 1. ОСНОВЫ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

## 1.1. Основные системы и принципы экономики замкнутого цикла

В последние годы для описания современной эпохи появился новый термин – «антропоцен», когда человек становится доминирующей силой, формирующей окружающую среду [1]. Очевидно, что экономика, извлекающая ресурсы все более быстрыми темпами без учета нагрузки на окружающую среду, в которой она функционирует, и без учета естественных планетарных границ, не может продолжаться бесконечно. Нужен новый способ ведения бизнеса. К 2050 г. количество отходов на планете должно увеличиться на 70%. Этот показатель растет и в России. Общий годовой объем твердых коммунальных отходов (ТКО) в стране составляет 70 млн т или примерно 485 кг на одного жителя страны. Большую часть составляют макулатура (36–42%) и пищевые отходы (24–35%) [2].

Образование пищевых отходов в составе ТКО в России оценивается на уровне 15–20 млн т ежегодно, их основная часть не утилизируется, а направляется на полигоны. Пищевые отходы затрудняют сортировку сухих отходов, их дальнейшую переработку с получением вторичных материальных ресурсов и являются источником выбросов парниковых газов. ТКО образуются в жилищно-коммунальном хозяйстве, где также проблемой являются и осадки очистных сооружений муниципальных сточных вод. Ежегодно образуется 1,2 млн т осушенных осадков, из которых 96% размещается на близлежащих полигонах и иловых картах и только 4% перерабатывается в полезную продукцию. Иловые карты занимают около 4,7 тыс. га и также являются источником выбросов парниковых газов [3].

В России перерабатывается только 5% от общего количества отходов. До 95% промышленных отходов размещается на полигонах – этот способ считается самым неэффективным и нежелательным. Ежегодные потери в экономике страны из-за отсутствия хорошо работающей системы раздельного сбора и сортировки отходов оцениваются в 232,8 млрд. рублей.

В связи с происходящей в стране реформой системы управления отходами планируется к 2030 г. довести количество перерабатываемых отходов в стране до 97%, а вторичных отходов – с 1% до 86%. Также планируется в несколько десятков раз увеличить количество мусоросортировочных комплексов, производственно-технических комплексов и комплексов по сортировке ТКО [2].

В 2015 г. ООН определила всемирные цели устойчивого развития. Одной из них, целью №12, был провозглашен переход к рациональной модели производства и потребления [4]. По оценке экспертов, к 2050 г. население планеты достигнет 9,6 млрд чел., что увеличит потребность в природных ресурсах на нашей планете в три раза. Поэтому необходимо пересматривать принципы традиционной линейной экономики, которые связаны с добычей, производством, использованием и накоплением большого количества отходов в окружающей среде и переходить к экономике замкнутого цикла (циркулярной экономике, англ. Circular Economy).

Основная концепция перехода к циркулярной экономике направлена на то, чтобы заменить существующую в настоящее время линейную модель «брать, производить, потреблять и утилизировать» (англ. take, make, use and dispose) на ту, в которой ресурсы циркулируют с высокой ценностью, сокращая полностью или уменьшая частично потребность в первичных ресурсах и минимизируя остаточные отходы и выбросы. При этом ключевое различие между линейной и циркулярной экономикой заключается в том, что при одностороннем, линейном потоке материалов через промышленные системы экоэффективные методы в основном направлены на минимизацию расхода и токсичности материальных потоков. Некоторые материалы перерабатываются, но часто в качестве решения «в конце трубы», т.е. после факта образования отходов. Низкое качество вторичных материалов не способствует полному отказу от извлечения природных ресурсов.

В отличие от минимизации и дематериализации в рамках традиционной экономики, концепция экологической эффективности в циркулярной экономике предполагает преобразование продуктов и связанных с ними материальных потоков таким образом, чтобы они формировали поддерживающие отношения с экологическими системами и будущим экономическим ростом. Цель заключается не в том, чтобы свести к минимуму поток материалов «от колыбели до могилы», а в создании циклических потоков, своего рода материального метаболизма «от колыбели до колыбели», с сохранением качества материалов. Это по своей сути создает синергетические отношения между экологической и экономической системами, своего рода сцепление между экономикой и экологией.

Основными движущими силами циркулярной экономики являются:

- растущая волатильность цен и ограничение в предложении первичных ресурсов;
- изменения в экологической политике и появление новой нормы расширенной ответственности производителя;
- изменение культуры потребления в сторону более экологически осознанного.

Базовые принципы циркулярной экономики были разработаны Фондом Эллен Макартур [5] и основаны на понимании взаимодействия и функционирования живых систем. Оптимизация систем, а не их компонентов, предполагает управление материальными потоками, циркулирующими в двух типах систем – биологических и технических (рисунок 1.1).

Биологические материальные потоки – это потоки биогенных веществ, предназначенные для безопасного возвращения в биосферу и создания природного капитала. Технические материальные потоки – это потоки веществ и материалов, которые предназначены для циркуляции и создания продуктов высокого качества, в идеальном случае без попадания в биосферу.

Циркулярная экономика проводит резкое различие между потреблением и использованием материалов, отстаивает необходимость применения «функциональной услуги», т.е. бизнес-модели, в которой производители продукции или продавцы сохраняют право собственности на продукцию и выступают в качестве поставщиков услуг, продающих многократное использование продукции, а не ее однократное потребление. Это положение имеет важное значение для развития

эффективных и действенных систем возврата отходов, практики экологического проектирования продуктов и появления новых бизнес-моделей, которые создают более долговечные продукты и облегчают их разборку и дальнейшее повторное использование.

Линейная экономика проходит через центр рисунка 1, в то время как внутренние каскады отражают действия, которые могут быть предприняты для замыкания материальных потоков в биологических и технических системах.

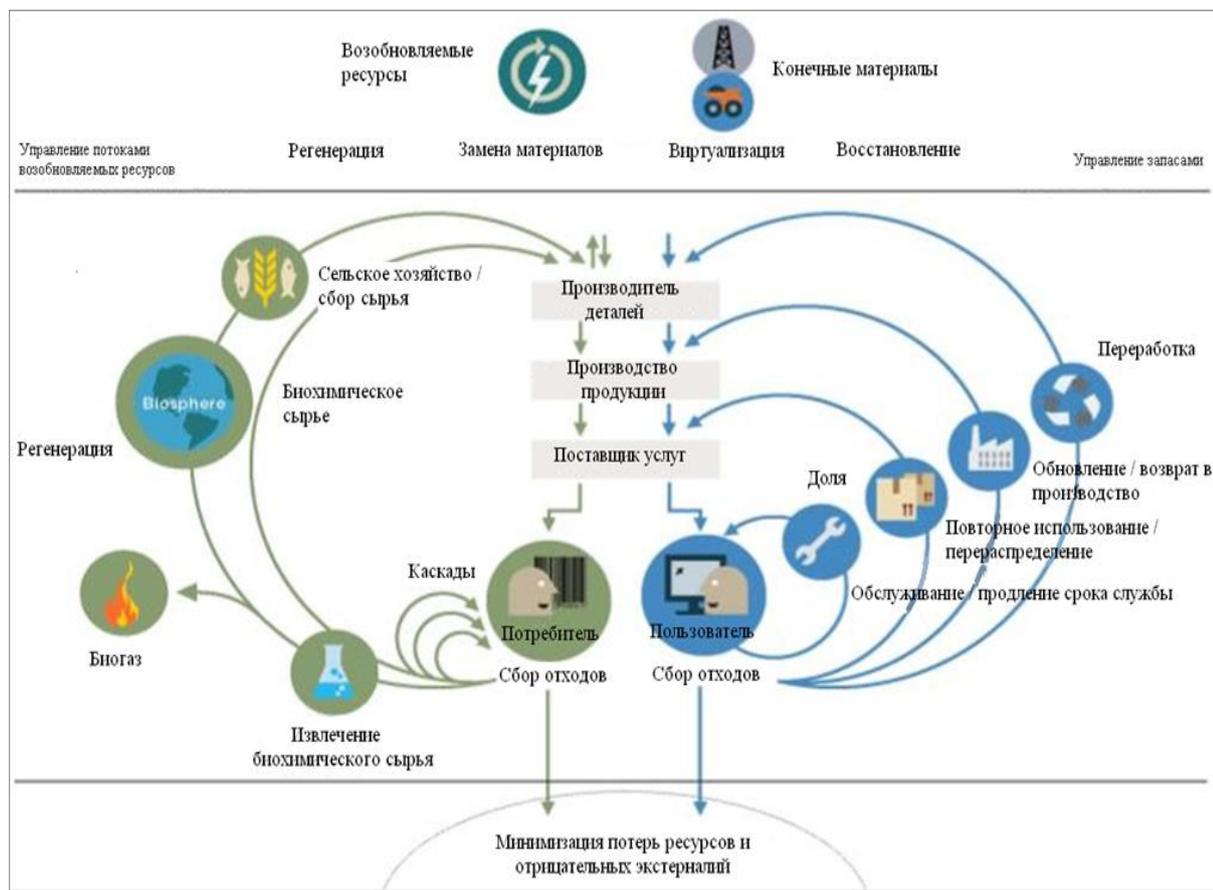


Рисунок 1.1 – Системы циркулярной экономики (цит. по [5])

Целью современной системы управления отходами, реализующей принципы циркулярной экономики, является не утилизация отходов, а их вовлечение в хозяйственный оборот в виде вторичного сырья и энергии из отходов.

Перечислим пять принципов циркулярной экономики.

1. **Проектирование без отходов.** Отходы не существуют, если биологические и технические компоненты продукта вписываются в биогенный или техногенный циклы материальных потоков. Органические отходы растительного и животного происхождения, пищевые отходы нетоксичны и могут быть просто переработаны путем компостирования. Полученные из природных источников, переработанные или искусственно созданные человеком и используемые в технических системах материалы, например, полимеры, сплавы, должны быть предназначены для повторного использования с минимальными затратами энергии и максимальным сохранением качества.

2. **Повышение устойчивости через разнообразие.** Модульность, универсальность и адаптивность продукции являются ценными характеристиками, которые должны быть приоритетными в условиях циркулярной экономики. По аналогии с природными системами, разнообразные искусственно созданные человеком производственные системы со множеством связей друг с другом и с окружающей средой более устойчивы, чем системы, построенные просто для максимизации эффективности и производительности. Отсюда возникает цель создания устойчивого производства.
3. **Энергия из возобновляемых источников.** Производственные системы, создаваемые человеком, должны стремиться работать на возобновляемых источниках энергии. Перенос налогообложения с труда на энергию и материалы будет способствовать сокращению потребления и ускорит принятие циклических бизнес-моделей (рисунок 2).
4. **Системное мышление.** Способность понимать, как части влияют друг на друга в рамках целого, а также какова взаимосвязь целого и частей, имеет решающее значение. Элементы рассматриваются в их взаимосвязи с инфраструктурой, окружающей средой и социальным контекстом. Любое устройство или агрегат также являются системой, но такая система детерминирована. Системное мышление обычно относится к нелинейным системам с обратной связью. В таких системах сочетание неточных начальных условий и обратной связи приводит к многочисленным, часто неожиданным последствиям и неправильным результатам. Применяя системное мышление и знания циркулярной экономики к инженерным и бизнес-задачам, можно обеспечить их решение, не ограничиваясь рассмотрением отдельных устройств или отдельных частей проблемы в краткосрочной перспективе.
5. **Отходы – это ресурс.** С точки зрения биологических материальных потоков веществ способность повторно возвращать продукты и материалы обратно в биосферу через нетоксичные, восстановительные циклы – вот что лежит в основе данного принципа. Что касается технических потоков веществ, необходимо улучшение качества вторичной переработки и стремление к изменению состава материалов расходных материалов от технических к биологическим, с каскадным прохождением через различные сферы применения до полного извлечения ценного сырья и, наконец, возвращения питательных веществ в биосферу.

## 1.2. Бизнес-модели экономики замкнутого цикла

Переход к циркулярной экономике требует применения новых подходов к хозяйствованию – бизнес-моделей экономики замкнутого цикла (рисунок 1.2). В основе всех бизнес-моделей лежит акцент на ресурсоэффективность, которая обеспечивается за счет замыкания материальных потоков и использования переработанных материалов вместо традиционного сырья. При этом в результате переработки возможно получение вторичных ресурсов более низкого качества (да-

унсайклинг) или более высокой ценности (апсайклинг). В результате многократной переработки или каскадирования материальных потоков происходит повышение ресурсной эффективности [3, 6].

Бизнес-модели продления жизненного цикла продукции способствуют замедлению материальных потоков, что обеспечивается за счет своевременного технического обслуживания, ремонта и предотвращения запланированного устаревания [7]. Совместное потребление (шеринг), аренда, прокат, лизинг и другие виды совместного использования продукции направлены на предоставление услуги вместо продукта. Продукт остается собственностью производителя, который распоряжается продуктом и в конце этапа использования, например, обеспечивает ремануфактуринг продукции, т.е. разборку для дальнейшего использования, что и способствуют сокращению потоков материальных ресурсов [8].

### Иерархия бизнес-моделей экономики замкнутого цикла



Рисунок 1.2 – Иерархия бизнес-моделей экономики замкнутого цикла (цит. по [3])

Внедрение бизнес-моделей замкнутого цикла рассматривается как важный фактор устойчивого производства, обеспечивающий углеродную нейтральность экономики и экономию ресурсов и способствующий повышению конкурентоспособности российской экономики в целом.

### 1.3. Нормативно-правовая база экономики замкнутого цикла

Существенные законодательные барьеры для вовлечения твердых отходов в хозяйственный оборот в России в настоящее время отсутствуют.

В промышленной политике России необходимость оценки и повышения ресурсной и энергетической эффективности производства и построение инфраструктуры ресурсно-технологической трансформации промышленности была

впервые декларирована на законодательном уровне в 2014 г. с принятием Федерального закона от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [9]. Для достижения этой цели необходима технологическая трансформация промышленности и возвращение отходов в хозяйственный оборот, что обеспечит как сокращение негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), так и повышение ресурсной эффективности производства.

Данный Федеральный закон ввел новую правовую норму «наилучшая доступная технология» (НДТ), достижение которой обеспечивается сочетанием следующих критериев:

- наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду;
- экономическая эффективность ее внедрения и эксплуатации;
- применение ресурсо- и энергосберегающих методов;
- период внедрения;
- промышленное внедрение на двух и более объектах НВОС.

В дальнейшем были стандартизованы требования к разработке и содержанию информационно-технических справочников (ИТС) в области НДТ, приведенные в ГОСТ Р 113.00.03-2019 «Наилучшие доступные технологии. Структура информационно-технического справочника» и ГОСТ Р 113.00.04-2020 «Наилучшие доступные технологии. Формат описания технологий» [10,11, 12].

В 2015–2017 гг. в соответствии с поэтапным графиком, утвержденным Правительством РФ, был разработан 51 справочник НДТ, и в 2019 г. утвержден поэтапный график их актуализации. Справочники НДТ в первую очередь рассматривали анализ технологических, технических и управленческих решений для конкретной области применения и содержали описание применяемых в настоящее время и перспективных технологических процессов, технических способов, методов предотвращения и сокращения НВОС, из числа которых выделены решения, признанные наилучшими.

В настоящее время уже созданы следующие ИТС в области обращения с отходами [13]:

- ИТС 9-2020 Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами;
- ИТС 15-2021 Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов);
- ИТС 17-2021 Размещение отходов производства и потребления;
- ИТС 52-2022 Обращение с отходами I и II классов опасности;
- ИТС 53-2022 Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде.

Информационно-технический справочник ИТС НДТ 9-2020 впервые был утвержден в 2015 г., затем пересмотрен в 2020 г. и сейчас проходит актуализацию. Справочник распространяется на утилизацию и обезвреживание отходов термическими способами с деструкцией органических веществ посредством сжигания, пиролиза и газификация отходов, применения плазменных источни-

ков энергии, а также комбинации данных методов. Реализация термических методов позволяет обезвредить отходы и одновременно получить вторичные энергетические и материальные ресурсы [14].

Документ также распространяется на процессы, которые могут оказать влияние на объемы эмиссий или масштабы загрязнения окружающей среды:

- накопление (хранение) и предварительная подготовка утилизируемых и обезвреживаемых отходов;
- выбор и подготовка потребляемых материалов и топлива;
- методы предотвращения и сокращения эмиссий и образования отходов;
- способы преобразования энергии, полученной при термических процессах, в электрическую или тепловую энергию;
- технологии термической утилизации и обезвреживания отходов, являющиеся неотъемлемым подпроцессом технологического процесса производства отраслевой продукции на предприятиях, в случае если в соответствующем отраслевом справочнике НДТ они не рассмотрены.

В соответствии с Федеральным проектом «Экономика замкнутого цикла» к 2030 г. планируется довести сортировку ТКО до 100% и снизить в два раза их захоронение на полигонах. Проект стартовал в 2022 г. и включает следующие основные направления в рамках экологической промышленной политики РФ [15]:

- создание системы обращения с отходами производства и потребления, включая политику промышленных утилизационных сборов, а также вопросы сбора, транспортировки, обработки, утилизации, обезвреживания и захоронения твердых коммунальных отходов;
- создание промышленности переработки отходов;
- развитие экологических биотехнологий;
- снижение негативного воздействия на окружающую среду со стороны субъектов экономической деятельности за счет внедрения экологически безопасных технологий в различных отраслях народного хозяйства и перехода на наилучшие доступные технологии;
- реабилитация экологически неблагополучных территорий, ликвидация накопленного экологического ущерба;
- регулирование выбросов парниковых газов в контексте климатических изменений;
- развитие экопросвещения.

Кроме того, проект направлен на стимулирование использования вторичных ресурсов, ограничение оборота не перерабатываемой упаковки и создание системы прослеживаемости движения отходов [16].

В соответствии с Паспортом отраслевой программы «Применение альтернативного топлива из отходов в промышленном производстве» в период с 2022 по 2030 гг. предполагается сформировать инфраструктуру производства альтернативного топлива для применения в цементной и металлургической промышленности. В дальнейшем создание единого оператора инфраструктуры производ-

ства и потребления топлива из отходов и развитие системы стандартизации альтернативного топлива из отходов позволит расширить данную программу на топливно-энергетический комплекс и жилищно-коммунальное хозяйство и сформировать кластеры производства и потребления альтернативного топлива [17,18].

#### 1.4. Иерархия обращения с отходами

При рассмотрении вопроса о внедрении энергетических технологий утилизации отходов необходимо учитывать следующие аспекты.

Развитие систем утилизации отходов должно следовать иерархии отходов. Сокращение отходов путем предотвращения в источниках образования должно быть приоритетным, затем следует подготовка к повторному использованию и переработка отходов (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Иерархия обращения с отходами (цит. по [8])

Проекты энергетической утилизации отходов (WtE, англ. Waste-to-Energy – «отходы в энергию») могут быть классифицированы как дополнительная технология для извлечения энергии из оставшихся неперерабатываемых фракций ТКО, и поэтому они не должны конкурировать с мерами по сокращению, повторному использованию или рециклингу отходов. При проведении работ в контролируемых условиях WtE предпочтительнее захоронения, но все же занимает низкоприоритетную позицию в иерархии отходов [19].

В настоящее время, по мере развития экономики замкнутого цикла, иерархия обращения с отходами дополняется новыми технологиями, инструментами и методами (рисунок 1.4).

Применение экодизайна или экологического проектирования способствует разработке продуктов с минимальным негативным воздействием на окружающую среду и минимальным потреблением природных ресурсов, с применением вторичных материальных ресурсов. При этом минимизируется использование токсичных и опасных материалов, применяются более долговечные и надежные изделия.



Рисунок 1.4 – Иерархия обращения с отходами и современные методы и технологии

Роль технологий энергетической утилизации отходов можно соотнести со следующими элементами систем циркулярной экономики (рисунок 1.1):

- анаэробное сбраживание/компостирование, получение биогаза;
- термическая обработка: совместная переработка отходов, сжигание, пиролиз и газификация отходов; получение RDF- топлива из остатков сортировки.
- размещение (захоронение) отходов: сбор и очистка свалочного газа.

### 1.5. Получение энергии из отходов в рамках экономики замкнутого цикла

При рассмотрении возможности получения энергии из отходов целесообразно принимать во внимание следующие аспекты [19].

Необходима оценка потока отходов, их морфологического и элементного состава, теплотворной способности и определение возможного дополнительного потенциала для повторного использования и переработки определенных фракций отходов. Количество отходов в ближайшие 20 лет во многих городах удвоится, но последовательные планы управления отходами, учитывающие демографические и социальные изменения, часто отсутствуют. В связи с этим необходимо создание территориальных планов управления отходами, которые учитывают среднесрочное и долгосрочное изменение количества отходов, в особенности наиболее важных потоков отходов, их характеристики и варианты переработки. Следует рассмотреть возможность сотрудничества в рамках города, что позволит достичь реальной экономии за счет масштаба.

Успешное применение WtE опирается на эффективную систему обращения с ТКО. Только там, где существует эффективная система сбора, транспортировки отходов и их безопасной конечной утилизации, можно успешно применять проекты энергетической утилизации.

Внедрение технологий WtE требует значительных финансовых ресурсов. Надежное финансирование для строительства, эксплуатации и технического обслуживания оборудования является ключом к устойчивому функционированию установок. Доходы от продажи энергии могут не покрывать расходы, особенно если цены на традиционную энергию достаточно низкие. Поэтому важным фактором, способствующим применению WtE, является применение субсидий и льгот, например, в виде льготных углеродных единиц, применяемых в схеме финансирования.

Эксплуатация технологий WtE требует квалифицированного персонала, который должен быть специально подготовлен и регулярно проходить обучение.

Сами по себе WtE не могут решить существующие проблемы с отходами, они представляют собой только часть функционирующей системы утилизации ТКО. Они должны быть интегрированы в эффективную систему управления отходами.

## **1.6. Технологии переработки отходов с получением энергии: пиролиз, газификация, инсинерация**

Понятие «энергетические технологии» применительно к утилизации отходов относится к семейству технологий, которые перерабатывают отходы для получения энергии в виде тепла, электричества или альтернативных видов топлива, например таких, как биогаз, биоэтанол или RDF-топливо. Сфера применения термина «отходы в энергию» (англ. Waste-to-Energy) очень широка и охватывает целый ряд технологий различного масштаба и сложности, в том числе:

- сбор свалочного газа с производством биометана;
- получение биогаза из органических отходов в биореакторах-метантенках;
- термическое обезвреживание твердых коммунальных отходов на мусоросжигательных заводах в городах;
- переработку отходов путем пиролиза или газификации;
- получение RDF-топлива и его применение на цементных заводах.

Применимость той или иной технологии должна рассматриваться с учетом особенностей потока отходов, их характеристики и особенностей местных условий. Эффективное планирование и инвестирование в различные энергетические технологии утилизации отходов должно базироваться на рассмотрении всех рисков и возможностей, связанных с применением наилучших доступных технологий, учете алгоритма и критериев выбора НДТ, а также проведении технико-экономического обоснования.

### ***1.6.1. Пиролиз отходов***

В настоящее время одним из перспективных направлений энергетической утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является реализация процесса пиролиза. Под пиролизом ТКО понимают процесс термического разложе-

ния ТКО, происходящий без доступа кислорода, при котором сложные органические соединения распадаются на более простые, вплоть до элементов при температуре выше 1500 °С.

При пиролизе масса ТКО разлагается на два продукта – летучие вещества и твердый остаток (пирокарбон). Твердый остаток представляет собой угольно-минеральную композицию, обладающую высокой калорийностью (20–30 мДж/кг), и может использоваться как экологически чистое топливо, а также в качестве адсорбента. Летучие вещества имеют достаточно высокую калорийность (11–12,5 мДж/кг), могут быть использованы как газообразное топливо в топках котлов, технологического оборудования, а также в двигателях внутреннего сгорания. В случае охлаждения летучих веществ, сопровождающегося процессом конденсации, они разделяются на три продукта: смолистое вещество, водяной конденсат и неконденсирующийся газ, каждое из которых может быть практически использовано. Смолистое вещество представляет собой жидкое топливо, близкое по составу к тяжелой нефти, печному топливу, пригодное для переработки на фракции от растворителя и бензина до мазута. Неконденсирующийся газ представляет собой газообразное топливо, пригодное не только для сжигания в топках котлов и технологического оборудования, но и в двигателях внутреннего сгорания для привода электрических генераторов и технологического оборудования. Водяной конденсат – слабый водный раствор различных продуктов пиролиза – пригоден после нейтрализации в качестве технической воды.

Пиролиз ТКО способствует созданию современных малоотходных технологий утилизации ТКО и максимально рациональному использованию природных ресурсов. Даже несмотря на то, что процесс пиролиза более трудоемкий и требует более квалифицированного обслуживания, чем термоокислительное обезвреживание, данная технология считается более перспективной, поскольку при пиролизе количество выбросов, попадающих в атмосферу, значительно меньше чем при традиционном термическом окислении ТКО и, соответственно, меньше загрязнение окружающей среды.

Различают окислительный пиролиз с последующим сжиганием пиролизных газов и сухой пиролиз. Окислительный пиролиз – это процесс термического разложения отходов при их частичном сжигании или непосредственном контакте с продуктами сгорания топлива. Он является одной из стадий процесса газификации. Газообразные продукты разложения отходов смешиваются с продуктами сгорания топлива или части отходов, поэтому на выходе из реактора они имеют низкую теплоту сгорания, но повышенную температуру. Затем смесь газов сжигают в обычных топочных устройствах. При окислительном пиролизе образуется твердый углеродистый остаток (кокс), в то время как при газификации – минеральный продукт (зола, шлак). Кокс можно использовать в качестве топлива или в других целях. Это достаточно универсальный метод для переработки производственных отходов, «неудобных» для сжигания или газификации (пастообразные, вязкие отходы, отработанные шины, кабели, загрязненный маслами, мазутом грунт и т. д.).

Обычно окислительный пиролиз проводят при температуре 600–900 °С. При сжигании газов пиролиза дымовые газы меньше загрязнены сажей и золой, чем при прямом сжигании отходов. Окислительный пиролиз отходов осуществляют во вращающихся барабанных реакторах, в шахтных реакторах с вращающимся подом, в реакторах с псевдоожиженным слоем.

Сухой пиролиз – это метод термического разложения отходов, твердого и жидкого топлива без доступа кислорода. В результате сухого пиролиза отходов образуются пиролизный газ с высокой теплотой сгорания, жидкие продукты и твердый углеродистый остаток, количество и качество которых зависит от состава отходов и температуры процесса. В зависимости от температуры процесса различают три вида сухого пиролиза:

- низкотемпературный пиролиз или полукоксование (450–550 °С), при котором максимален выход жидких продуктов и твердого остатка (полукокса) и минимален выход пиролизного газа с максимальной теплотой сгорания;
- среднетемпературный пиролиз или среднетемпературное коксование (до 800 °С), при котором выход газа увеличивается при уменьшении его теплоты сгорания, а выход жидких продуктов и коксового остатка уменьшается;
- высокотемпературный пиролиз или коксование (900–1050 °С), при котором минимален выход жидких продуктов и твердого остатка и максимален выход пиролизных газов с минимальной теплотой сгорания.

Сухой пиролиз можно осуществлять в реакторах с внешним и внутренним обогревом.

При внешнем обогреве пиролизные газы не подвергаются какому-либо разбавлению газовыми теплоносителями, поэтому характеризуются высокой теплотой сгорания, содержит минимальное количество пыли в связи с отсутствием фильтрации через слой отходов. В реакторах с внутренним обогревом в качестве теплоносителя используют газы, нагретые до 600–900 °С и химически не реагирующие с отходами (инертные и горючие газы, не содержащие кислород). В связи с применением газообразных теплоносителей повышается запыленность продуктового пиролизного газа. Внутренний обогрев конвекцией интенсифицирует процесс пиролиза и позволяет сократить размеры реакторов по сравнению с реакторами с внешним обогревом.

Количество и состав продуктов пиролиза ТКО зависят от их начального состава и условий, при которых происходит сам процесс пиролиза. В зависимости от величины температуры процесса различают низкотемпературный, среднетемпературный и высокотемпературный пиролиз. Низкотемпературный пиролиз протекает при температуре 450–550 °С, сопровождается максимальным выходом твердого остатка, смол, масел (жидких продуктов) и минимальным выходом пирогаза. Его достоинством является относительная простота реализации хранения, транспортировки и уменьшения объема отходов пиролиза, возможность получения тепловой, механической и электрической энергии как для собственных нужд, так и для сторонних потребителей. Среднетемпературный пиролиз протекает при температуре до 800 °С, сопровождается большим выходом пирогаза с меньшей теплотой сгорания и меньшим количеством жидких продуктов и твердого остатка.

Высокотемпературный пиролиз протекает при температуре свыше 900 °С, сопровождается минимальным выходом жидких продуктов и твердого остатка и максимальным выходом пирогаза. По существу, он представляет собой газификацию ТКО. Технология высокотемпературного пиролиза предполагает получение из органической части ТКО синтез-газа с целью его использования для получения тепловой энергии, в том числе в виде водяного пара или горячей воды, механической и электрической энергии. В качестве отходов при этом получают непиролизуемые твердые остатки в виде золы (шлака).

При частичном окислении отходов (ТКО) в процессе термического разложения протекает окислительный пиролиз при их непосредственном контакте с продуктами окисления (сгорания) топлива или отходов. Такой метод применяется при термической утилизации вязких, пастообразных, влажных отходов, шламов, а также отходов, содержащих металлы и соли, которые плавятся и возгоняются при требуемых температурах процесса их термоокислительного обезвреживания.

Проведенные экспериментальные исследования низкотемпературного окислительного пиролиза в среде, состоящей из смеси аргона с 1% кислорода, образца ТКО, содержащего бумагу (43%), текстиль (7,5%), полимерную пленку (7,5%) и пищевые отходы (42%), показали, что процесс изменения образца ТКО в процессе пиролиза можно подразделить на этапы. На первом этапе в области температур 2–220 °С происходит испарение физической и связанной влаги с поверхности пористой структуры материала. При дальнейшем повышении температуры до 320–330 °С происходит термическое разложение вещества и интенсивный выход летучих соединений. При достижении температуры 330 °С происходит снижение скорости выхода летучих соединений. При температуре 540 °С выход летучих веществ заканчивается. При температурах до 220 °С происходят эндотермические процессы испарения влаги. При дальнейшем повышении температуры протекают экзотермические процессы, ярко выраженные при температурах 330 и 470 °С. Затем интенсивность экзотермических процессов уменьшается.

Основными компонентами пиролизного газа в процентах по массе являются  $\text{CH}_4$  (24,11%),  $\text{CO}$  (41,25%),  $\text{H}_2\text{O}$  (18,25%),  $\text{CO}_2$  (16,25%),  $\text{H}_2$  (0,14 %). Содержание прочих компонентов в пиролизном газе не превышает 0,5%. Обычно процентное содержание по массе основных компонентов в сыром неочищенном пиролизном газе из ТКО следующее:  $\text{CH}_4$  – 33–45%,  $\text{CO}$  – 11–18%,  $\text{H}_2$  – 12–28 %,  $\text{CO}_2$  – 1,5–2 %.

Технологическая схема пиролиза ТКО предполагает применение следующих процессов:

- сортировку ТКО с подбором компонентов, пригодных для пиролиза;
- предварительную подготовку подобранных компонентов ТКО перед пиролизом, включая их дробление и высушивание измельченного сырья;
- пиролиз ТКО в реакторе для получения пиролизного газа и пирокарбона;

- получение конечного продукта – пирогаза, жидкого топлива и пирокарбона, включая сепарацию измельченного твердого остатка с разделением на углеродосодержащие компоненты, черные и цветные металлы, охлаждение и конденсацию газообразной смеси пиролизного газа с разделением на горючий газ (пирогаз) и жидкие углеводороды.

Учитывая сложность химических превращений при термическом разложении отходов, расчет пиролиза ТКО производится на основе экспериментальных исследований и опытных данных, полученных на полупромышленных и промышленных установках.

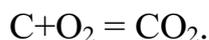
Проведенные экспериментальные исследования термического разложения веществ отдельных морфологических групп ТКО позволили специалистам НИИСК рассчитать прогнозный выход продуктов термического разложения (пиролиза) в целом для органической субстанции ТКО, соответствующей примерной стехиометрической формуле. Пример такого расчета приводится в разделе 3.8.

### ***1.6.2. Газификация отходов***

Газификация отходов предназначена для переработки твердых, жидких и пастообразных отходов с получением горючего газа, смолы и шлака. Ее осуществляют на воздушном, паровоздушном и парокислородном дутье в механизированных шахтных газогенераторах с вращающимися колосниковыми решетками и твердым шлакоудалением, в газогенераторах с псевдоожиженным слоем и т.д.

Превращение ТКО в горючий газ, осуществляемое при взаимодействии с кислородом и водяным паром при температуре 900–1000 °С, называется газификацией. Существуют различные методы газификации, осуществляемые в специальном оборудовании – газификаторе.

Рассмотрим простейший «прямой» метод газификации. ТКО загружаются в камеру цилиндрической формы, имеющую снизу колосниковую решетку, через которую поступает воздух. Кислород воздуха взаимодействует с углеродом, входящим в состав ТКО, с выделением теплоты химической реакции и образованием диоксида углерода:



Пространство, в котором осуществляется эта реакция, называется «зоной горения» (таблица 1.1). Высота этой зоны составляет около 120–150 мм, область температур – 1200–1300 °С.

Полученные высокотемпературные газы поднимаются вверх и нагревают вышерасположенные слои ТКО до температуры около 1000–1100 °С. При этом происходит взаимодействие диоксида углерода с раскаленным углеродом и восстановление его до оксида углерода (основная составляющая генераторного газа). Эта реакция происходит с поглощением теплоты:

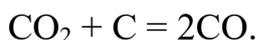
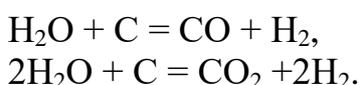


Таблица 1.1 – Зоны камеры газификации

Зона	Температура, °С	Высота камеры, мм
Зона подсушки	400–200	
Зона сухой перегонки	400–600	200–800
Зона восстановления	1000–1100	120–150
Зона горения	1200–1300	

Одновременно с этим также происходит взаимодействие паров воды, содержащейся в ТКО, с раскаленным углеродом с образованием оксида, диоксида углерода и водорода:



Зона, где происходит восстановление диоксида углерода до оксида углерода, образование водорода, называется «восстановительной зоной» и занимает по высоте около 200–800 мм. Еще выше расположена «зона сухой перегонки», где при температуре около 400–500 °С ТКО подвергаются сухой перегонке без доступа кислорода, с образованием газовой смеси, включающей окись углерода, водород, диоксид углерода, азот, метан и др.

Верхние слои ТКО, прогреваясь потоком проходящих газов, подсушиваются. Поэтому эта зона называется «зоной подсушивания».

ТКО по мере термохимической обработки перемещаются сверху вниз, обеспечивая непрерывное получение генераторного газа. Полученный генераторный газ в смеси с воздухом может быть использован в качестве топлива в ДВС, КУ, а также в использующем топливо технологическом оборудовании (печи, сушильные установки и др.). Недостатком генераторного газа является возможное загрязнение смолами и иными вредными веществами в зависимости от состава ТКО, что требует предварительной очистки перед использованием.

По сравнению с методом сжигания получаемые горючие газы и смола могут быть использованы в качестве топлива и как химическое сырье, сокращаются выбросы золы и сернистых соединений в атмосферу. Процесс газификации пригоден для переработки ограниченного числа отходов, причем только дробленых, сыпучих, газопроницаемых. Пастообразные, крупногабаритные твердые отходы, плавящиеся при низких температурах, трудно перерабатывать.

### **1.6.3. Инсинерация отходов**

Наиболее распространенным методом термодеструкции отходов является инсинерация (сжигание, или огневой метод), используемая для утилизации и обезвреживания жидких, твердых, пастообразных отходов. Цель инсинерации отходов заключается в обезвреживании отходов, направленном на уменьшение

их массы, изменение состава, физических и химических свойств для снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду. Утилизации отходов посредством сжигания направлена на получение энергии, выделяемой при горении отходов или их компонентов.

Метод инсинерации применяется на современных предприятиях и считается наиболее универсальным, надежным и эффективным по сравнению с другими термическими методами утилизации и обезвреживания отходов. В мировой практике сжигание отходов подразделяется на пять групп, имеющих свои технологические особенности [14]:

- сжигание смешанных коммунальных (муниципальных) отходов; представляет собой термическую обработку смешанных и практически необработанных коммунальных отходов, образующихся в жилом секторе; иногда применяется совместное сжигание таких отходов с промышленными отходами;
- сжигание коммунальных или других отходов, предварительно подготовленных к сжиганию, т.е. отходов, собранных в системе раздельного сбора, предварительно обработанных для повышения их теплотворной способности;
- сжигание опасных отходов на промышленных объектах, где эти отходы образовались, или специализированных заводах;
- сжигание осадков сточных вод на специализированных установках или на установках для сжигания отходов (вместе с другими отходами, например, коммунальными);
- сжигание медицинских отходов на специализированных установках.

Оборудование, которое можно применять для термического обезвреживания отходов, достаточно широко применяется в энергетике для сжигания твердого топлива: слоевые печи; печи с псевдоожиженным слоем; вращающиеся печи; циклонные печи; шахтные печи; печи с жидкой ванной расплава; подовые печи.

#### ***1.6.4. Технологии мусоросжигательных заводов***

Наиболее распространенным применением WtE на сегодняшний день является переработка твердых коммунальных отходов после предварительной сортировки сжиганием на мусоросжигательных заводах и тепловых электростанциях (ТЭС) (рисунок 1.5) [20]. На уровень образования ТКО влияют экономическое развитие, степень индустриализации страны, привычки населения и местный климат. В свою очередь, все эти факторы влияют на принятие обществом строительства мусоросжигательных заводов и применения соответствующих технологий.

Процесс выработки электроэнергии на заводе по сжиганию отходов аналогичен процессу получения энергии на ТЭС и состоит из семи этапов [20]:

1. Отходы сбрасываются из мусоровозов в приемный бункер.
2. Кран-манипулятор захватывает отходы и сбрасывает их в камеру сгорания.
3. Отходы совместно с топливом сгорают, выделяя тепло.
4. Нагревание превращает воду в пар в котле.

5. Пар под высоким давлением вращает лопасти турбогенератора, вырабатывая электроэнергию.
6. Система очистки выбросов и контроля загрязнения воздуха удаляет загрязняющие вещества из продуктов сгорания перед их выбросом через дымовую трубу.
7. Зола собирается из котла и системы очистки выбросов и утилизируется.

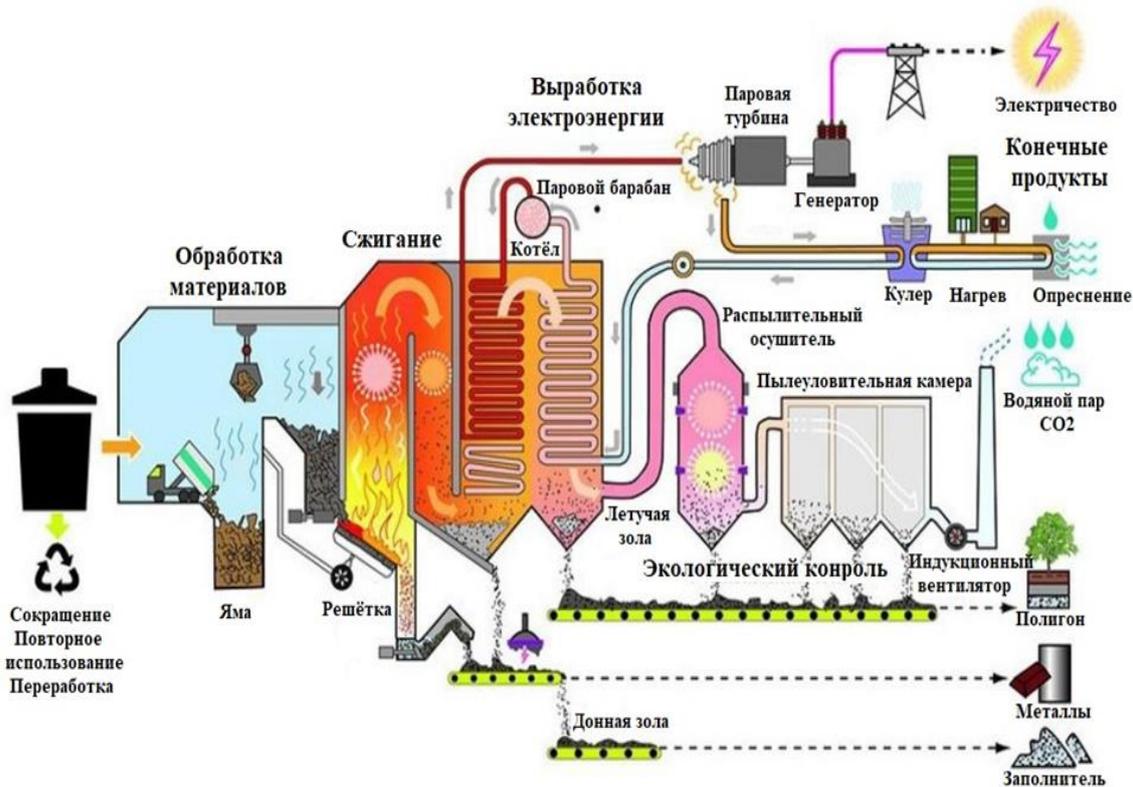


Рисунок 1.5. Завод по переработке отходов в энергию сжиганием (цит. по [20])

Совместное сжигание с другим топливом, обычно с углем или биомассой, позволяет легче контролировать теплотехнические свойства топлива, в частности, низшую теплотворную способность. Кроме того, совместное сжигание является хорошей альтернативой простому сжиганию угля, как с точки зрения затрат, так и с точки зрения уровня выбросов в атмосферу.

Начиная с 2020 г., после принятия Федерального закона от 27.12.2019 № 450-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», энергетическая утилизация относится к регулируемым видам деятельности в области обращения с твердыми коммунальными отходами, и рассматривается как «возобновляемый источник энергии (вторичных энергетических ресурсов) после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки», что создает благоприятные условия для строительства как мусоросжигательных заводов, так и ТЭС, работающих на сжигании ТКО [21]. Однако строящиеся объекты должны удовлетворять требованиям экологической безопасности и принципам наилучших доступных технологий.

Ожидается, что отечественные предприятия энергетической утилизации ТКО будут иметь энергоэффективность не более 65%. При этом работа в теплофикационном режиме с отпуском тепла потребителю в России в настоящее время проблематична, и наиболее вероятно, что наибольшее распространение получат конденсационные ТЭС с энергоэффективностью при работе на ТКО не более 45%. Повышение энергетической эффективности ТЭС может быть реализовано за счет сжигания RDF-топлива – как отдельно, так и совместно с ТКО или углем. Возможность достижения более высокой тепловой мощности является основным преимуществом применения RDF-топлива из остаточных фракций отходов после сортировки. RDF имеет более высокое и равномерное теплосодержание, чем ТКО, и поэтому является эффективным для энергопроизводства.

На современных мусоросжигательных заводах достигается 95%-ный уровень полноты сжигания, что значительно снижает объемы полигонного захоронения. Несгоревший остаток не содержит разлагающихся органических веществ, вызывающих эпидемии и самопроизвольное возгорание. В ряде стран ЕС – Германии, Бельгии, Швеции, Голландии, Австрии и Дании – доля отходов, направляемых на свалки, составляет около 1–2%; около 35–50% отходов утилизируется с получением энергии путем сжигания на мусоросжигательных заводах; 50–60% рециклируется и компостируется. В этих странах полигонное захоронение отходов без предварительной обработки законодательно запрещено [22].

Несмотря на широкое распространение энергетической утилизации ТКО в мире, в настоящее время в России работают только три завода в Москве с суммарной установленной электрической мощностью 26, 6 МВт. Предусматривается строительство четырех ТЭС в Московской области электрической мощностью 70 МВт каждая с производительностью по ТКО 700 тыс. т/год [23].

Для очистки дымовых газов на мусоросжигательных заводах в России применяются трехступенчатые системы, в основном, зарубежного производства: 1) абсорбция кислых компонентов дымовых газов известью в присутствии мелкодисперсных водяных капель; 2) глубокая очистка от летучей золы в рукавном фильтре и сорбция тяжелых металлов и диоксинов в процессе фильтрования через слой извести и активированного угля на фильтровальной ткани; 3) восстановление оксидов азота до молекулярного азота с использованием аммиачной воды [14].

Неорганические вредные вещества, такие как тяжелые металлы, которые не обезвреживаются даже при высоких температурах, в многоступенчатой установке для очистки дымовых газов и при переработке остатков от сжигания должны выделяться в концентрированном виде, извлекаться и связываться. После этого обращение с ними должно осуществляться экологически безопасным способом. Образующиеся при сжигании малоопасные шлаки могут быть безопасно утилизированы.

По мнению экспертов, развитие энергетической утилизации ТКО в России возможно на основе изучения и адаптации зарубежного опыта и при взаимодействии энергетиков и экологов.

### 1.6.5. Твердое топливо, получаемое из отходов

RDF-топливо (англ. Refuse Derived Fuel) – это топливо, которое производится из горючих компонентов ТКО. Для получения RDF отходы, собираемые с промышленных или коммерческих объектов, измельчают, сушат, прессуют и затем сжигают для производства электроэнергии. Производное топливо из отходов – это возобновляемый источник энергии, благодаря которому отходы не выбрасываются на свалку, а используются с пользой [9].

Схема производства RDF показана на рисунке 1.6 [9].



Рисунок 1.6 – Схема производства RDF-топлива

Стандартная линия переработки включает оборудование для сортировки (аэро-, магнитная, оптическая сепарации и грохочение), измельчения и сушки. Затем RDF может быть отправлен непосредственно потребителю или гранулирован перед транспортировкой.

Производственная линия включает элеватор, первичную дробилку, металлический сепаратор, вторичную дробилку, аэросепаратор и третичную дробилку, сепаратор цветных металлов, четвертичную дробилку и роторную сушилку, а также скруббер-мойку для очистки газов. Элеватор – это емкость для накопления ТБО. Первичная дробилка необходима для измельчения любых отходов, которые могут оказаться в сырье. Металлосепаратор установлен для удаления черных металлов. Вторичная дробилка предназначена для получения частиц ТБО размером 60 мм. Аэросепаратор разделяет ТБО на две группы – низкой и высокой плотности. Третичная дробилка уменьшает размер частиц до 40 мм. Сепаратор цветных металлов необходим для второго этапа разделения металлов и предназначен для удаления из потока цветных металлов, таких как медь и алюминий. Четвертичная дробилка

уменьшает размер частиц до 25 мм. Роторный осушитель предназначен для снижения влажности, что приводит к увеличению теплотворной способности.

В мировой практике RDF используется двумя способами: как топливо для цементных и металлургических заводов, где оно сжигается для получения тепловой энергии, необходимой для производства, а также для сжигания на ТЭЦ или в районных котельных для целей отопления.

Таблица 1.2 – Элементный состав RDF на рабочую массу, %

Элемент	Состав на рабочую массу, %
Углерод	33,875–49,98
Кислород	26,258–38,8
Водород	4,47–7,53
Азот	0,58–0,789
Сера	0,16–0,313
Зольность	2,94–17,3
Влага	8,54–25,5

В последние годы RDF более часто используется в качестве альтернативного топлива на цементных заводах в России и в Европе (таблица 1.2). На цементном производстве в Германии до 90% всего топлива составляет RDF [5]. Опыт стран Европейского Союза показывает, что до 70% основного технологического топлива, используемого для обжига клинкера на цементных заводах, может быть заменено топливом RDF. Сжигание в цементных печах оказывает меньшее воздействие на окружающую среду, так как процессы происходят при температуре до 1700 °С. Считается, что такой уровень температуры минимизирует содержание вредных веществ в отходящих газах [2] за счет термического разложения сложных и опасных продуктов сгорания. Эффективное разрушение диоксинов при термическом разложении (эффективность 99,9997%) возможно только при температуре выше 1100–1200 °С, скорости потока воздуха до 1,2 и времени пребывания газов в объеме печи до 2 с [1].

Применение RDF на предприятиях по производству цемента позволит сократить природный газ на 15–25% при потреблении 80–250 тыс. т RDF в год [10]. Сторонники топлива из отходов считают, что это прекрасная альтернатива ископаемому топливу, которая поможет не только сохранить невозобновляемые ресурсы, но и сократить захоронение отходов на полигонах и достичь целей национального проекта «Экология». Характеристики некоторых материалов, используемых в качестве альтернативного топлива приведены в таблице 1.3 [10].

Альтернативное топливо из твердых отходов имеет среднюю теплотворную способность 4000–4500 ккал/кг, что сопоставимо с теплотворной способностью угля и газа. Например, 2 кг RDF заменяют 1 м<sup>3</sup> природного газа. Средний цементный завод может потреблять от 40 до 100 тыс. тонн/год RDF при замене до 30%

основного топлива. Себестоимость производства 1 т RDF, при условии использования автоматической линии сепарации, не превышает 500 руб.

Таблица 1.3– Материалы, пригодные для производства RDF

№	Материал	Теплотворная способность $Q$ , ккал/кг	Влажность, $W$ , %	Содержание золы, $A$ , %
1	RDF из смеси полимеров и бумаги из твердых отходов	4300–4800	15–20	10–22
2	Полимеры НР, ND, РР чистые	9500		0,5–2
3	Твердая макулатура	3950	20–30	8
4	Картон из ТБО	3220	20–30	8
5	ТБО	От 1800	30–50	до 30
6	Автомобильные шины	7650		7
7	Торф	2600	40	11
8	Тростник	4109	9,85	2,6
9	Древесные опилки	4587	6,53	1,4
10	Пеллеты из рапсовой соломы	3848	10,8	5,2
11	Брикеты из конского навоза / гранулы с опилками	4321	7,83	3,5
12	Куриный помет	3823	13	9,4
13	Гранулы из шелухи подсолнечника	4819	8,22	5,64

В Российской Федерации уже сложился рынок RDF. Цена, которую цементный завод готов заплатить за 1 тонну RDF, сегодня колеблется от 700 до 1500 руб. С ростом тарифов на электроэнергию цена на RDF также будет расти. Стоимость полуавтоматической линии переработки твердых бытовых отходов с возможностью отделения до 25% вторичного сырья и производства RDF, мощностью 150 тыс. т/год, составляет от 4 до 8 млн евро в зависимости от комплектации и других факторов.

Учитывая ограниченное финансирование мусороперерабатывающей отрасли в России, производство топлива из отходов становится перспективным направлением для сокращения захоронения ТКО при минимальных затратах, так как метод позволяет безопасно восстанавливать энергию в существующих цементных печах и прекальцинаторах. Со своей стороны, цементная промышленность стремится к

снижению расходов на топливо, которые составляют около 20% от общей себестоимости производства. В связи с этим замена ископаемого топлива на топливо из отходов является взаимовыгодным решением, объединяющим интересы как цементной, так и мусороперерабатывающей промышленности.

Применение альтернативного RDF/SRF топлива возможно практически во всех высокотемпературных агрегатах:

- во вращающиеся печи топливо из отходов подается в зону горелки, замещая природный газ;
- в доменные печи топливо из отходов подается в фурменную зону печи, замещая кокс и природный газ;
- в коксовые батареи топливо из отходов можно подавать поверх шихты или добавлять в шихту, тем самым увеличивая получение кокса, коксового газа, бензола и смолы [17].

### *1.6.6. Экологические аспекты энергетических технологий*

Под экологическими аспектами в соответствии с определением, данным в международном стандарте ГОСТ Р ИСО 14001-2016, понимают любой элемент деятельности организации, ее продукции или услуг, который может взаимодействовать с окружающей средой [24]. В соответствии с рекомендациями ИТС НДТ 9-2020, при энергетической утилизации отходов различают две группы экологических аспектов – прямого и косвенного воздействия на окружающую среду и здоровье человека [14].

К экологическим аспектам прямого воздействия относятся: выбросы в атмосферу; сбросы сточных вод в водные объекты; образование вторичных отходов; хранение (накопление) утилизируемых и обезвреживаемых отходов и применяемых реагентов, в том числе опасных; шум и запахи. К экологическим аспектам косвенного воздействия относятся: эффективность системы управления охраной окружающей среды; компетентность персонала в вопросах охраны окружающей среды; контроль и мониторинг воздействия на окружающую среду (наличие, достаточность, качество измерительного и контролирующего оборудования); потребление сырья и материалов; потребление энергоресурсов и др.

К значимым экологическим аспектам WtE относятся выбросы в атмосферу, опасность которых существенно зависит от компонентного состава и классов опасности отходов, а также от потребления энергоресурсов. ИТС НДТ 9-2020 определяет перечень контролируемых маркерных веществ в выбросах в атмосферный воздух (таблица 1.4).

К значимым экологическим аспектам также следует отнести количество и классы опасности отходов, которые образовались в результате утилизации и обезвреживания отходов. Зола и шлак, образующиеся при сгорании отходов, должны быть размещены на специализированных объектах, обустройство которых должно обеспечить защиту окружающей среды от возможного воздействия токсичных компонентов этих отходов, или повторно использованы для производства продукции или выполнения работ.

Таблица 1.4 – Перечень маркерных веществ при термической утилизации отходов [14]

Наименование загрязняющего вещества	Класс опасности	Класс отходов, подлежащих утилизации и обезвреживанию*
Азота оксид, азота диоксид	III	1–5
Серы диоксид	III	1–3, 5
Углерода оксид	IV	1–5
Углеводороды предельные C12 — C19	IV	1, 2, 5
Взвешенные вещества	III	1–5
Бензапирен	I	1–5
Хлористый водород	II	3,4
Фтористый водород	II	1–3, 5
Диоксины (полихлорированные дибензо- <i>p</i> -диоксины и дибензофураны) в пересчете на 2,3,7,8-тетрахлордибензо-1,4-диоксин	I	1–5
Ртуть и ее соединения, кроме диэтилртути	I	1–3, 5
Кадмий и его соединения, таллий и его соединения	I	1–3, 5
Мышьяк, свинец, кроме тетраэтилсвинца, в пересчете на свинец, хром (Cr 6+), кобальт, медь, оксид меди, сульфат меди, хлорид меди (в пересчете на медь), марганец, никель, оксид никеля (в пересчете на никель), Ванадия пяти оксид, сурьма и ее соединения		1–3, 5

\*) Класс отходов, подлежащих утилизации и обезвреживанию термическими способами: 1 – отходы, содержащие в своем составе органические и неорганические вещества; 2 – отходы, которые кроме веществ первой группы содержат соединения азота; 3 – отходы, содержащие органические соединения элементов S, P, Cl, F; 4 – отходы, при утилизации и обезвреживании которых образуются NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KCl; 5 – отходы, содержащие органические вещества, элементы, их окислы, соли или органические соединения элементов.

Уровень потребления энергоресурсов в значительной степени зависит от вида отходов.

Помимо газообразных продуктов, при сжигании отходов образуются и твердые частицы – металлы, стекло, шлаки и др., которые требуют дальнейшей утилизации или захоронения. При сжигании молекулы органических соединений разрушаются, а неорганические соединения превращаются в оксиды и карбонаты, которые выводятся вместе со шлаками и золой. Мелкодисперсные частицы оксидов и карбонатов, содержащиеся в топочных газах, улавливаются в различных газоочистных установках, например, в скрубберах, электрофильтрах, тканевых фильтрах и др. [14, 25].

Термодеструкция отходов на современном уровне развития науки и техники обеспечивает практически полное разрушение находящихся в отходах органических вредных веществ и продуктов их неполного разложения, что достигается с помощью высоких температур (более 1000 °С), времени пребывания газов в горячей зоне не менее двух секунд и турбулентности пламени при концентрации кислорода не менее 6%. Это относится и к диоксидам и фуранам, которые разрушаются более чем на 90%. При температуре 850 °С диоксины расщепляются на их составные части. При охлаждении дымовых газов существует возможность того, что часть образовавшихся фрагментов снова соединится. Для их надежного отделения применяются рукавные фильтры в системе очистки дымовых газов с возможностью дополнительной подачи порошкообразного активированного угля и, как результат, эффективной сепарации всех диоксинов и фуранов [26–28].

Сравнительные эколого-экономические показатели энергетических технологий обращения с отходами представлены в таблице 1.5 [29].

Пиролиз без использования кислорода или с недостатком кислорода в условиях эндотермического процесса протекает с использованием внешней энергии, получаемой за счет сжигания пирогаза, который используется для поддержания процесса. Такой подход позволяет существенно снизить объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Пиролизное масло может в дальнейшем использоваться как топливо для пиролизной установки или направляться на ректификацию с получением продукции различного качества и степени очистки (например, средних дистиллятов). Образующийся при этом коксовый остаток имеет высокую плотность, а при качественной предварительной сортировке твердый остаток может быть ценным продуктом, что резко уменьшает объем образующихся отходов. В связи с этим метод пиролиза в настоящее время рассматривается как наиболее «чистый».

Технология плазменной газификации по сравнению с методом сжигания и пиролизом является наиболее затратной, так как требует больше энергии на переработку отходов, очистку отходящих газов и имеет низкий выход полезного продукта. Данный фактор делает применение плазменной газификации оправданным только при обращении с опасными отходами. Обезвреживание отходов методом сжигания, на первый взгляд, отличается низкими затратами, но требует более тщательной обработки отходов, по сравнению с методом пиролиза [29].

Необходимо отметить, что в условиях Российской Федерации технологии пиролиза и плазменной газификации прошли апробацию на экспериментальных и опытно-промышленных установках, но пока еще не имеют широкого распространения, необходимого для переработки больших объемов отходов.

Таблица 1.5 – Эколого-экономические показатели технологий энергетической утилизации отходов [29]

Показатель	Сжигание	Пиролиз	Газификация
Экологические аспекты			
Продолжительность полного обезвреживания 1 т отходов, ч	1	1	1
Образование отходов производства, % от массы отходов	Зола, шлак 23–28	Коксовый остаток 25–30	Мелкодисперсная пыль, возгоны тяжелых металлов 15–20
Загрязнение почвы	Шлак	Коксовый остаток	Нет
Загрязнение грунтовых вод	Нет	Нет	Нет
Загрязнение атмосферы (при наличии очистки)	В пределах нормы	В пределах нормы	Тяжелые металлы
Энергия и вторичные продукты			
Тепловая энергия, МВт-ч/т	1,60	1,20	-
Электрическая энергия, МВт-ч/т	1,40	0,30	0,5
Вторичные ресурсы, % от массы отходов	-	5–10	15–20
Калорийность синтез-газа, МДж/м <sup>3</sup>	-	12–30	1,5–12,5
Окупаемость производства, год	1,5–3	3–6	5–10
КПД, %	30	88–90	80–90

Применительно к технологиям WtE негативную роль играет слабое развитие селективного сбора твердых коммунальных отходов и опасных отходов, которые попадают в ТКО. Низкая эффективность сортировки ТКО не позволяет снизить вероятность попадания в отходы, направляемые на сжигание или пиро-

лиз, опасных отходов потребления, например, таких, как ртутные лампы, батарейки, аккумуляторы и др. Эти факторы создают серьезные трудности для широкого применения термических способов обращения с ТКО, в том числе в части обеспечения допустимых уровней воздействия на окружающую среду.

### Вопросы для самопроверки

1. В чем отличие линейной экономики от экономики замкнутого цикла?
2. Какие современные методы и технологии применяются в иерархии обращения с отходами?
3. Почему сокращение источников образования является наиболее приоритетным направлением в иерархии обращения с отходами?
4. Какова роль бизнес-моделей в экономике замкнутого цикла?
5. Какие базовые принципы должны применяться при выборе энергетических технологий утилизации отходов?

### Литература к главе 1

1. Антропоцен: научные споры, реальные угрозы. – Курьер ЮНЕСКО. Множество голосов, один мир. – 2018, №2. – URL: <https://ru.unesco.org/courier/2018-2/antropocen-nauchnye-sporu-realnye-ugrozy>
2. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р – URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>
3. Внедрение экономики замкнутого цикла в отраслях экономики. – М. РЭО, 2022. – URL: <https://reo.ru/ezc/docs>
4. Цели в области устойчивого развития ООН. – 2015. – URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>
5. Towards the circular economy: an economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation. – Vol.1, 2013. – 98 p. – URL: <https://emf.thirdlight.com/file/24/xTyQj3oxiYNMO1xTFs9xT5LF3C/Towards%20the%20circular%20economy%20Vol%201%3A%20an%20economic%20and%20business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf>
6. Циркулярная экономика: концептуальные подходы и инструменты их реализации. Монография для специалистов органов государственного управления, бизнеса и заинтересованной общественности / Н. Батова [и др.] ; под общ. ред. С. Дорожки, А. Шушкевича ; Internationales Bildungs- und Begegnungswerk (IBB) Dortmund gGmbH. – Минск: Медисонт, 2020. – 212 с. – URL: [https://ibbd.org/uploads/2021/04/Tsirkuliarnaya-ekonomika\\_fin.pdf](https://ibbd.org/uploads/2021/04/Tsirkuliarnaya-ekonomika_fin.pdf)

7. OECD (2019): Business Models for the Circular Economy: Opportunities and Challenges for Policy [Electronic resource] // OECD Publishing, Paris. — 2019. — 12 p. — URL: <https://www.oecd.org/environment/waste/policy-highlights-business-models-for-the-circular-economy.pdf>
8. Towards the Circular Economy, Opportunities for the Consumer Goods Sector. Ellen MacArthur Foundation. — Vol. 2, 2013. — 112 p. — URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods>
9. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды и отдельные законодательные акты Российской Федерации» — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201407220035>
10. ГОСТ Р 113.00.03-2019 «Наилучшие доступные технологии. Структура информационно-технического справочника» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169326>
11. ГОСТ Р 113.00.04-2020 «Наилучшие доступные технологии. Формат описания технологий» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200171645>
12. ГОСТ Р 54097-2010. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации — URL: <https://meganorm.ru/Data/510/51033.pdf>
13. Бюро наилучших доступных технологий. Информационно-технические справочники — URL: <https://burondt.ru/itc>
14. ИТС 9-2020 Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами — URL: [http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1500&etkstructure\\_id=1872](http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1500&etkstructure_id=1872)
15. Паспорт федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» — URL: [https://news.solidwaste.ru/wpcontent/uploads/2022/07/EZTs\\_pasport.pdf](https://news.solidwaste.ru/wpcontent/uploads/2022/07/EZTs_pasport.pdf)
16. Абрамченко В., Мантуров Д.В., Козлов А.А. Экологическая безопасность. Обращение с отходами. — 2022. — URL: <http://government.ru/rugovclassifier/516/events/>
17. Паспорт отраслевой программы «Применение альтернативного топлива из отходов в промышленном производстве на 2022–2030 гг.» . — URL: <https://news.solidwaste.ru/2023/01/pasport-otraslevoj-programmy-primenenie-alternativnogo-topliva-iz-othodov-v-promyshlennom-proizvodstve-na-2022-2030-gody/>
18. Экология производства. Вице-премьер Виктория Абрамченко утвердила Паспорт отраслевой программы «Применение альтернативного топлива из отходов в промышленном производстве». — Экология производства 10.01.2023 — URL: <https://news.ecoindustry.ru/2023/01/vitse-premer-viktoriya-abramchenko-utverdila-pasport-otraslevoj-programmy-primenenie-alternativnogo-topliva-iz-othodov-v-promyshlennom-proizvodstve-na-2022-2030-gody/>
19. Dieter Mutz D., Hengevoss D., Hugi H.-J., Hinchliffe D. Waste-to-energy options in municipal solid waste management. A guide for decision makers in developing and emerging countries. Technical Report. May 2017. — URL:

- <https://www.giz.de/en/downloads/GIZ%20WasteToEnergy%20Guidelines%202017.pdf>
20. Biomass explained. Waste-to-energy. Municipal Solid Waste plants. – December 2022. – U.S. Energy Information Administration. – URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/waste-to-energy-in-depth.php>
  21. Федеральный закон от 27 декабря 2019 г. N 450-ФЗ "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_341787/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_341787/)
  22. Никуличев Ю.В. Управление отходами. Опыт Европейского союза. Аналит. обзор / РАН. ИНИОН. Центр науч.-информ. исслед. глоб. и регионал. пробл. Отд. проб. европ. безопасности. – М., 2017. – 55 с. — URL: [http://inion.ru/site/assets/files/1109/nikulichev\\_upravlenie\\_otkhodami.pdf](http://inion.ru/site/assets/files/1109/nikulichev_upravlenie_otkhodami.pdf)
  23. Тугов А.Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор). – Теплоэнергетика, 2021, № 1. – С. 3–20. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=tepen&year=2021&vol=2021&iss=1&file=ТерEn2101018Tugov.pdf>
  24. ГОСТ Р ИСО 14001-2016 Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293755/4293755229.pdf>
  25. Ершов А.Г. Термическое обезвреживание отходов: теория и практика, мифы и легенды / А.Г. Ершов, В.Л. Шубников, Л.А. Шульц // Журнал ТБО. – 2014. – № 6. – С. 54–60.
  26. Бернадинер И.М. Диоксины и другие токсиканты при высокотемпературной переработке / И.М. Бернадинер. – М.: ИД МЭИ, 2007.
  27. Ладыгин К.В. К вопросу предварительной оценки и методов снижения содержания диоксинов в отходах установок термоокислительного обезвреживания медицинских отходов / К.В. Ладыгин, Н.Д. Осветицкая, Ю.А. Рахманов // Научный журнал НИУ ИТМО, Серия «Экономика и экологический менеджмент». — № 1 2014.
  28. Ершов А. Г. Диоксинофобия: факты и домыслы / А.Г. Ершов, В.Д. Шубников // ЭкоПрогресс. – 2009. – № 9. – С. 26–32.
  29. Хантимирова С.Б., Мишустин О.А., Грачева Н.В., Желтобрюхов В.Ф. Анализ и обоснование выбора способа переработки отходов производства и потребления. – Инженерный вестник Дона, №1, 2019. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-obosnovanie-vybora-sposoba-pererabotki-othodov-proizvodstva-i-potrebleniya/viewer>

## Глава 2. БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Энергия может быть извлечена из отходов в результате биохимических процессов путем биоразложения отходов в энергетическое топливо, которое может быть использовано для различных целей. Биоэнергетика является наиболее перспективным видом возобновляемой энергии в России и имеет огромный потенциал использования органических отходов – отходов сельского хозяйства, деревообработки, пищевой промышленности и муниципальных очистных сооружений.

Получение жидкого биотоплива, в частности, биоэтанола и биодизеля в настоящее время является одними из самых популярных альтернатив традиционному топливу. Биоэтанол производится из любого растительного материала с высоким содержанием крахмала или целлюлозы, и в качестве конечного продукта представляет собой спирт с максимальной крепостью около 95°. Биодизель представляет собой смесь жирных кислот, которые легко воспламеняются. Поскольку вопросы охраны окружающей среды в настоящее время являются одними из наиболее актуальных в повестке дня стратегического развития энергетического сектора всех стран, представляется целесообразным изучить все аспекты использования жидкого биотоплива и определить дальнейшие перспективы его производства [1].

Различают два поколения биотоплива в зависимости от методов производства. Первое поколение – самое простое по способу производства, используется во многих странах. Оно производится из культур с высоким содержанием сахара и масла. Ко второму поколению относится биотопливо, которое производится из непищевого сырья, выращиваемого специально, а также пищевых и сельскохозяйственных отходов в качестве сырья для энергетической промышленности (рисунки 2.1) [2].

Жидкое биотопливо имеет много преимуществ:

- при использовании этого вида топлива выбросы CO<sub>2</sub> значительно ниже, чем при использовании его традиционных аналогов;
- при утечке и попадании на биологические объекты по другим причинам биотопливо не наносит им вреда и почти полностью подвержено разложению в воде;
- сырьем служат возобновляемые отходы;
- использование биотоплива позволит странам, не имеющим больших запасов топлива, сохранить свой экономический суверенитет;
- высокие смазывающие свойства, что увеличивает срок службы оборудования;
- высокая температура воспламенения (150°) делает его вполне безопасным.

По данным Международного энергетического агентства, производство биотоплива в мире показано на рисунке 2.2 [3].

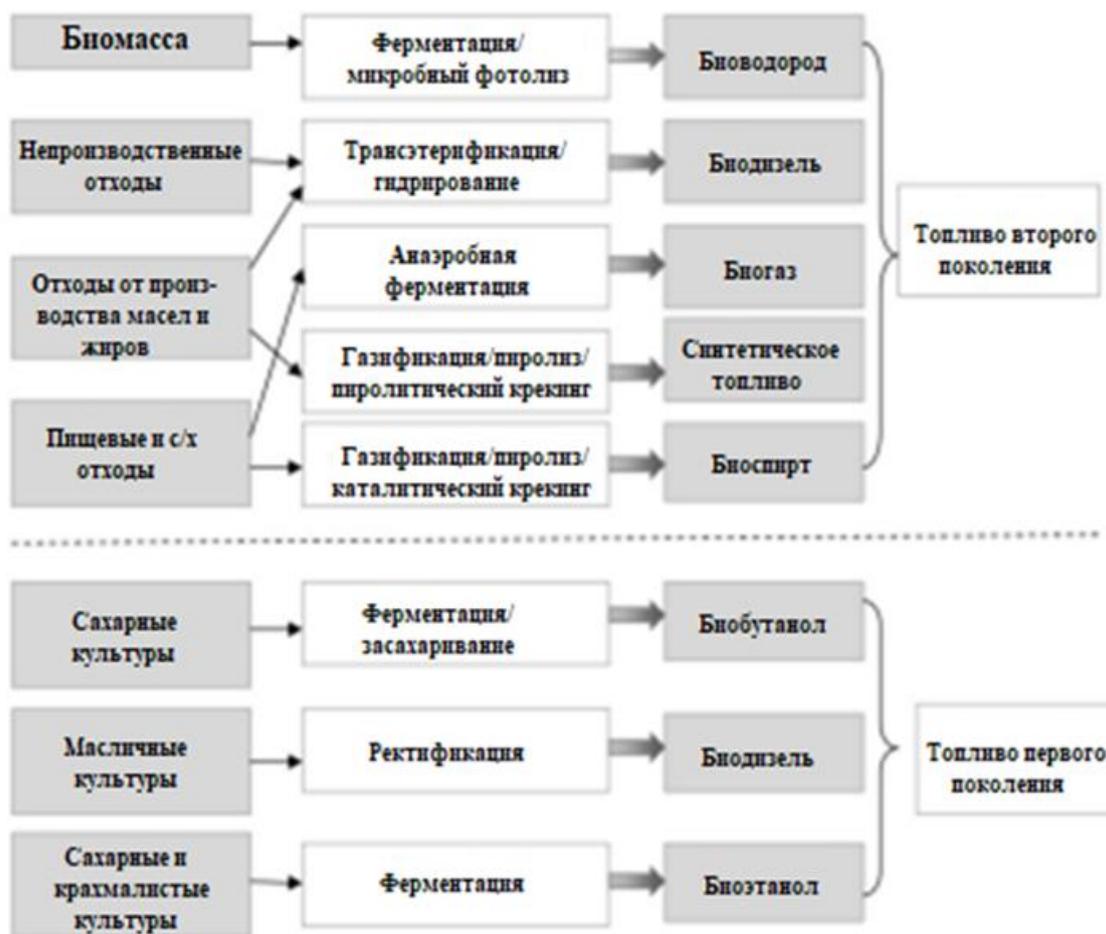


Рисунок 2.1 – Производство жидкого биотоплива первого и второго поколений

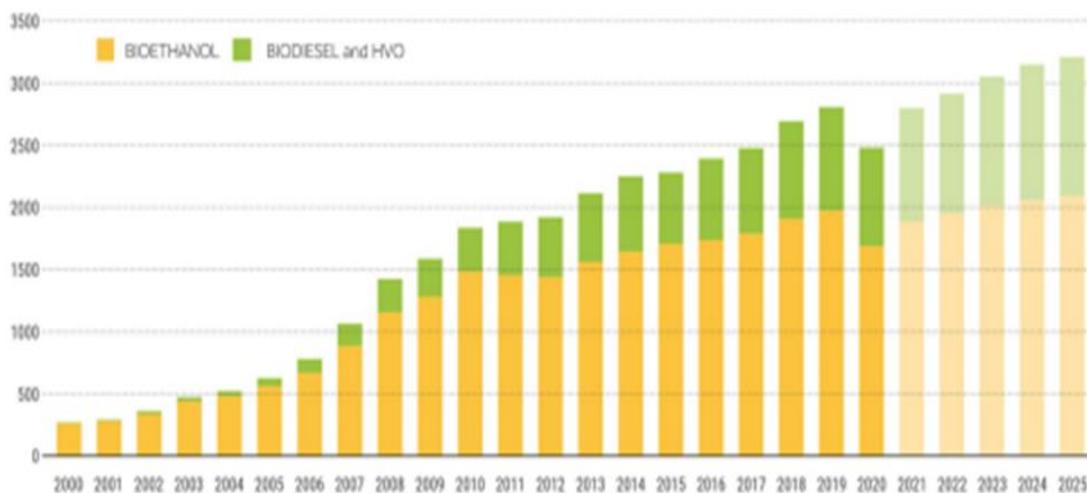


Рисунок 2.2 – Производство биотоплива в мире, тыс. баррелей в день

В России имеется достаточное количество посевных площадей для производства сырья для биотоплива, однако есть и другие аспекты, которые этому препятствуют. Так, в России нет единой государственной стратегии по использова-

нию и производству жидкого биотоплива, поэтому отсутствует системная поддержка этой отрасли, что ослабляет как координацию производства, так и его организацию.

Наряду с традиционными способами переработки органических отходов, такими как анаэробное сбраживание с получением биогаза и биометана, жидкого биоэтанола и биодизеля, аэробная ферментация или компостирование, в последние годы появились и начинают получать распространение новые виды биоэнергии – темновая ферментация и фотоферментация для получения биоводорода и микробный топливный элемент [4].

Темновая ферментация и фотоферментация – это технологии, позволяющие превращать органические субстраты в водород при отсутствии или присутствии света соответственно, благодаря перерабатывающей активности различных групп бактерий.

Микробный топливный элемент – это устройство, способное производить электроэнергию путем преобразования химической энергии органических веществ благодаря каталитической реакции микроорганизмов и бактерий, которые присутствуют в природе. Эта технология может быть использована для производства электроэнергии в сочетании с процессами очистки сточных вод.

## **2.1. Анаэробное сбраживание органических фракций с получением биогаза**

Одним из важных сегментов биоэнергетики для инвесторов является производство биогаза, которое, кроме энергии, может обеспечить дополнительные источники дохода от продажи органических удобрений и сокращения платежей за размещение на полигонах органических отходов. Основным преимуществом биогазовой энергетики в России по сравнению с другими видами возобновляемых источников энергии и традиционными энергоносителями является доступность сырья для работы установки, соответственно, полное отсутствие затрат на топливо в структуре операционных расходов, так как в 95% случаев отходы достаются владельцу установки бесплатно, а энергия используется на собственные нужды [5].

Биогаз получается в результате анаэробного сбраживания – это процесс биологического преобразования, который осуществляется в отсутствие акцептора электронов, например, кислорода. Основными продуктами этого процесса являются остатки сточных вод или сбраживания (дигестат) и богатый энергией биогаз.

Биогаз является одним из наиболее экономически эффективных видов топлива. 1 м<sup>3</sup> биогаза по теплотворной способности эквивалентен 0,8 м<sup>3</sup> природного газа, или 0,6 кг бензина, или 0,7 кг мазута, или 1,5 кг дров, или 3 кг брикетированного биотоплива [5].

В качестве сырья для биогаза служат перерабатываемые отходы: переработка 1 т навоза дает до 50 м<sup>3</sup> биогаза. Из 1 м<sup>3</sup> биогаза можно получить 2 кВт/ч электроэнергии. По статистике, объем сельскохозяйственных отходов в России

составляет около 770 млн т в год, соответственно, это позволяет получить около 66 млрд куб. м биогаза, или более 100 млрд киловатт-часов электроэнергии.

Доступность сырья определяет территориальную гибкость: биогазовые установки могут быть расположены в любой местности и не требуют строительства дорогостоящих газопроводов и сетевой инфраструктуры, а также позволяют новому предприятию сэкономить на стоимости подключения к сетям и выделения мощности. Максимальный потенциал производства биогаза сосредоточен, прежде всего, в энергодефицитных регионах. В частности, при общем потенциале производства биогаза в России до 75 млрд м<sup>3</sup> в год (рисунок 2.3): на Южный федеральный округ приходится 24,4 млрд. м<sup>3</sup>; на Приволжский федеральный округ – 18,3 млрд. м<sup>3</sup>; на Центральный федеральный округ – 12,1 млрд. м<sup>3</sup> [5].



Рисунок 2.3 – Потенциал биогаза в России, млрд. м<sup>3</sup>

Россия обладает значительным потенциалом использования сельскохозяйственных, промышленных и пищевых отходов для производства биогаза. Страна может рассматриваться как родина крупной сельскохозяйственной промышленности и является одним из мировых лидеров по производству и экспорту сельскохозяйственной продукции. Общий объем производства биогаза из органических отходов сельского хозяйства может достигать 66–70 млрд. м<sup>3</sup> в год, а при утилизации сточных вод – до 4 млн. м<sup>3</sup> биогаза в сутки. Общий потенциал производства биометана в России превышает 40 млрд. м<sup>3</sup> в год. Для сравнения, объем внутреннего потребления природного газа в России в 2019 г. составил 235,8 млрд. м<sup>3</sup> (таблица 2.1) [5].

Однако, в отличие от других возобновляемых источников, в России территории рентабельного использования биогаза, как правило, не совпадают с реги-

онами спроса на получаемую энергию. Благодаря биогазу достигается и технологическая гибкость: его использование позволяет получать одновременно несколько видов энергоресурсов – газ, моторное топливо, тепло и электроэнергию.

Таблица 2.1 – Потенциал производства биогаза в РФ

Биогаз (потенциал производства)			Природный газ (внутреннее потребление)	
Субстрат	млрд м <sup>3</sup> в год	ПДж в год	млрд м <sup>3</sup> в год	ПДж в год
Сельскохозяйственные отходы	66-70	1540	235,8	9903
Осадки сточных вод	1,5	32		

Наиболее заметным недостатком биогазовой энергетики являются большие капитальные затраты на единицу мощности, а также относительно узкий коридор рентабельности проекта. Стоимость 1 кВт установленной электрической мощности биогазовой станции составляет от 2 до 5 тысяч евро в зависимости от размера станции (чем меньше, тем дороже) и типа сырья. Установки большой мощности (от 10 МВт), использующие наиболее рентабельные виды отходов (например, сахарный жом, пищевые отходы с высоким содержанием жира), стоят менее 2 тыс. евро за 1 кВт. Малые установки (менее 1 МВт), использующие нерентабельные виды отходов, могут стоить более 6–7 тысяч евро за 1 кВт. Средние капитальные затраты большинства биогазовых проектов мощностью от 2 до 5 МВт находятся в диапазоне 3–4 тыс. евро на 1 кВт.

Таблица 2.2 – Состав биогаза и природного газа [4]

Газ	Химическая формула	Биогаз, %	Природный газ, %
Метан	CH <sub>4</sub>	55–70	87–97
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	30–45	-
Сероводород	H <sub>2</sub> S	1–2	-
Водород	H <sub>2</sub>		
Аммиак	NH <sub>3</sub>		
Угарный газ	CO	следы	-
Азот	N <sub>2</sub>	следы	0,2–5,5
Кислород	O <sub>2</sub>	следы	до 0,1
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-	1,5–9,0
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-	0,1–1,5

Поскольку биогаз и природный газ весьма близки по составу (таблица 2.2), биогаз можно использовать для тех же целей, что и природный газ. После переработки биогаз может применяться для производства электроэнергии, тепла, а после дополнительной очистки, с наименьшим воздействием на окружающую среду, модернизированный биогаз или биометан может использоваться в качестве топлива для автомобилей, автобусов, такси, грузовиков или сельскохозяйственных транспортных средств, например, тракторов. Автомобили, работающие на газе, могут использовать биометан в качестве топлива без каких-либо технических изменений. Эта особенность биометана позволяет его использовать в существующей инфраструктуре с установленными технологиями.

Внедрение биогазовых технологий может стать полезным решением, поскольку они не только обеспечивают чистую энергию, но и решают проблему отходов. Кроме того, производство биогаза является наиболее привлекательным сегментом биоэнергетики для инвесторов, поскольку, помимо получения чистой энергии, оно может обеспечить дополнительные источники дохода от продажи органических удобрений и исключить плату за утилизацию отходов.

Схема анаэробного метантенка показана на рисунке 2.4 [6]. В качестве биомассы для получения биогаза используются органические отходы, такие как отходы пищевой промышленности, канализационные стоки, отходы растительного происхождения, например, трава, древесные отходы, водоросли. Одна тонна отходов растительного происхождения дает от 150 до 500 м<sup>3</sup> биогаза с содержанием метана до 70%. Кроме растительных отходов, биогаз можно производить из специально выращенных энергетических культур, например, из силосной кукурузы, и водорослей. Выход биогаза может достигать 500 м<sup>3</sup> на одну тонну сырья.

В качестве самостоятельного объекта метантенки используются для переработки отходов животноводства. Одна тонна навоза крупного рогатого скота позволяет получить 50–65 м<sup>3</sup> биогаза с содержанием метана 60%, Максимальное количество биогаза – 1300 м<sup>3</sup> – с содержанием метана до 87% можно получить из тонны жира [6]. Метантенки могут использоваться в составе муниципальных очистных сооружений для переработки смеси сырого осадка из первичных отстойников и избыточного активного ила из вторичных отстойников после аэротенков.

Анаэробное сбраживание органических отходов ускоряет естественное разложение органического материала без участия кислорода с помощью сохранения показателей температуры, содержания влаги и уровня pH, близких к их оптимальным значениям. Образовавшийся в результате обработки отходов метан может быть использован для производства тепловой и/или электрической энергии. Выбросы метана, образующиеся в результате данного вида обработки в результате случайных утечек во время нарушения процесса или других непредвиденных ситуаций, варьируются в диапазоне от 0 до 10% от общего количества образовавшегося CH<sub>4</sub>. Выбросы N<sub>2</sub>O, образующиеся в данном процессе, являются незначительными [7].

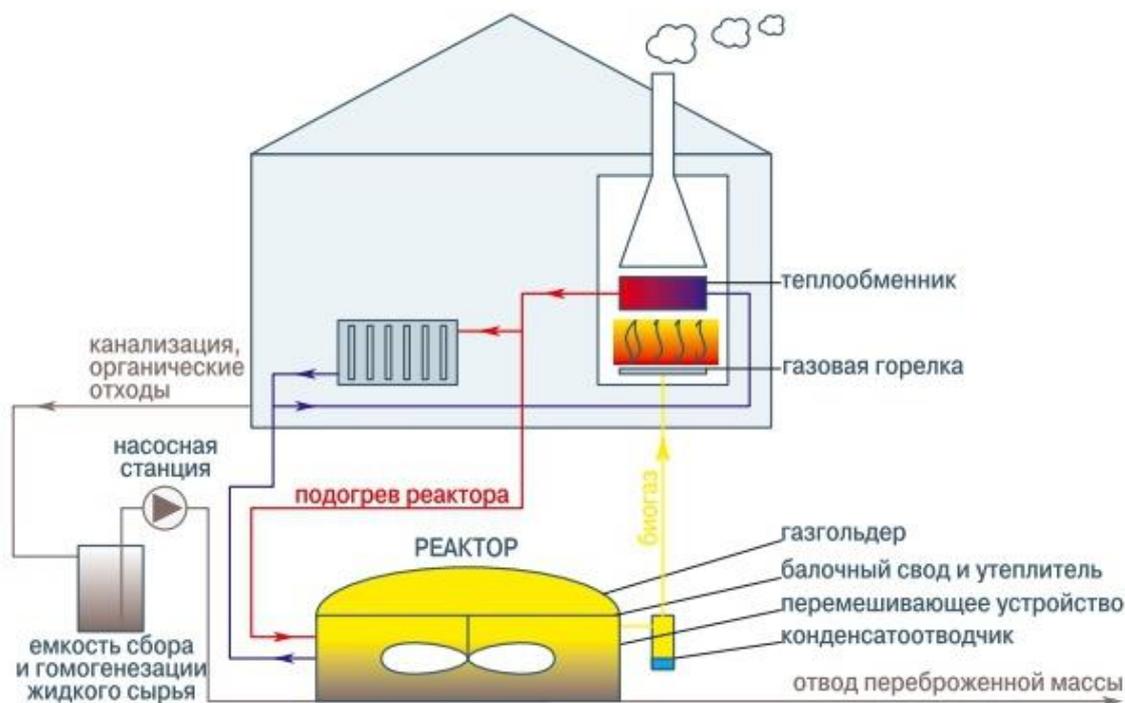


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема получения биогаза в метантенке

Требуемый режим сбраживания обеспечивается при равномерной в течение суток загрузке осадка. Скорость процесса и производительность анаэробных реакторов зависит от температуры. Выделяют три основных диапазона температур и, соответственно, три группы бактерий, которые обеспечивают биологическое разложение: психрофильный режим (до 20 °С); мезофильный режим (25–45 °С) и термофильный режим (50–65 °С). Анаэробное разложение происходит, как правило, в мезофильном и термофильном режимах. Чем выше температура, тем быстрее происходят процессы брожения, поэтому термофильный режим в этом случае более производителен. Однако для того, чтобы использовать термофильный режим, необходимо поддерживать более высокую температуру, что повышает энергозатраты. Поэтому наиболее часто используется мезофильный режим. Эффективность процесса анаэробного сбраживания оценивается по степени распада органического вещества, количеству и составу образующегося биогаза, которые, в свою очередь, определяются химическим составом осадка, а также основными технологическими параметрами процесса: доза загрузки метантенка, температура и концентрация загружаемого осадка.

Анаэробный дигестат, или сухая часть вещества, прошедшего переработку, производится с помощью отжима субстанции. Жидкая фракция может быть использована для стабилизации влажности следующих циклов переработки или как жидкое удобрение. Сухой дигестат может быть использован далее для создания компоста путем рядкового компостирования или аэробного компостирования в закрытых реакторах.

## 2.2. Получение биометана из свалочного газа

Кроме анаэробного реактора, биогаз можно получать непосредственно на полигонах, как свалочный газ, в результате естественного разложения органических отходов в анаэробных условиях (таблица 2.3). Для сбора свалочного газа на объекте захоронения ТКО монтируется система активной дегазации, состоящая из вертикальных труб, снабженных перфорацией, и расположенного над ней покрытия с окислительным и грунтовым слоем (рисунок 2.5) [8].

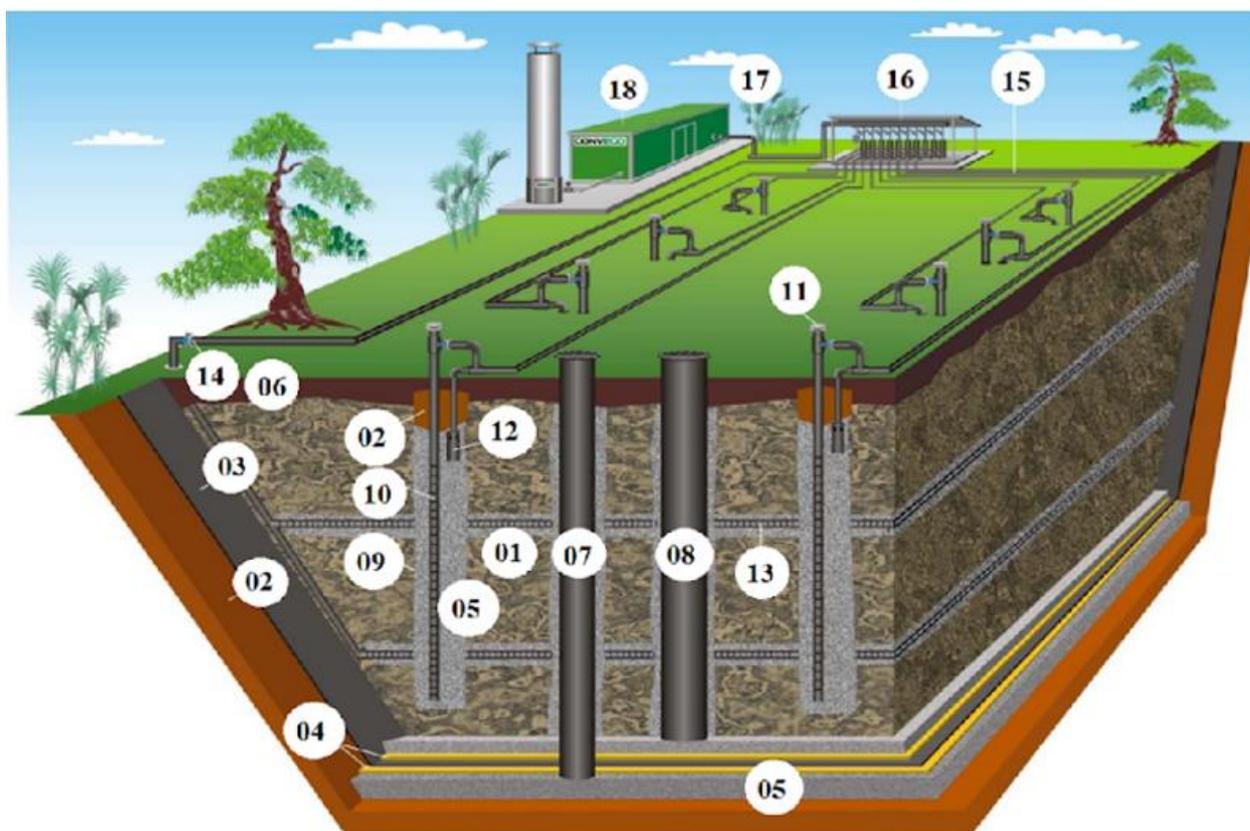


Рисунок 2.5 – Схема активной дегазации полигона [8]

1 – ТКО; 2 – грунт; 3 – ПЭВП полотно; 4 – песок; 5 – гравий; 6 – почва; 7 – колодезь контроля; 8 – колодезь сбора фильтрата; 9 – газовая скважина; 10 – вертикальный трубопровод сбора газа; 11 – заглушка; 12 – сбор конденсата; 13 – горизонтальный трубопровод сбора газа; 14 – регулирующий клапан; 15 – линия сбора газа; 16 – станция регулировки; 17 – линия подачи газа; 18 – установка сбора и сжигания газа

Извлекаемый из тела полигона свалочный газ проходит очистку с образованием метана и поступает в систему сжигания, на выходе которой продукты сгорания поступают в газовую турбину и генерируют электроэнергию. Из продуктов сгорания выделяют диоксид углерода; отделение воды от продуктов сгорания происходит при помощи адсорбции, в качестве адсорбирующего материала применяется цеолит. В технологии учитывается охлаждение и осушение продуктов сгорания перед стадией адсорбции при помощи теплообменников и осушителей [9].

Таблица 2.3 – Типовой состав и валовые выбросы свалочного газа полигона ТКО емкостью 900 тыс. т/ год на этапе эксплуатации

Состав	Массовая доля, %	Валовый выброс, т/год
Метан	61,9	20278,258
Диоксид углерода	26,1	8550,283
Азот	14,8	4848,436
Кислород	2,1	687,954
Углеводороды	0,005	1,638
Сероводород	0,002	0,655
Меркаптаны	0,001	0,328
Сульфиды	0,001	0,328
Итого:		34367,880

Увлажнение отходов фильтратом производится до влажности в 45% [10], которая рассматривается как наиболее эффективная влажность для метанообразования на полигонах ТКО в рекомендациях Американского агентства по охране окружающей среды (US EPA) [11]. При соблюдении данных условий концентрация метана в свалочном газе возрастает до 60,2% [10], а количество образующегося свалочного газа увеличится в два раза. Скорость метаногенеза зависит от температуры, и, как показывают исследования, возрастает в два раза при повышении температуры от 20 °С до 30–40 °С. Рост температуры в теле полигона не связан с температурой наружного воздуха и на глубине 2–4 м достигает 30–40 °С [12].

Для увеличения выхода биогаза, согласно ИТС 17-2016 «Технология биоактивации отходов объектов захоронения твердых коммунальных отходов» [13], рекомендуется бурение дополнительных скважин глубиной в 6,5 м, по которым в тело полигона поступает очищенный фильтрат, смешанный с добавкой нейтрального красного – красителя 3-амино-7-диметиламино-2-метилфеназина гидрохлорида. Исследования [14, 15] показали, что максимальный радиус воздействия соответствует расстоянию между скважинами в 36 м. Наилучшие результаты в стабилизации образования и интенсификации выхода свалочного газа достигаются при внесении 80 мг/л нейтрального красного.

Получаемый биогаз можно очистить для удаления всех загрязняющих веществ и, прежде всего, углекислого газа, чтобы повысить содержание метана до концентрации более 95%. Для повышения содержания метана в биогазе наиболее часто используется метод абсорбции путем промывки водой или органическим растворителем, а также адсорбции при переменном давлении. Менее часто применяется мембранное или криогенное разделение.

Очищенный газ называют биометаном, его можно распределять потребителям через существующие трубопроводные системы для природного газа или использовать в качестве возобновляемого топлива для автомобилей. По сравнению с другими видами биотоплива биометан считается наиболее перспективным, т.к. расход топлива на 100 км пробега в легковом автомобиле, работающем на биометане, примерно в 5 раз меньше, чем на биоэтаноле и в 4 раза меньше, чем на биодизеле. Извлекаемый из биогаза диоксид углерода применяется в химической промышленности для производства поликарбонатов, сухого льда или для пескоструйной обработки поверхностей.

### 2.3. Ферментация с получением биоэтанола

Биоэтанол представляет собой жидкое спиртовое топливо, вырабатываемого из сельхозпродукции с высоким содержанием сахара и крахмала, например, кукурузы, зерновых, сахарного тростника и др., а также из биоразлагаемых фракций отходов. Биоэтанол является альтернативным видом жидкого осветленного топлива для бензиновых двигателей. Существуют различные технологии получения биоэтанола, но все они аналогичны производству пищевого спирта и включают отдельные стадии гидролиза путем ферментативной обработки, ферментации с помощью микроорганизмов и дистилляции (рисунок 11) [16].

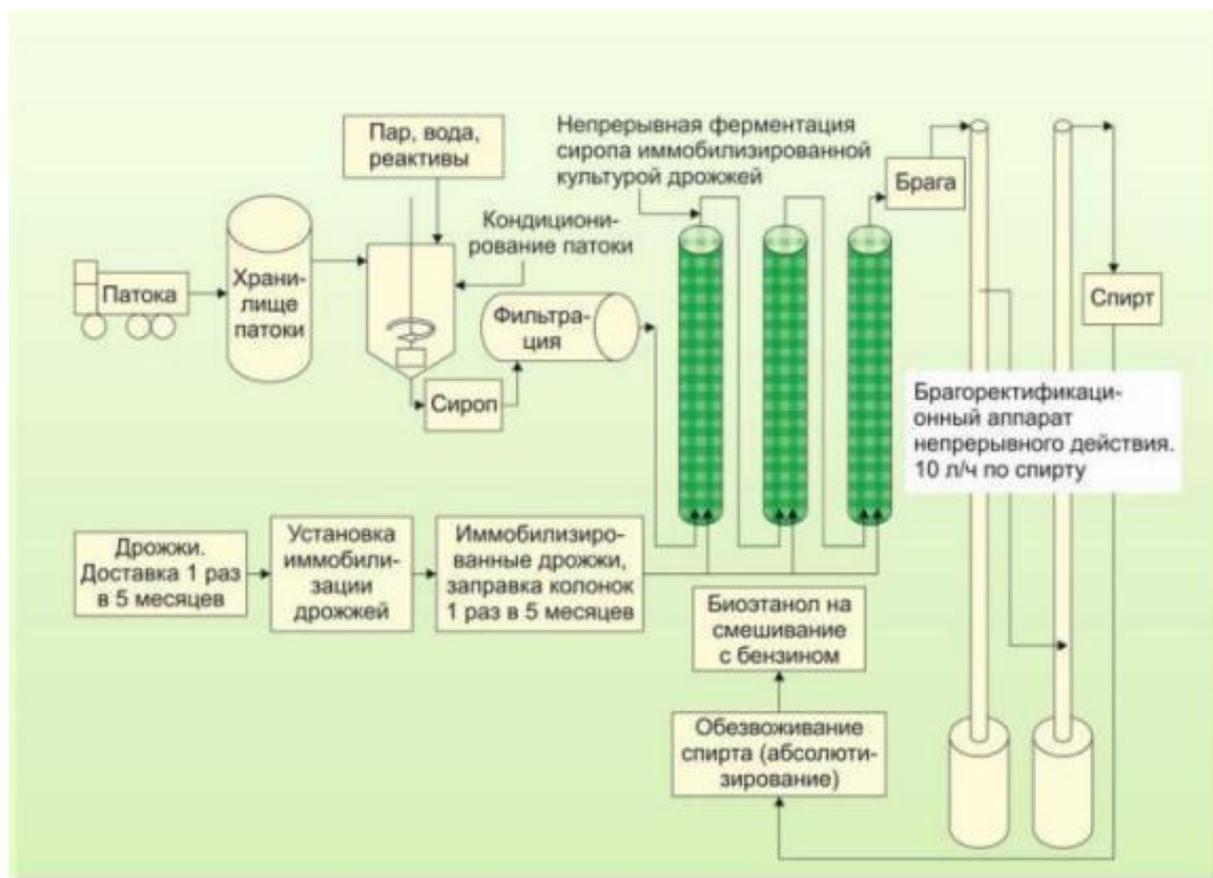


Рисунок 2.6 – Технология производства биоэтанола [16]

Процесс получения биоэтанола достаточно сложен. Ему предшествует большое число технологических операций, связанных с выделением отдельных компонентов из зерна в водной среде – крахмала, глютена, зародыша и клетчатки. Технологическая цепочка во многом схожа с процессом производства пищевого спирта. При этом в случае биотоплива все чаще используют технологию мокрого помола зерна.

После очистки зерно замачивается и направляется на мокрое дробление для последующей сепарации зародыша и отделения клетчатки. Оставшийся после сепарации раствор, содержащий растворенный крахмал и глютен, направляется на вторую стадию сепарации. На данном этапе происходит выделение глютена из оставшегося раствора с образованием влажного глютена и крахмала. Полученный влажный крахмал преобразуется в следующие продукты: сухой крахмал, этанол, концентрированную фруктозу.

В отличие от пищевого спирта, биоэтанол почти не содержит воды (его концентрация – 99,8%) и производится укороченной дистилляцией (две ректификационные колонны вместо пяти). Основными составляющими биологического спирта являются метан и сивушные масла, что делает его непригодным для питья.

Особенностью производственного процесса является получение побочных продуктов: в случае сухого помола зерна – сухая дробина с растворимыми веществами и CO<sub>2</sub>; в случае мокрого помола – глютен или пшеничная клейковина, если сырье – пшеница, CO<sub>2</sub> и корма для животных.

Оставшиеся после ферментации продукты, такие как оболочки зерна, дрожжи, протеин (глютен) зерна, находят применение в качестве корма для скота. Образующийся в больших количествах углекислый газ компании-производители биоэтанола стремятся переработать для получения дополнительной прибыли.

Современные технологии позволяют использовать практически любое сахаро- и крахмалосодержащее сырье: сахарный тростник, сахарную свеклу, картофель, кукурузу, пшеницу, ячмень, рожь и т. д. (таблица 2.4) [16].

Таблица 2.4 – Выход биоэтанола из различных сельскохозяйственных культур

Сырье	Объем производства биоэтанола с 1 га, м <sup>3</sup>
Сахарная свекла	2,5–3,0
Сахарный тростник	3,5–5,0
Кукуруза	2,5
Пшеница	0,5–2,0
Картофель	1,2–2,7
Сахарное сорго	3,0–5,0

Чистый биоэтанол используется в качестве топлива только в Бразилии. В основном, биоэтанол применяется в качестве добавок к моторному топливу в разных пропорциях [17]:

- как добавка к бензину от 5 до 15% (E5, E10, E15) для использования в бензиновых двигателях. Топливо, содержащее этанол, маркируется буквой E и цифрой, которая обозначает процент содержания спирта. Например, E10 – это смесь, содержащая 10% биоэтанола и 90% бензина;
- в виде смесей с содержанием этанола до 85% и 15% бензина (E20, E30, E85) для двигателей с универсальным потреблением топлива;
- для синтеза этил-трет-бутилового эфира (ЭТБЭ) – высокооктанового компонента бензина, который имеет ряд преимуществ перед биоэтанолом. Производство ЭТБЭ получило широкое распространение в европейских странах, где более половины всего биоэтанола направляется на синтез ЭТБЭ.

До недавнего времени развитие производства биоэтанола сдерживалось тем, что производителям приходилось платить акцизы на спиртосодержащую продукцию. Однако уплата акцизов была отменена, и вводится новый порядок лицензирования после принятия и вступления в силу ФЗ № 329-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции» от 14 июля 2022 г., что будет способствовать развитию данной отрасли [18].

## 2.4. Получение биодизеля

Биодизельное топливо представляет собой сложный метиловый эфир, получаемый из масла растительного или животного происхождения. Технология производства основана на проведении реакции этерификации – взаимодействия жирных кислот с метиловым спиртом в присутствии катализатора (щелочного или кислотного). Соотношение растительного масла и метанола составляет приблизительно 9:1 (рисунок 2.7) [19].

Реакция начинается медленно и в зависимости от перемешивания занимает 3–6 минут. Для получения хорошего выхода биодизеля ее проводят дважды. После декантирования глицерин собирается на дне, а верхняя фракция – эфир – передается на вторую стадию реакции. При смешивании с метанолом и катализатором в течение нескольких минут процесс этерификации завершается, и второй статический декантер разделяет фракции глицерина и эфира. Температура реакции выбирается в диапазоне от 20 °С до 90 °С. Скорость реакции удваивается при увеличении температуры на каждые 10 °С. Однако для обеспечения безопасности процесса рекомендуется температура 55 °С, так как метанол закипает при 65 °С.

Из одной тонны растительного масла и 111 кг спирта в присутствии 12 кг катализатора можно получить около 970 кг (1100 л) биодизеля и 153 кг первичного глицерина [19].

Для производства биодизеля подходят любые растительные масла, твердые масла животного происхождения, отходы масложирового производства или скотобоен. В качестве растительных масел могут использоваться подсолнечное, рапсовое, льняное и др. (таблица 2.5). В зависимости от используемого сырья качественные показатели биотоплива разнятся. Так, например, пальмовый биодизель имеет наибольшую калорийность, но быстро замерзает при относительно

высоких температурах. Рапсовый биодизель несколько уступает пальмовому по калорийности, но лучше переносит холод. Наиболее распространено получение биодизеля из рапсового масла в Германии.

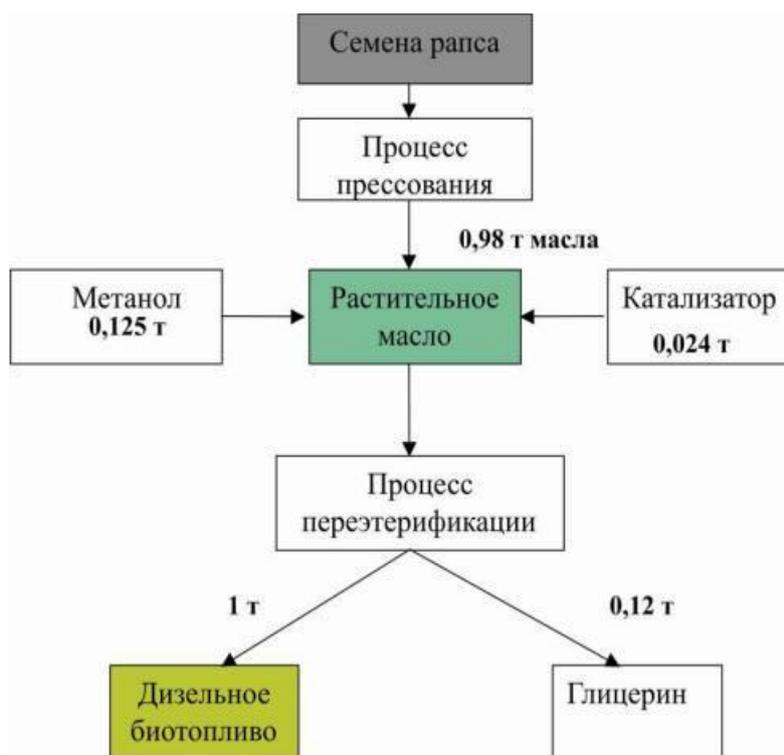


Рисунок 2.7 – Технология производства биодизеля [19]

Таблица 2.5 – Выход биодизельного топлива из масличных культур [19]

Сырье	Объем производства биодизеля с 1 га, л
Пальмовое масло	5950
Оливы	1212
Рапс	1190
Арахис	1059
Подсолнечник	952
Кунжут	696
Лен	478
Соя	446

Биодизель имеет среднюю теплотворную способность 37,6 МДж/кг и имеет более высокое цетановое число 51–58 по сравнению с нефтяным дизельным топливом с цетановым числом 50–52. Согласно российским нормативным требованиям, цетановое число летнего и зимнего дизтоплива должно быть не менее 45 единиц [20]. Это позволяет использовать биодизель как в чистом виде, так и в качестве добавки к дизельному топливу.

По экспертным оценкам, стоимость строительства заводов по производству биодизеля – от 0,2 до 0,5 доллара на литр биодизеля. При организации производства биодизеля дополнительную прибыль можно получить от реализации побочного продукта – глицерина.

## 2.5. Аэробная ферментация органических отходов. Компостирование органической фракции ТКО

Аэробная ферментация отходов, или компостирование, представляет собой метод переработки и повторного использования органических отходов, к которым относятся биоразлагаемые отходы – пищевая фракция ТКО, садовые, сельскохозяйственные и пищевые отходы, а также осадки биологических очистных сооружений сточных вод.

Компостирование – это биотермический процесс минерализации и гумификации органических отходов, происходящий в аэробных условиях под воздействием микроорганизмов. Получаемый в результате богатый питательными веществами материал пригоден для дальнейшего использования в качестве удобрения по ГОСТ Р 55571-2013 [21]. Согласно ГОСТ 34103-2017, компост – это органическое удобрение, полученное в результате разложения органических отходов растительного или животного происхождения [22].

С микробиологической точки зрения компостирование – аэробное мезофильное и термофильное микробное разложение органических веществ до богатого гумусом, безопасного и относительно стабильного продукта – компоста, который состоит из целлюлозы, лигнина, неорганических соединений и биомассы микроорганизмов, участвующих в компостировании.

Основные представители микробного сообщества, участвующие в процессе компостирования, – это бактерии, микроскопические грибы, актиномицеты и простейшие (рисунок 2.8) [23].

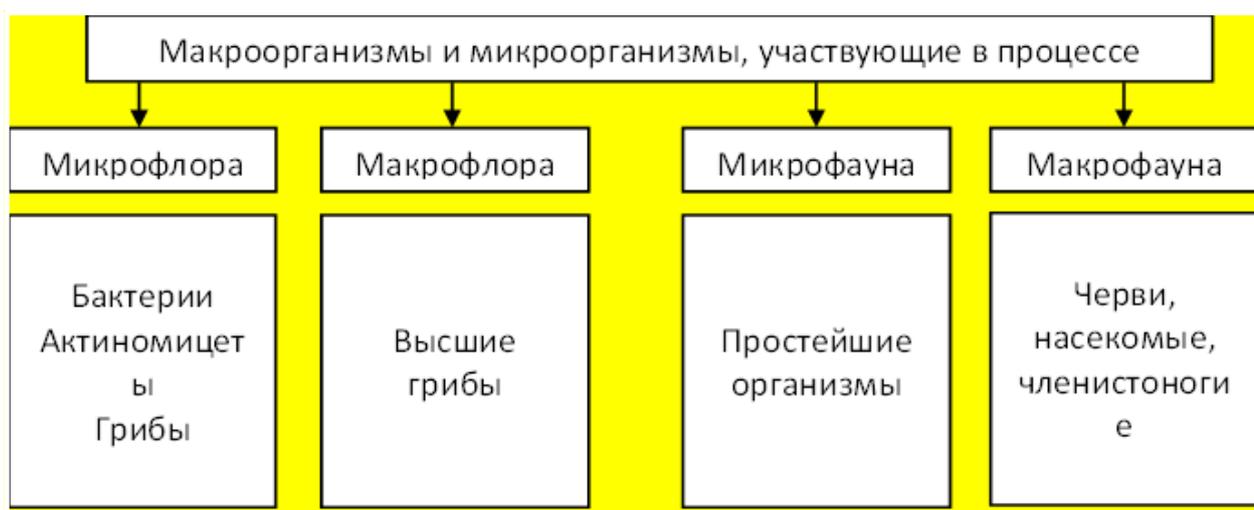


Рисунок 2.8 – Организмы, участвующие в процессе компостирования

Разнообразие микробных сообществ развивается в ответ на изменение температуры, влажности, кислорода и pH в компостной системе. Это микробное разнообразие обеспечивает процесс компостирования. Микроорганизмы, ответственные за процесс компостирования, способны к разложению широкого спектра соединений из аминокислот и простых сахаров до сложных белков и углеводов. Это приводит к полной деградации компостного материала. Уровни температуры и доступных продуктов питания, как правило, имеют наибольшее влияние в определении классов и видов организмов, составляющих микробную популяцию в конкретное время. Описание микроорганизмов, которые участвуют в процессе компостирования, является сложным, поскольку популяции и сообщества непрерывно меняются в зависимости от изменений температуры, наличия питательных веществ, содержания кислорода, содержание воды и pH в процессе компостирования. Экосистемы компостирования, как правило, ограничивают себя из-за ингибирующих высоких температур в результате чрезмерного накопления тепла. Теплота различных микробных групп сменяет друг друга.

Процесс компостирования протекает в контролируемых условиях, что является основным отличием компостирования от самопроизвольного гниения. Кроме того, биоокислительный метаболизм микроорганизмов, которые принимают участие в компостировании, гарантирует, что объем биodeградируемого углеродсодержащего вещества будет полностью превращен в CO<sub>2</sub> и воду. Азот и сера ассимилируются в клеточной массе микроорганизмов, но могут высвободиться после смерти микроорганизмов.

Окислительный метаболизм микроорганизмов является экзотермическим процессом. Теплоты, производимой в результате жизнедеятельности микробного сообщества, достаточно для поддержания температуры органического вещества между 60 °C и 75 °C в течение до 10 дней. Воздействие высоких температур препятствует выживанию патогенных организмов. К гибели патогенных микроорганизмов также приводит конкуренция между организмами за источники питания и выделение антагонистами антибиотиков или других ингибиторов, например, аммиака.

На этапе стабилизации компост становится пригодным для использования в качестве органического удобрения, приобретает физические и химические свойства готового компоста. На процессы компостирования влияют такие факторы, как соотношение C/N, концентрация свободного кислорода, pH и температура (таблица 2.6) [23].

Разные отходы имеют разные соотношения C/N, например: осадок сточных вод – от 6:1 до 8:1, пищевые отходы – 15:1, фруктовые отходы – 35:1, отходы зеленых растений и сорняки – с 11:1 до 20:1, опилки – 500:1. Чтобы получить желаемое соотношение C/N, следует использовать смесь отходов. В качестве сырья для создания компоста могут выступать как ТКО, так и более гомогенные субстраты, а именно отходы животноводства и растениеводства (таблица 2.7) [24].

К числу основных технологий компостирования органических отходов относятся следующие [24]: рядковое компостирование; компостирование в закрытых реакторах; аэробная переработка в закрытых реакторах.

Таблица 2.6 – Основные факторы, влияющие на процесс компостирования

№ п/п	Наименование условия	Допустимые показатели	Оптимальные показатели
1	Соотношение C/N	20–40:1	25–35:1
2	Влажность	45–65 %	45–65 %
3	Концентрация свободного кислорода	> 5%	> 10%
4	pH	5,5–9	6,5–8,0
5	Температура	43–65	54–60

Таблица 2.7 – Основные компоненты компостной смеси

Наименование отхода	Влажность	C/N	Плотность
Отходы с высоким содержанием углерода			
Сено	8–10	12–30	-
Стебли кукурузы	15	60–70	32
Солома	5–20	40–150	50–400
Силос	65–68	40	-
Листовой опад	-	30–80	100–300
Опилки	20–60	200–700	350–450
Древесная стружка	-	100–500	-
Кора	-	100–300	-
Газета	3–8	400–800	200–250
Бумага смешанного состава	-	150–200	-
Отходы с высоким содержанием азота			
Коровий навоз	80	5–25	1400
Птичий помет	20–40	5–15	1500
Свиной навоз	65–80	10–20	-
Картофельные очистки	70–80	18	1500
Отходы овощные	-	10–20	-
Кофейный жмых	-	20	-
Скошенная трава	-	15–25	-
Осадки сточных вод	-	9–25	-

При рядковом компостировании материал выкладывается в ряды высотой 1–3 м и шириной 2–6 м; длина рядов может достигать сотни метров. Поступление кислорода обеспечивается за счет регулярного механического перемешивания и подачи кислорода внутрь рядов. Подача кислорода может быть механической, путем перемешивания, через трубы внутри ряда и посредством аэрируемых рядов с синтетическим покрытием, позволяющих поддерживать необходимый уровень влажности и температуры. Длительность такого промышленного компостирования вместе со стадией вызревания составляет до 6 месяцев в зависимости от применяемой технологии.

Достоинством технологии является ее простота, недостатком – возможное образование анаэробных участков в рядах из-за сложности прохода кислорода, что ведет к проблемам с запахом от базы компостирования и выделению метана в атмосферу.

Компостирование в закрытых реакторах применяется в условиях ограниченности земельных ресурсов. Аэрация (снабжение кислородом) осуществляется с помощью подачи горячего воздуха. Отсеки обычно имеют размеры 2 м в основании и 8 м в высоту. Длительность такого компостирования составляет до 10 недель. Также для него не требуется больших территорий, нет проблем с контролем запаха от станции компостирования, обеспечена хорошая аэрация процесса и возможность перерабатывать большее количество пищевых отходов нежели чем при компостировании.

При организации отдельного сбора органических отходов возможна их переработка в органическое удобрение при помощи ускоренной твердофазной ферментации или ускоренного способа компостирования (экспресс-компостирование) при интенсивной аэрации компостной смеси (рисунок 2.9). Биореакторы барабанного типа могут работать в непрерывном режиме. Производительность таких установок выше за счет того, что поступивший субстрат, например, помет или смесь органических отходов, быстрее нагревается и за счет вращения барабана эффективнее насыщается кислородом. Биоферментация занимает 7–8 суток [25]. Основным преимуществом данных технологий является возможность контролировать процесс и качество конечного продукта.

На мусороперерабатывающих заводах технология компостирования включает следующие операции. ТКО перегружаются в бункер-накопитель, затем крапом в загрузочные воронки, затем во вращающиеся барабанные грохоты, где разделяют на две фракции – мелкую и крупную. Мелкая фракция ТКО проходит через дробилку и поступает в биотермические башни, где за 3–4 суток в результате аэробного процесса отходы превращаются в компост, который после просеивания на виброгрохотах поступает на склад готовой продукции. Крупная фракция поступает в котлоагрегаты и сжигается при температуре 800–1000 °С. Дымовые газы очищаются в электрофильтрах на 96–98 % и выбрасываются в атмосферу [26]. В зависимости от качества полученного компоста он может использоваться в качестве удобрения, для лесовосстановления, а также как технический грунт для отсыпки.

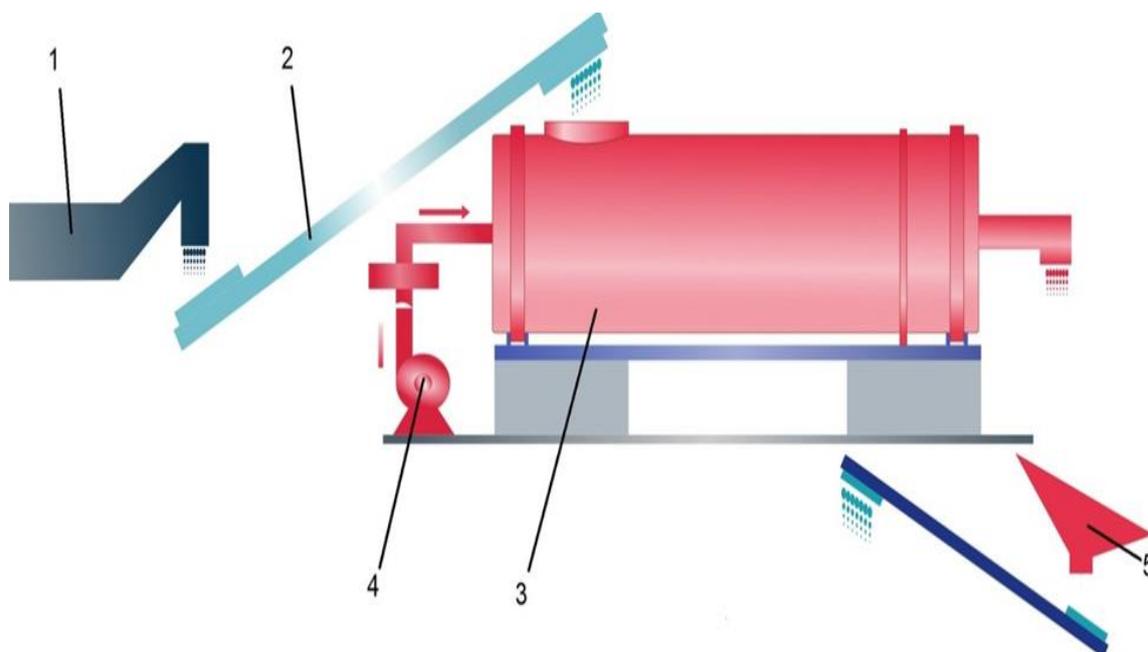


Рисунок 2.9 – Схема ускоренного компостирования с барабанным биоферментером: 1 – смеситель; 2 – транспортер; 3 – биоферментационная установка барабанного типа; 4 – система аэрации; 5 – фасовочное оборудование

К сожалению, компостирование не является широко распространенным методом утилизации органических отходов ввиду ряда недостатков: продолжительный производственный цикл, необходимость мониторинга и поддержания определенных условий, возможность получения нестабильного итогового продукта.

### Вопросы для самопроверки

1. В чем отличия понятий «свалочный газ», «биогаз» и «биометан»?
2. Какие основные методы получения биогаза?
3. Как получают биоэтанол? В чем ограничения этого способа переработки отходов?
4. Как получают биодизель? В чем достоинства и недостатки этого способа?
5. В чем сущность аэробной ферментации отходов?

### Литература к главе 2

1. Kurbatova A., Abu-Qdais H.A. Using multi-criteria decision analysis to select waste to energy technology for a Mega city: The case of Moscow // Sustainability. – 2020. Vol. 12, № 23. P. 1–18. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/23/9828>
2. Pulyaeva V.N., Kharitonova N.A., Kharitonova E.N. Advantages and Disadvantages of the Production and Using of Liquid Biofuels // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 976, № 1.

3. World Energy Council. World Energy Resources: Waste to Energy. – URL: World Energy Council – 2013. – 468 p. – URL: [https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf)
4. European Biogas Association. Activity Report. 2022. – URL: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/01/EBA-Activity-Report-2022.pdf>
5. Биогаз в России. – URL: <http://biogaz-russia.ru/biogaz-v-rossii/>
6. Особенности производства биоэтанола. Cleandex. Teachart. – URL: <http://www.cleandex.ru/articles/2015/12/23/bioethanol-production>
7. Мокринская К. МЕТАНТЕНКИ – утилизация отходов с пользой. – Журнал С.О.К., №5, 2009 – URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/metantenki-utilizaciya-othodov-s-pol-zoy>
8. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. – МГЭИК, 2006 – URL: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/5\\_Volume5/V5\\_4\\_Ch4\\_Bio\\_Treat.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf)
9. Архаров И.А., Симакова Е.Н., Навасардян Е.С. Свалочный газ как источник сырья для энерготехнологических процессов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 8. – С. 25-28
10. Управление отходами. Полигонные технологии захоронения твердых бытовых отходов. Рекультивация и постэксплуатационное обслуживание полигона: монография/ Я.И. Вайсман [и др.]; под ред. Я.И. Вайсмана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 244 с.
11. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов – М.: Стройиздат, 2019 – 39 с.
12. Landfill Gas Energy Project Data // United States Environmental Protection Agency. – URL: <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-data>
13. Landfill Gas Utilization // Environmental Protection Department. – URL: [https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/prob\\_solutions/msw\\_lgu.html](https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/prob_solutions/msw_lgu.html)
14. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 17–2016. Размещение отходов производства и потребления. – М: Бюро НДТ, 2016. – 181 с.
15. Rasapoor M., Young B., Bra R., Baroutian S. Improving biogas generation from aged landfill waste using moisture adjustment and neutral red additive – Case study: Hampton Downs’s landfill site // Energy Conversion and Management. – Vol. 216, July 2020. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420304854>
16. Rasapoor M., Young B., Bra R., Baroutian S. Enhancement of landfill gas generation from aged waste by a combination of moisture adjustment and application of biochar and neutral red additives: A field-scale study // Fuel. – Vol. 283, January 2021. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/343645877\\_Enhancement\\_of\\_landfill\\_gas\\_generation\\_from\\_aged\\_waste\\_by\\_a\\_combination\\_of\\_moisture\\_adjustment\\_and\\_application\\_of\\_biochar\\_and\\_neutral\\_red\\_additives\\_A\\_field-scale\\_study](https://www.researchgate.net/publication/343645877_Enhancement_of_landfill_gas_generation_from_aged_waste_by_a_combination_of_moisture_adjustment_and_application_of_biochar_and_neutral_red_additives_A_field-scale_study)

17. Особенности производства биоэтанола. Cleandex. Teachart. – URL: <http://www.cleandex.ru/articles/2015/12/23/bioethanol-production>
18. Жидкое биотопливо из сырья растительного происхождения. – ЛесПромИнформ. Журнал профессионалов ЛПК. – №6 (96), 2013 – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3286>
19. Федеральный закон от 14 июля 2022 г. № 329-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции» – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404893991/>
20. Особенности производства биодизеля. Cleandex. Teachart. – URL: <http://www.cleandex.ru/articles/2016/01/23/biodiesel-production>
21. ГОСТ 305-2013 Межгосударственный стандарт. Топливо дизельное. Технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107826>
22. ГОСТ Р 55571-2013 Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов. Технические условия. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105940>
23. ГОСТ 34103-2017 Удобрения органические Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146522>
24. Хорошавин, Л. Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов : [учеб. пособие] / Л. Б. Хорошавин, В. А. Беляков, Е. А. Свалов ; [науч. ред. А. С. Носков] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. Фед ун-т – URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/40642/1/978-5-7996-1747-9\\_2016.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/40642/1/978-5-7996-1747-9_2016.pdf)
25. Переработка органики: в России и мире. – URL: <https://organiccycle.wordpress.com/2016/01/15/>
26. ИТС 42-2017 Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы. – URL: [http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1140&etkstructure\\_id=1872](http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1140&etkstructure_id=1872)
27. Фаберова Е.А., Лапецкий А.В. Получение органо-минерального удобрения на основе компоста из растительного сырья. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – №12, 2012. – С.156–168.

## Глава 3. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И УТИЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ

### 3.1. Элементный состав твердых коммунальных отходов

Источниками образования отходов, содержащих в своем составе органические вещества и подлежащие термическому обезвреживанию, являются жилищно-коммунальное хозяйство, производственная и административно-хозяйственная деятельность предприятий. К ним относятся: твердые коммунальные отходы; медицинские и биологические отходы; загрязненные органическими веществами грунты; пришедшие в негодность и запрещенные пестициды; стойкие органические загрязнители, в том числе полихлорированные бифенилы; нефтешламы; отходы хлорорганических производств химической промышленности; отходы производства минеральных удобрений и химических средств защиты растений; отходы производства органического синтеза; некондиционное ракетное топливо; осадки сточных вод и многие другие [1].

Твердые коммунальные отходы, в основном, включают в себя горючие фракции и поэтому могут рассматриваться как вид твердого органического топлива. Наряду с прямым сжиганием несортированных отходов, что является даже в управляемых условиях крайне нежелательным процессом, ТКО после соответствующей сортировки могут перерабатываться с получением так называемого RDF-топлива (англ. Residual Derived Fuel, т.е. буквально топливо, полученное из остатков) [2].

Поток ТКО с известным морфологическим составом можно проанализировать с точки зрения потенциально получаемой теплоты, если известен их элементный состав, определяемый химическим путем по аналогии с органическим топливом [3].

Различают «рабочую», «сухую» и «горючую» массы топлива.

Топливо, сжигаемое в топке, называют «рабочим», а его массу – рабочей. Элементный состав «рабочей» массы топлива:

$$C^p + H^p + S_{\text{л}}^p + O^p + N^p + W^p + A^p = 100\%,$$

где  $C^p + H^p + S_{\text{л}}^p$  – горючие компоненты топлива – углерод, водород и сера, соответственно;  $W^p$  – содержание воды;  $A^p$  – зола; является негорючей частью топлива.

«Сухая» масса топлива соответствует обезвоженному топливу:

$$C^c + H^c + S_{\text{л}}^c + O^c + N^c + A^c = 100\%.$$

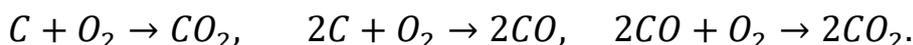
Если условно удалить из «сухой» массы топлива золу, получим «горючую» массу топлива:

$$C^{\Gamma} + H^{\Gamma} + S_{\text{л}}^{\Gamma} + O^{\Gamma} + N^{\Gamma} = 100\%.$$

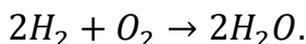
Соотношение между элементами «рабочей», «сухой» и «горючей» массами топлива:

$$C^p = C^c \cdot \frac{100 - W^p}{100}, \%; \quad C^p = C^g \cdot \frac{100 - W^p - A^p}{100}, \%.$$

Удельная теплота сгорания топлива является его важнейшей характеристикой. Это количество теплоты, выделяющееся при «полном» сгорании единицы количества топлива (кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>). При «полном» сгорании в продуктах сгорания отсутствуют горючие вещества:



В зависимости от агрегатного состояния воды в продуктах сгорания (дымовых газах) различают высшую ( $Q_B^p$ ) и низшую ( $Q_H^p$ ) теплоты сгорания топлива:



$Q_B^p$  отличается от  $Q_H^p$  количеством теплоты, выделяющейся при конденсации водных паров, входящих в состав дымовых газов (вода содержится в виде конденсата):

$$Q_H^p = Q_B^p - 2500 \frac{9H^p + W^p}{100}, \text{ кДж/кг.}$$

Наиболее точно теплота сгорания топлива (отходов) определяется с помощью калориметрических установок.

Для ориентировочного расчета  $Q_H^p$  твердого или жидкого топлив можно использовать формулу А. И. Менделеева:

$$Q_H^p = 340 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109(O^p - S_L^p) - 25,2W^p, \text{ кДж/кг.}$$

Газообразное топливо представляет смесь горючих газов с теплотой сгорания, кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_H^c = 0,01(Q_{CO} \cdot CO + Q_{H_2} \cdot H_2 + Q_{H_2S} + H_2S + Q_{CH_4} + CH_4 + \dots + Q_{C_mH_n} \cdot C_mH_n),$$

где  $Q_{CO}, Q_{H_2}, \dots$  — теплота сгорания горючих газов, кДж/м<sup>3</sup>;  $CO, H_2$  — объемное содержание горючих газов, % м<sup>3</sup> [при 0°C; 0,1 МПа].

Если газообразное топливо содержит влагу ( $W^p$ ), то

$$Q_H^p = Q_H^c \cdot \frac{100 - W^p}{100}, \text{ кДж/м}^3.$$

Аналогично,

$$Q_{\text{H}}^{\text{с}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot \frac{100}{100 - W^{\text{P}}}, \text{ кДж/кг, кДж/м}^3;$$

$$Q_{\text{H}}^{\text{г}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot \frac{100}{100 - W^{\text{P}} - A^{\text{P}}}, \text{ кДж/кг, кДж/м}^3.$$

Для реальных топлив  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 2000 - 43000$  кДж/кг.

Введено понятие «условное топливо», теплота сгорания которого принимается равной  $Q_{\text{УТ}}^{\text{P}} = 29300$  кДж/кг (7000 ккал/кг).

Теплота сгорания ТКО  $Q_{\text{H ТКО}}^{\text{P}} = 3350 - 5000$  кДж/кг.

### 3.2. Основы теории горения

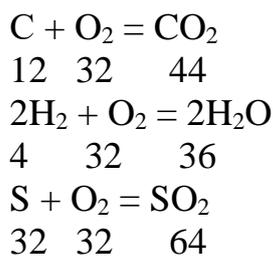
При сжигании топлива или отходов входящие в их состав горючие компоненты соединяются с кислородом воздуха. При этом происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую, идущую на нагрев продуктов сгорания топлива.

Количество воздуха и продуктов сгорания органического топлива и, аналогично, отходов на один кг или куб. м отходов можно рассчитать на основе известного его элементного состава [4].

Принимая, что  $C^{\text{P}} + H^{\text{P}} + S_{\text{л}}^{\text{P}} + O^{\text{P}} + N^{\text{P}} + W^{\text{P}} + A^{\text{P}} = 100\%$ , получим, что на 1 кг топлива приходится

$$C^{\text{P}}/100 + H^{\text{P}}/100 + S_{\text{л}}^{\text{P}}/100 + O^{\text{P}}/100 + N^{\text{P}}/100 + W^{\text{P}}/100 + A^{\text{P}}/100, \text{ кг,}$$

и для стехиометрических уравнений реакций горения углерода, водорода и серы получим:



Теоретически необходимое количество воздуха  $v_0$  – это такое количество воздуха, кислород которого целиком расходуется на полное окисление горючих компонентов единицы количества топлива (кг, м<sup>3</sup>):

$$V^0 = \frac{M(O_2)}{\rho_{O_2} * 0,21}, \text{ м}^3/\text{кг, м}^3/(\text{м}^3 \text{ топлива});$$

$$V^0 = \frac{\frac{C^{\text{P}} * 32}{12} + \frac{H^{\text{P}} * 32}{4} + \frac{S_{\text{л}}^{\text{P}} * 32}{32} - O^{\text{P}}}{100 * \rho_{O_2} * 0,21} ..$$

В реальных топках невозможно обеспечить полное перемешивание топлива с окислителем, предполагаемое стехиометрическими уравнениями. Поэтому воздух подают с избытком. Отношение действительного количества воздуха ( $V_d$ ) к теоретически необходимому ( $V^0$ ) называется коэффициентом избытка (расхода) воздуха:

$$\alpha = \frac{V_d}{V^0}.$$

Тогда действительное количество воздуха вычисляется по формуле

$$V_d = \alpha * V^0,$$

а избыток воздуха – по формуле

$$\Delta V_{изб} = V_d - V^0 = V^0 * (\alpha - 1).$$

Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_t$  выбирается в зависимости от вида топлива (теплотехнических характеристик топлива), способа сжигания, конструкции топки и способа образования горючей смеси (конструкции горелки) и равен соответственно  $\alpha_t = 1,02/ 1,45/ 1,7$ .

### 3.3. Образование дымовых газов

Дымовые газы представляют собой смесь сухих газов и водяных паров и измеряются в м<sup>3</sup>/кг для твердого топлива или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (при 0 °С, 0,1 МПа) – для газообразного топлива. Тогда объем дымовых газов будет равен суммарному объему водяных газов и водяных паров:

$$V_{г} = V_{сг} + V_{H_2O},$$

где  $V_{сг} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$  или  $V_{сг} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2}^0 + \Delta V_{изб}$ .  
Объем каждого компонента дымовых газов (ДГ):

$$V_{гi} = M_{гi} / \rho_{гi},$$

где  $M_{гi}$  – масса каждого из компонентов дымовых газов, кг.  
Объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{M_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \frac{M_{SO_2}}{\rho_{SO_2}};$$

$$V_{RO_2} = \frac{C^p * \frac{44}{12}}{100 * \rho_{CO_2}} + \frac{S^p * \frac{64}{32}}{100 * \rho_{SO_2}}.$$

Теоретический объем азота ( $\alpha = 1,0$ ):

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + \frac{C^p}{100 \cdot p_{N_2}}$$

Объем избыточного воздуха:

$$\Delta V_{\text{изб}} = V^0 \cdot (\alpha - 1).$$

Объем кислорода в ДГ:

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot \Delta V_{\text{изб}} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0.$$

Теоретический объем водяных паров ( $\alpha = 1,0$ ):

$$V_{H_2O}^0 = \frac{H^p \cdot \frac{36}{4} + W^p}{100 \cdot p_{H_2O}} + \frac{V^0 \cdot d}{100 \cdot p_{H_2O}} + \frac{W_{\phi}}{p_{H_2O}},$$

где  $d$  – влагосодержание воздуха, г/м<sup>3</sup>,  $W_{\phi}$  – количество водяных паров, вносимое в топку, например, для распыливания жидкого топлива, кг/кг.

Действительный объем водяных паров определяется по формуле

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1) \cdot \frac{V^0 \cdot d}{100 \cdot p_{H_2O}}.$$

Теоретический объем сухих газов:

$$V_{\text{сг}}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0.$$

Действительный объем сухих газов:

$$V_{\text{сг}} = V_{\text{сг}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0.$$

Теоретический объем ДГ:

$$V_{\Gamma}^0 = V_{\text{сг}}^0 + V_{H_2O}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0.$$

Действительный объем ДГ:

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0.$$

Объемное содержание CO<sub>2</sub>, %:

$$r_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot 100 / V_{\Gamma}.$$

Объемное содержание SO<sub>2</sub>, %:

$$r_{SO_2} = V_{SO_2} * 100 / V_T .$$

Объемное содержание RO<sub>2</sub>, %

$$r_{RO_2} = V_{RO_2} * 100 / V_T = r_{CO_2} + r_{SO_2} .$$

Объемное содержание N<sub>2</sub>, %.

$$r_{N_2}^0 = V_{N_2}^0 * 100 / V_T .$$

Объемное содержание H<sub>2</sub>O, %:

$$r_{H_2O}^0 = V_{H_2O}^0 * 100 / V_T .$$

Объемное содержание воздуха, %:

$$r_{B_3} = \Delta V_{изб} * 100 / V_T .$$

Объемное содержание кислорода, %:

$$r_{O_2} = V_{O_2} * 100 / V_T .$$

Масса дымовых газов, кг/кг твердого топлива или кг/м<sup>3</sup> газообразного топлива:

$$G_T = V_{RO_2} * p_{RO_2} + V_{N_2}^0 * p_{N_2} + V_{H_2O}^0 * p_{H_2O} + (\alpha - 1) * V^0 * p_{B_3} + a_{yH} * A^p / 100,$$

где  $a_{yH}$  – доля золы в уносе.

Масса золы, кг/кг топлива:

$$G_z = A_d^p / 100.$$

### 3.4. Энтальпии воздуха и дымовых газов

Энтальпии воздуха и дымовых газов определяются на единицу количества топлива, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>.

Энтальпии теоретического и действительного количества воздуха:

$$H_B^o = V^o \cdot C_{ВЛ ВЗ} \cdot t,$$
$$H_B = V_d \cdot C_{ВЛ ВЗ} \cdot t = \alpha \cdot H_B^o,$$

где  $C_{\text{вл.вз}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°С) – удельная, объемная, при постоянном давлении, средняя теплоемкость влажного воздуха.

Энтальпии теоретического и действительного количества дымовых газов:

$$H_{\Gamma}^0 = (V_{RO_2} \cdot C_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot C_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot C_{H_2O})t,$$

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot H_{\text{в}}^0,$$

где  $C_{CO_2}$ ,  $C_{N_2}$ ,  $C_{H_2O}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·°С) – удельные, объемные, при постоянном давлении, средние теплоемкости соответствующих компонентов ДГ.

### 3.5. Определение элементного состава и удельной низшей теплоты сгорания твердых коммунальных отходов (Задача 1)

#### 3.5.1. Исходные данные

Задан морфологический состав твердых коммунальных отходов (таблица 3.1). Элементный состав компонентов ТКО приведен в таблице 3.2. Требуется определить:

- элементный состав компонентов твердых коммунальных отходов, их рабочую и сухую массу;
- удельную низшую рабочую теплоту сгорания ТКО.

Таблица 3.1 – Морфологический состав ТКО ( $g_i$ ), %

№ вар-та	Бу-мага	Пище-вые от-ходы	Де-рево	Тек-стиль	Ко-жа	Поли-меры	Ме-таллы	От-ходы парк.	Стек-ло
0	31,6	32	9,1	7	4,9	4,4	2,8	7,6	0,6
1	19,7	31	3,4	4,9	1	14,1	4,7	13,2	8
2	26,1	45	2	2,9	1,6	3,5	2,2	14	2,7
3	20,8	34	5,1	6,2	4,9	5,2	8	8,8	7
4	30	26	3	5	2	8	7	15	4
5	36,1	12	5,3	4	3,2	10,5	7,8	13,1	8
6	29	26	2	5	5,3	7	8	7,7	10
7	25	28	9	7	5	8	4	8	6
8	22	30	8	6,5	5	7,5	5	9	7
9	30	24	7	5,4	4	5,6	4	12	8

Таблица 3.2 – Элементный состав компонентов сухой массы и влаги рабочей массы ТКО, массовая доля ( $m_i$ ), %.

Ком- по- нент ТКО	Химиче- ский элемент (E)	Состав $C_i, m_i$ %						Влаж- ность при сжигании (W)
		Угле- род (C)	Водо- род (H)	Кисло- род (O)	Азот (N)	Сера (S)	Зола (A)	
Стекло		-	-	-	-	-	100	3
Металл		-	-	-	-	-	100	6,6
Бумага		49,14	6,1	43,03	0,05	0,16	1,52	24,3
Пластик		85,7	14,3	-	-	-	-	13,8
Кожа, резина		42,01	5,32	22,83	5,98	1	22,86	13,8
Текстиль		46,19	6,41	41,85	2,18	0,2	3,17	23,8
Дерево		50,46	5,97	41,2	2	0,05	1	15,4
Пищевые от- ходы		51,4	7,35	32,56	3,82	0,57	4,3	63,8
Отходы парков		49,2	6,5	36,7	2,9	0,35	5	37,9

### 3.5.2. Основные теоретические сведения

Масса ТКО в том виде, в котором она поступает на сжигание, называется рабочей. Рабочая масса ТКО состоит из следующих элементов:

- углерод – С;
- водород – Н;
- кислород – О;
- азот – N;
- сера – S;
- зола – А
- влага – W.

Если выразить содержание каждого элемента в ТКО в процентах по массе, то для элементного состава рабочей массы ТКО будет справедливо:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + A^p + S^p + W^p = 100\%, \quad (1)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $N^p$ ,  $S^p$ ,  $A^p$  и  $W^p$  – содержание в ТКО, соответствующих элементов, золы и влаги (%).

Удалив из рабочей массы влагу ( $W^p$ ), получим сухую массу топлива, состав которой в процентах по массе запишется равенством (2):

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100\%. \quad (2)$$

### 3.5.3. Пример расчета

Пусть задан следующий морфологический состав ТКО ( $g_i$ , % по массе):

- Стекло – 7,6;
- Металл – 7,5;
- Бумага – 32,6;
- Пластик – 1;
- Кожа и резина – 1,4;
- Ткани – 1,8;
- Дерево – 3,8;
- Пищевые отходы – 18,2;
- Отходы парков – 26,1.

Расчет процентного содержания химических элементов в сухой массе ТКО проводится по данным компонентного и элементного состава рабочей массы ТКО ( $C_i$ ), % (таблица 3.2).

Для каждого химического элемента  $E$  определяем его процентное содержание в сухой массе ТКО, используя следующую формулу:

$$E^c = 0.01 * \sum(g_i * m_i), \% \quad (3)$$

Процентное содержание углерода:

$$C^c = 0,01 * (7,6 * 0 + 7,5 * 0 + 32,6 * 49,14 + 1 * 85,7 + +1,4 * 42,01 + +1,8 * 46,19 + 3,8 * 50,46 + 18,2 * 51,4 + +26,1 * 49,2) = 42,41\%.$$

Аналогично проводим расчет для других элементов:

Процентное содержание водорода:  $H^c=5,582$  %

Процентное содержание кислорода:  $O^c=32,17$  %

Процентное содержание азота:  $N^c=1,667$  %

Процентное содержание серы:  $S^c=0,267$  %

Процентное содержание золы:  $A^c=18,098$  %

Для расчета процентного содержания химических элементов в рабочей массе ТКО вычисляем содержание влаги в рабочей массе ТКО по формуле:

$$W^{p\Box} = 0,01 * \sum(g_i * W_i), \% \quad (4)$$

$$W^p = 0,01 * (7,6 * 3 + 7,5 * 6,6 + 32,6 * 24,3 + 1 * 13,8 + 1,4 * 13,8 + + 1,8 * 23,8 + 3,8 * 15,4 + 18,2 * 63,8 + 26,1 * 37,9) = 31,493\%.$$

Переход от процентного содержания элементов в сухой массе к их содержанию в рабочей массе производится с помощью следующей формулы:

$$E^p = E^c * \frac{100-W^p}{100}, \% \quad (5)$$

$$C^p = 42,41 * \frac{100-31,493}{100} = 42,41 * 0,6850 = 29,05 \%,$$

Аналогично проводим расчет для других элементов.

Процентное содержание водорода:  $H^p=3,824$  %;

Процентное содержание кислорода:  $O^p=22,036$  %;

Процентное содержание азота:  $N^p=1,142\%$ ;

Процентное содержание серы:  $S^p=0,183\%$ ;

Процентное содержание золы:  $A^p=12,397\%$ .

Определяем удельную низшую рабочую теплоту сгорания ТКО  $Q_n^p$  – количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 кг ТКО, без учета тепла, израсходованного на испарение влаги, образовавшейся при сгорании этого топлива.  $Q_n^p$  измеряется в кДж/кг или ккал/кг и принимается за основной показатель теплотворности топлива. Удельная низшая рабочая теплота сгорания ТКО может вычисляться по формуле Д.И. Менделеева (6):

$$Q_n^p = 339,4 * C^p + 1257 * H^p - 108,9 * (O^p - S^p) - 25,1 * (9H^p + W^p), \text{ кДж/кг}; \quad (6)$$

$$Q_n^p = 339,4 * 29,05 + 1257 * 3,824 - 108,9 * (22,036 - 0,183) - 25,1 * (9 * 3,824 + 31,493) = 10632,121 \text{ кДж/кг}.$$

### 3.6. Определение расходных характеристик инсинератора (Задача 2)

#### 3.6.1. Исходные данные

Заданы типы инсинераторов, отличающихся по конструкции топочного устройства и коэффициенту избытка воздуха, а также расход твердых коммунальных отходов (таблица 3.3).

Требуется определить расходные характеристики инсинератора.

Таблица 3.3 – Исходные данные для решения Задачи 2

Тип инсинератора			
Слоевая топка		Вращающаяся барабанная топка	
Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,4$		Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,8$	
№ варианта	Расход ТКО, т/ч	№ варианта	Расход ТКО, т/ч
0	0,05	10	0,5
1	0,1	11	1,0
2	0,15	12	1,5
3	0,2	13	2,0
4	0,25	14	2,5
Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,6$		Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,0$	
№ варианта	Расход ТКО, т/ч	№ варианта	Расход ТКО, т/ч
5	0,25	15	2,5
6	0,3	16	3,0
7	0,35	17	3,5
8	0,4	18	4,0
9	0,45	19	4,5

### 3.6.2. Пример расчета

Решение задачи состоит в последовательном выполнении нижеописанных расчетов (а–ж).

а. Вычисление теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания ТКО и образующихся продуктов сгорания

Коэффициентом избытка воздуха называется отношение объема воздуха, действительно израсходованного на сжигание 1 кг рабочей массы (ТКО), к теоретически необходимому. Таким образом, можно выразить коэффициент избытка воздуха следующей формулой (1):

$$\alpha = V_{\text{д}}/V^0. \quad (1)$$

Расчет теоретического объема воздуха, необходимого для сгорания 1 кг ТКО производим по формуле (2):

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,0889 * (C^p + 0,375 * S^p) + 0,265 * H^p - 0,033 * O^p, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (2) \\ V^0 &= 0,0889 * (29,05 + 0,375 * 0,183) + 0,265 * 3,824 - \\ &\quad - 0,033 * 22,036 = 2,875 \text{ м}^3/\text{кг}, \end{aligned}$$

где  $C^p, H^p, S^p, O^p$  – это процентные содержания каждого из химических элементов в рабочей массе ТКО, %. Тогда действительное количество воздуха  $V^p$ , подаваемого в камеру сжигания инсинератора будет вычисляться по формуле (3):

$$V_{\text{д}} = \alpha * V^0, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3)$$

При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$  действительное и теоретическое количества воздуха, необходимого для полного сжигания 1 кг ТКО, будут равны.

Расчет продуктов сгорания проводится по элементному составу рабочей массы ТКО. Продукты сгорания бывают твердые (зола) и газообразные (другое название дымовые газы). Дымовые газы содержат трехатомные газы  $\text{RO}_2$  ( $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ), азот  $\text{N}_2$ , водяные пары, избыточный воздух.

Вычисление объема трехатомных газов, образующегося при сгорании 1 кг ТКО, производится по формуле (4):

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2} &= V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0,01866 * (C^p + 0,375 * S^p), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4) \\ V_{\text{RO}_2} &= 0,01866 * (29,05 + 0,375 * 0,183) = 0,542 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Вычисление теоретического объема азота  $\text{N}_2$ , выделяющегося при сжигании 1 кг ТКО, производится по формуле (5):

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2}^0 &= 0,79 * V^0 + 0,008 * N^p, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (5) \\ V_{\text{N}_2}^0 &= 0,79 * 2,875 + 0,008 * 1,142 = 2,28 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Вычисление теоретического объема водяных паров  $H_2O$ , образующихся при сжигании 1 кг ТКО производится по формуле (6):

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 * H^p + 0,0124 * W^p + 0,0161 * V^0, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (6)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 * 3,824 + 0,0124 * 31,493 + 0,0161 * 2,875 = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Вычисление теоретического объема дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг ТКО производится по формуле (7):

$$V_{\Gamma}^0 = V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0 + V_{RO_2}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (7)$$

$$V_{\Gamma}^0 = 0,861 + 2,28 + 0,842 = 3,683 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

*б. Определение расхода ТКО, подлежащего термической утилизации, типа инсинератора и условий организации рабочего процесса для обеспечения экологически безопасной эксплуатации*

Принимаем расход ТКО  $G = 1000$  кг/ч.

Для реализации процесса принимаем инсинератор с вращающимся барабаном, камерой дожигания, системой золоудаления, котлом-утилизатором и системой очистки дымовых газов.

Так как в реальных условиях состав отходов может колебаться, то для исключения резких колебаний температур в инсинераторе, а также для обеспечения требуемой температуры процесса предусмотрена подача дополнительного топлива (жидкого или газообразного).

Для обеспечения качественного протекания процесса в выбранном типе инсинератора рекомендуется поддерживать коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 2$ , температура дымовых газов на выходе из камеры дожигания (КД)  $t_{\text{кд}} = 1200\text{--}1000$  °С, время пребывания в камере дожигания не менее 2 с.

Принимаем температуру дымовых газов на выходе из КД  $t_{\text{кд}} = 1200$  °С и коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 2$ .

*в. Оценка величины теоретической температуры горения ТКО*

При определении теоретической температуры горения  $t_g$  предполагается, что вся выделившаяся теплота сообщается продуктам сгорания. Температура, до которой нагреются продукты сгорания, зависит от количества сообщенной им теплоты, состава и количества продуктов сгорания и их удельной теплоемкости.

Теоретическая температура горения для ТКО составляет около  $1000\text{--}1300$  °С. Поэтому выполняем предварительный расчет энтальпий воздуха и дымовых газов для двух значений температуры  $800$  и  $1500$  °С. Энтальпия (Н) выражает количество тепла, содержащееся при данной температуре и давлении в заданном объеме вещества (воздуха и дымовых газов в нашем случае)

Вычисление энтальпии теоретического количества воздуха производится по формуле (8):

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 * C_{\text{в}} * t, \text{ кДж/кг}, \quad (8)$$

где  $C_B$  – теплоемкость воздуха при данной температуре, кДж/(м<sup>3</sup>\*К);  $t$  – заданные значения температуры (800 и 1500 °С).

$$H_{B800}^0 = 2,875 * 1,4124 * 800 = 3248,52 \text{ кДж/кг},$$

$$H_{B1500}^0 = 2,875 * 1,4937 * 1500 = 6441,581 \text{ кДж/кг}.$$

Значения теплоемкости воздуха и дымовых газов при различных температурах можно найти в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Удельные средние теплоемкости газов и воздуха при постоянном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{CO}_2}$	$C_{\text{N}_2}$	$C_{\text{O}_2}$	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	$C_B$	$t, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{CO}_2}$	$C_{\text{N}_2}$	$C_{\text{O}_2}$	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	$C_B$
	кДж/(м <sup>3</sup> *К)						кДж/(м <sup>3</sup> *К)				
0	1,6010	1,2955	1,3069	1,4954	1,3198	1200	2,2655	1,4154	1,5017	1,7782	1,4623
100	1,7016	1,2968	1,3186	1,5063	1,3253	1300	2,2915	1,4263	1,5117	1,8042	1,4736
200	1,7887	1,3006	1,3362	1,5235	1,3328	1400	2,3154	1,4359	1,5214	1,8293	1,4841
300	1,8641	1,3077	1,3571	1,5436	1,3433	<b>1500</b>	<b>2,3372</b>	<b>1,4451</b>	<b>1,5306</b>	<b>1,8541</b>	<b>1,4937</b>
400	1,9312	1,3173	1,3785	1,5666	1,3555	1600	2,3573	1,4539	1,5390	1,8775	1,5029
500	1,9902	1,3286	1,3990	1,5909	1,3693	1700	2,3761	1,4623	1,5474	1,9010	1,5113
600	2,0426	1,3412	1,4179	1,6161	1,3840	1800	2,3933	1,4698	1,5553	1,9228	1,5189
700	2,0900	1,3546	1,4355	1,6425	1,3986	1900	2,4092	1,4770	1,5629	1,9437	1,5268
<b>800</b>	<b>2,1327</b>	<b>1,3680</b>	<b>1,4510</b>	<b>1,6693</b>	<b>1,4124</b>	2000	2,4239	1,4837	1,5704	1,9643	1,5340
900	2,1708	1,3806	1,4657	1,6969	1,4259	2100	2,4377	1,4904	1,5771	1,9840	1,5411
1000	2,2052	1,3928	1,4786	1,7242	1,4384	2200	2,4503	1,4962	1,5842	2,0024	1,5474
1100	2,2366	1,4045	1,4904	1,7514	1,4594	2300	2,4620	1,5021	1,5909	2,0204	1,5536

Энтальпия теоретического количества дымовых газов рассчитывается по формуле (9):

$$H_{\Gamma}^0 = (V_{\text{RO}_2} * C_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 * C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 * C_{\text{H}_2\text{O}}) * t, \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

$$H_{\Gamma800}^0 = (0,542 * 2,1327 + 2,28 * 1,368 + 0,861 * 1,6693) * 800 = 4569,784 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$$H_{\Gamma1500}^0 = (0,542 * 2,3372 + 2,28 * 1,4451 + 0,861 * 1,8541) * 1500 = 9236,956 \text{ кДж/кг}.$$

Вычисление энтальпии действительного количества дымовых газов производится с использованием формулы (10):

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) * H_B^0, \text{ кДж/кг}. \quad (10)$$

$$H_{\Gamma800} = 4569,784 + (2 - 1) * 3248,52 = 7818,304 \text{ кДж/кг}.$$

$$H_{\Gamma1500} = 9236,956 + (2 - 1) * 6441,581 = 15678,537 \text{ кДж/кг}.$$

Полезное тепловыделение  $Q_{\text{TKO}}^{\text{use}}$  при термическом окислении ТКО с учетом потерь в реакционном объеме (величину потерь  $q_{\text{los}}$  принимаем 3% или 0,03) будет равно (11):

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{use}} = Q_{\text{H}}^{\text{p}} * (1 - q_{\text{los}}), \text{кДж/кг} \quad (11)$$

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{use}} = 10632,121 * (1 - 0,03) = 10313,157 \text{ кДж/кг.}$$

Приравнивая полезное тепловыделение при термическом окислении ТКО к энтальпии дымовых газов при теоретической температуре горения, можно путем интерполяции в интервале температур 800–1500 °С определить температуру горения. Согласно нашему примеру  $t_g = 1022$  °С.

Сравнение полученного значения теоретической температуры горения  $t_g$  (1022 °С) с рекомендуемой на выходе из КД равной 1200 °С свидетельствует о необходимости в дополнительном топливе (ДТл) для повышения температуры процесса до рекомендуемой.

*2. Определение расхода дополнительного топлива или охлаждающей воды*

Для подачи дополнительного топлива в камере сгорания инсинератора предусматривается дополнительное горелочное устройство.

В качестве дополнительного топлива примем дизельное топливо со следующими характеристиками:

- удельная низшая теплота сгорания  $Q_{\text{ндтл}}^{\text{p}} = 42600$  кДж/кг;
- теоретическое количество воздуха  $V_{\text{дтл}}^0 = 10,62$  м<sup>3</sup>/кг;
- теоретический объем азота  $V_{\text{N}_2\text{дтл}}^0 = 8,39$  м<sup>3</sup>/кг;
- теоретический объем трехатомных газов  $V_{\text{RO}_2\text{дтл}} = 1,58$  м<sup>3</sup>/кг;
- теоретический объем водяных паров  $V_{\text{H}_2\text{Oдтл}}^0 = 1,51$  м<sup>3</sup>/кг;
- теоретический объем дымовых газов  $V_{\text{гдтл}}^0 = 11,48$  м<sup>3</sup>/кг.

Вычисляем энтальпию теоретического количества воздуха при рекомендуемой температуре  $t_{\text{кд}}=1200$  °С, используя формулу (8):

$$H_{\text{г}1200}^0 = V_0 * C_{\text{в}} * t = 2,875 * 1,4623 * 1200 = 5044,935 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия теоретического количества дымовых газов при температуре  $t_{\text{кд}}=1200$  °С вычисляется по формуле (9):

$$H_{\text{г}1200}^0 = (0,542 * 2,2655 + 2,28 * 1,4154 + 0,861 * 1,7782) * 1200 = 7183,252 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия действительного количества дымовых газов (после сжигания ТКО) определяется по формуле (10):

$$H_{\text{г}1200} = 7183,152 + (2 - 1) * 5044,935 = 12228,187 \text{ кДж/кг.}$$

Вычисляем удельное недостающее количество теплоты при сжигании ТКО по формуле (12):

$$\Delta Q = H_{\text{г}1200} - Q_{\text{ТКО}}^{\text{use}}, \text{кДж/кг}, \quad (12)$$

$$\Delta Q = 12228,187 - 10313,157 = 1915,03 \text{ кДж/кг.}$$

Вычисляем энтальпии воздуха, теоретического и действительного количества дымовых газов после сжигания ДТл с использованием формул (8, 9, 10). Снижение коэффициента  $\alpha$  связано с тем, что в процессе сжигания происходит нагрев дизельного топлива, что приводит к его частичному испарению, и пары дизельного топлива лучше перемешиваются с воздухом, поэтому дополнительная горелка обеспечивает полное сгорание при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ .

В данном расчете следует использовать характеристики дополнительного топлива, приведенные выше.

$$\begin{aligned}
 H_{\text{ВДТл}}^0 &= V_0 * C_B * t = 10,62 * 1,4623 * 1200 = 18258,329 \text{ кДж/кг.} \\
 H_{\text{ГДТл}}^0 &= (V_{\text{RO}_2} * C_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 * C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 * C_{\text{H}_2\text{O}}) * t, \\
 H_{\text{ГДТл}}^0 &= (1,58 * 2,2655 + 8,39 * 1,4154 + 1,51 * 1,7782) * \\
 &* 1200 = 21751,08 \text{ кДж/кг,} \\
 H_{\text{ГДТл}} &= H_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1) * H_{\text{в}}^0 = 21751,08 + (1,1 - 1) * 18258,329 = \\
 &= 23576,913 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.
 \end{aligned}$$

Затем вычисляем полезное тепловыделение при сжигании ДТл (13):

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{ДТл}}^{\text{use}} &= Q_{\text{ндтл}}^{\text{p}} * (1 - q_{\text{los}}) - H_{\text{ГДТл}}, \text{ кДж/кг,} & (13) \\
 Q_{\text{ДТл}}^{\text{use}} &= 42620 * (1 - 0,03) - 23576,913 = 17764,487 \text{ кДж/кг.}
 \end{aligned}$$

Удельный расход ДТл вычисляется по формуле (14):

$$\begin{aligned}
 b &= \Delta Q / Q_{\text{ДТл}}^{\text{use}}, \text{ кг ДТл/кг ТКО.} & (14) \\
 b &= \frac{1915,03}{17764,487} = 0,1078 \text{ кг ДТл/кг ТКО.}
 \end{aligned}$$

В зависимости от состава ТКО теоретическая температура горения может превышать рекомендуемую. В этом случае величина  $\Delta Q$  в формуле (12) будет отрицательной, и для обеспечения поддержания рекомендуемой температуры нужно или корректировать морфологический состав ТКО, или подавать в реакционный объем через форсунки охлаждающую воду (или жидкие негорючие отходы), которая, испаряясь, снижает температуру процесса до необходимой. При необходимости также можно подавать дополнительно холодный воздух. В этом случае удельное количество охлаждающей воды можно определить из следующей зависимости:

$$g = (Q_{\text{ТКО}}^{\text{use}} - H_{\text{г1200}}) / (h_{\text{п}} - h_{\text{вд}}), \text{ кг/кг (ТКО)},$$

где  $h_{\text{п}} = 2500 + C_{\text{H}_2\text{O}} * 1200 / \rho_{\text{вп}}$ , кДж/кг – энтальпия водяного пара, получаемого при испарении охлаждающей воды;  $h_{\text{вд}} = C_{\text{вд}} * t_{\text{вд}}$ , кДж/кг – энтальпия

подаваемой охлаждающей воды ( $C_{вд} = 4,19$  кДж/(кг \* °С),  $t_{вд} = 20$  °С);  $\rho_{ен}$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность водяного пара при нормальных условиях, принимается равным 0,805 кг/м<sup>3</sup>.

Из камеры догорания инсинератора выходят дымовые газы при температуре  $t_{кд} = 1200$  °С.

Тогда расход газообразных продуктов сгорания с учетом водяных паров  $V_g$  определяется по зависимости:

$$\underline{V}_g = G * [V_g^0 + (\alpha_{ух} - 1) * V^0 + g/\rho_{вп}], \text{ м}^3/\text{ч}.$$

*д. Удельные действительные количества воздуха и дымовых газов с учетом дополнительного дизельного топлива (на 1 кг ТКО)*

Суммарный объем воздуха вычисляется по формуле (15):

$$\begin{aligned} \Sigma V_B^0 &= \alpha * V^0 + b * \alpha_{дтл} * V_{дтл}^0, \text{ м}^3/\text{кг}. \\ \Sigma V_B^0 &= 2 * 2,875 + 0,1078 * 1,1 * 10,62 = 7,009 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (15)$$

Суммарный объем дымовых газов считается по формуле (16):

$$\begin{aligned} \Sigma V_g &= [V_g^0 + (\alpha - 1) * V^0] \text{ТКО} + b * [V_{гдтл}^0 + (\alpha - 1) * V_{дтл}^0] \text{ДТЛ}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \\ \Sigma V_g &= [3,683 + (2 - 1) * 2,875] + 0,1078 * [11,48 + (1,1 - 1) * 10,62] = \\ &= 7,91 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (16)$$

Суммарный объем теоретического количества азота вычисляется по формуле (17):

$$\begin{aligned} \Sigma V_{N_2}^0 &= V_{N_2}^0 + b * V_{N_2дтл}^0, \text{ м}^3/\text{кг}. \\ \Sigma V_{N_2}^0 &= 2,28 + 0,1078 * 8,39 = 3,184 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (17)$$

Суммарный объем количества трехатомных газов вычисляется по формуле (18):

$$\begin{aligned} \Sigma V_{RO_2} &= V_{RO_2} + b * V_{RO_2дтл}, \text{ м}^3/\text{кг}. \\ \Sigma V_{RO_2} &= 0,542 + 0,1078 * 1,58 = 0,712 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (18)$$

Суммарный объем теоретического количества водяных паров вычисляется по формуле (19):

$$\begin{aligned} \Sigma V_{H_2O}^0 &= V_{H_2O}^0 + b * V_{H_2Oдтл}^0, \text{ м}^3/\text{кг}. \\ \Sigma V_{H_2O}^0 &= 0,861 + 0,1078 * 1,51 = 1,024 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (19)$$

Суммарный объем избыточного воздуха (20):

$$\begin{aligned}\Sigma V_B &= (\alpha - 1) * V^0 + (\alpha_{\text{дтл}} - 1) * V_{\text{дтл}}^0 * b, \text{ м}^3/\text{кг}. \\ \Sigma V_B &= (2 - 1) * 2,875 + (1,1 - 1) * 10,62 * 0,1078 = 2,989 \text{ м}^3/\text{кг}.\end{aligned}\quad (20)$$

*е. Расходные характеристики инсинератора*

Расход ТКО  $G = 1000$  кг/ч.

Расход ДТЛ  $B = b * G = 0,1078 * 1000 = 107,8$  кг/ч.

Расход воздуха  $\underline{V} = G * \Sigma V_B^0 = 1000 * 7,009 = 7009$  м<sup>3</sup>/ч.

Расход охлаждающей воды  $G_{\text{воды}} = G * g$ , кг/ч.

Расход дымовых газов  $\underline{V}_Г = G * \Sigma V_Г = 1000 * 7,91 = 7910$  м<sup>3</sup>/ч.

Расход дымовых газов  $\underline{V}_Г$  с учетом образующихся водяных паров при впрыскивании охлаждающей воды определяется по формуле:

$$\underline{V}_Г = G * \left[ V_Г^0 + (\alpha - 1) * V^0 + \frac{g}{\rho_{\text{вп}}} \right], \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}. \quad (21)$$

Тепловая мощность рассчитывается по формуле (22):

$$Q = G * Q_{\text{н}}^{\text{р}} + B * Q_{\text{ндтл}}^{\text{р}}, \text{ кВт}. \quad (22)$$

$$\begin{aligned}Q &= 1000 * 10632,121 + 107 * 42620 = \frac{15226557 \text{ кДж}}{\text{ч}} = \\ &= 4229,599 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

Из камеры догорания инсинератора выходят дымовые газы при температуре  $t_{\text{кд}} = 1200$  °С.

*ж. Методы утилизации теплоты*

Одним из методов утилизации теплоты уходящих газов в интервале температур от  $t_{\text{кд}} = 1200$  °С до температуры дымовых газов, рекомендуемой для системы газоочистки ( $t_{\text{го}} = t_{\text{гтс}}$ ), является применение котла утилизатора для получения за счет утилизируемой теплоты дополнительно водяного пара, горячей воды, используемых в дальнейшем для теплоэнергоснабжения систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, получения электрической энергии, холода.

### **3.7. Газификация твердых коммунальных отходов (Задача 3)**

#### **3.7.1. Исходные данные**

На основе решения Задачи 1 для определенного элементного состава «рабочей» массы отходов требуется выполнить технологический расчет газогенератора. Полученный генераторный газ очищается, охлаждается и подается в горелочные устройства теплоиспользующего оборудования или в двигатель внутреннего сгорания.

В расчете необходимо определить:

- выход генераторного газа на 1 кг отходов;
- содержание водяных паров в газе на выходе из газогенератора;

- количество воздуха, расходуемое на образование 1 м<sup>3</sup> генераторного газа;
- количество воздуха, расходуемого на газификацию 1 кг отходов;
- плотность полученного генераторного газа;
- низшую теплоту сгорания генераторного газа;
- КПД газогенератора.
- количество газообразных и твердых продуктов сгорания.

Один килограмм ТКО в рабочем состоянии имеет элементный состав, приведенный в таблице 3.1 (см. решение Задачи 1). Расход ТКО принимаем по исходным данным для решения Задачи 2. Молекулярная масса элементов, входящих в состав «рабочей» массы отходов, приведена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Молекулярная масса элементов,  $M_i$ , г/ моль

Элемент	Молекулярная масса, г/моль
Углерод С	12
Водород Н	1
Кислород О	16
Азот N	14
Сера S	32
Влага W	18

### 3.7.2. Основные теоретические сведения

Целью газификации ТКО является получение горючего газа (генераторного газа), который впоследствии может быть использован в ДВС для получения механической энергии.

Объем 1 моля газа при «нормальных» условиях (температура 0 °С и давление 760 мм рт. ст.) составляет  $V_{1m} = 22,4$  м<sup>3</sup>/кмоль.

Состав генераторного газа может быть рассчитан теоретически. Однако результаты такого расчета расходятся с опытными данными. Поэтому обычно состав генераторного газа задаются на основании данных лабораторных исследований или полученных путем обобщения эксплуатационного опыта (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Состав генераторного газа, полученного при газификации отходов сортировки ТКО (неконденсируемые компоненты, % об.)

CO <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
17,0	0,7	0,0	62,5	8,8	0,7	1,8	8,5

Содержание углерода в 1 куб. метре генераторного газа:

$$C_r = \frac{[M_C \cdot (CO + CO_2 + CH_4 + 2 \cdot C_2H_4)]}{(V_{1m} \cdot 100)}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  – объемное содержание соответствующих компонентов в генераторном газе, %;  $M_c$  – молекулярная масса углерода, кг/кмоль;  $V_{1m}$  – объем 1 киломоля газа в  $m^3$  при н.у.,  $m^3/кмоль$ .

Тогда из 1 кг отходов получим следующее количество сухого генераторного газа:

$$V_r = (C_p - C_n) / (C_r * 100), \text{ кг/м}^3,$$

где  $C_n$  – потери углерода с золой в виде пыли – принимаем равными 2%.

При расчете количества воздуха  $L$ , необходимого для образования 1  $m^3$  сухого генераторного газа, пренебрегаем незначительным количеством азота, содержащемся в отходах, и учитываем только азот, содержащийся в воздухе (объемная доля азота в воздухе  $N_{2B} = 0,79$ ):

$$L_r = \frac{N_2}{(100 * N_{2B})}, \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где  $N_2$  – содержание азота в генераторном газе, % об. Тогда количество воздуха, необходимое для газификации 1 кг отходов, составит

$$L = L_r * V_r, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Источниками влаги в газе служат:

- влага отходов;
- влага от сгорания водорода топлива;
- влага, поступающая с воздухом;
- водяные пары, подаваемые с паровым дутьем.

Количество влаги, поступающей с воздухом:

$$G_{BB} = \frac{(d * L)}{1000}, \text{ кг/кг ТКО},$$

где  $d$  – среднее влагосодержание воздуха,  $г/м^3$  (принимаем  $d = 10 \text{ г/м}^3$ ).

Количество киломолей влаги, вносимое с отходами, воздухом и получаемое при сгорании водорода:

$$N_B = \frac{W_p}{M_B * 100} + \frac{G_{WB}}{M_B} + \frac{H_p}{M_H * 100}, \text{ кмоль/кг},$$

где  $W_p$  и  $H_p$  – процентное содержание влаги и водорода соответственно в «рабочей» массе отходов, %;  $M_B$ ,  $M_H$  – молярная масса воды и водорода соответственно,  $кг/кмоль$ .

Однако часть водяных паров расходуется на образование  $H_2$ ,  $CH_4$  и  $C_2H_4$ , тогда количество молей оставшейся в газе воды можно найти следующим образом:

$$N_{вг} = N_{в} - \frac{(H_2 + 2*CH_4 + 2*C_2H_4)*V_{г}}{(V_{1m}*100)}, \text{ моль/кг},$$

где  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  – процентное содержание компонентов в генераторном газе, % об.

Масса водяных паров во влажном генераторном газе:

$$G_{вг} = N_{вг} * M_{в}, \text{ кг/кг ТКО}.$$

Плотность сухого генераторного газа при н.у. составит

$$\rho = 0,0125 * CO + 0,0009 * H_2 + 0,0072 * CH_4 + 0,0143 * O_2 + 0,0125 * N_2 + 0,0125 * C_2H_4 + 0,0178 * Ar + 0,0198 * CO_2, \text{ кг/м}^3.$$

Удельная низшая теплота сгорания сухого генераторного газа:

$$Q_{сг} = 126,44 * CO + 107,6 * H_2 + 357,97 * CH_4 + 143,2 * C_2H_4, \text{ кДж/м}^3.$$

Коэффициент полезного действия газогенератора:

$$\eta = \frac{Q_{сг} * V_{г} * 100}{Q_{от}}, \text{ \%},$$

где  $Q_{ТКО}$  – удельная низшая теплота сгорания «рабочей» массы ТКО, кДж/кг.

Материальный баланс газификации отходов сводится в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Материальный баланс газификации отходов

	Приходная часть, кг	Показатель	Расходная часть, кг	Показатель
1	Рабочая масса отходов		Масса сухого генераторного газа ( $V_{г} * \rho$ )	
2	Масса сухого воздуха $1,293 * L$		Масса водяных паров в газе	
3	-		Масса золы	
Итого				

Невязка между приходной и расходной частями материального баланса может быть обусловлена неточностью анализов отходов и генераторного газа.

Теоретически необходимое количество воздуха (при нормальных условиях) для полного сгорания единицы количества генераторного газа (газообразного топлива), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n - O_2],$$

где  $CO$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $C_m H_n$ ,  $O_2$  – процентное объемное содержания горючих компонентов и кислорода в газообразном топливе, %.

Объем трехатомных газов при сжигании газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n).$$

Теоретический объем азота при сжигании газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2.$$

Теоретический объем водяных паров при сжигании газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01\left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S + H_2 + 0,124d_r + 1,61V^0\right),$$

где  $d_r = (5-10)$  г/м<sup>3</sup> – влагосодержание газообразного топлива.

Теоретический объем дымовых газов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_r^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0.$$

Действительный объем дымовых газов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_r = V_r^0 + (\alpha - 1)V^0,$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха при сжигании генераторного газа, который принимается равным 1,1.

### 3.7.3. Пример расчета

Пусть один килограмм «рабочей» массы ТКО имеет следующий элементный состав в % по массе (см. Задачу 1):

- углерод  $C^p = 29,05$ ;
- водород  $H^p = 3,824$ ;
- сера  $S^p = 0,183$ ;
- кислород  $O^p = 22,036$ ;
- азот  $N^p = 1,142$ ;
- зола  $A^p = 12,397$ ;
- влага  $W^p = 31,493$ .

Согласно опытным данным, сухой генераторный газ, полученный при газификации отходов сортировки ТКО, имеет следующий состав (в % по объему), представленный в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Состав сухого генераторного газа

CO <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	CO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
17,0	0,7	0,0	62,5	8,8	0,718	8,5

Учитывая незначительное содержание серы в «рабочей» массе ТКО, для упрощения расчетов можно ее содержанием пренебречь или отнести его к содержанию золы в ТКО.

Содержание углерода в 1 куб. метре сухого генераторного газа:

$$C_{\Gamma} = [M_c * (CO + CO_2 + CH_4 + 2 * C_2H_4)] / (V_{1m} * 100), \text{ кг/м}^3,$$

где  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  – объемное содержание соответствующих компонентов в сухом генераторном газе, %;  $M_c$  – масса 1 киломоля углерода, кг/кмоль;  $V_{1m}$  – объем 1 киломоля в м<sup>3</sup> при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кмоль.

$$C_{\Gamma} = [12 * (8,8 + 17,0 + 1,8 + 2*0,7)] / (22,4 * 100) = 0,155 \text{ кг/м}^3.$$

Разделив количество углерода ТКО, перешедшее в генераторный газ, на содержание углерода в 1 м<sup>3</sup> генераторного газа, получим выход сухого генераторного газа на 1 кг «рабочей» массы ТКО:

$$V_{\Gamma} = (C - C_{\Pi}) / (C_g * 100), \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $C_{\Pi}$  – потери углерода ТКО вместе с золой и в виде пыли, уносимой из газогенератора, %;  $C_{\Pi} = 1,5-2,5$  %, принимаем  $C_{\Pi} = 2$  %.

$$V_{\Gamma} = (29,05 - 2) / (0,155 * 100) = 1,745 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество воздуха, необходимое для образования 1 м<sup>3</sup> сухого генераторного газа, можно определить на основании материального баланса азота, который при газификации ТКО переходит из воздуха в генераторный газ (при этом содержанием азота в ТКО пренебрегаем ввиду его незначительного количества).

$$L_{\Gamma} = N_2 / N_{2в} = 62,5 / 79 = 0,791 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ (сухого генераторного газа),}$$

где  $N_2$ ,  $N_{2в}$  – содержание азота, соответственно, в сухом генераторном газе и в воздухе, % об.

Количество воздуха, необходимое для газификации 1 кг ТКО,

$$L = L_{\Gamma} * V_{\Gamma} = 0,791 * 1,745 = 1,38 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса водяных паров, содержащихся в генераторном газе, складывается из водяных паров испарившейся влаги ТКО, образующихся при окислении водорода ТКО, вносимых с воздухом и паровым дутьем, если оно применяется, за вычетом водяных паров, израсходованных на образование H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

Количество водяных паров, поступающих с воздухом:

$$G_{\text{ВВ}} = d * L / 1000, \text{ кг/кг ТКО},$$

где  $d$  – среднее влагосодержание воздуха, г/м<sup>3</sup> (принимается  $d = 10$  г/м<sup>3</sup>).

$$G_{\text{ВВ}} = 10 * 1,38 / 1000 = 0,0138 \text{ кг/кг ТКО}.$$

Количество киломолей водяного пара, вносимое с ТКО, воздухом и получаемое при окислении водорода:

$$N_{\text{В}} = W^{\text{P}} / (M_{\text{В}} * 100) + G_{\text{ВВ}} / M_{\text{В}} + H^{\text{P}} / (M_{\text{H}} * 100), \text{ кмоль/кг},$$

где  $W^{\text{P}}$ ,  $H^{\text{P}}$  – массовое содержание влаги и водорода в «рабочей» массе ТКО, %;  $M_{\text{В}}$ ,  $M_{\text{H}}$  – масса 1 киломоля соответственно воды и водорода, кг/кмоль.

$$N_{\text{В}} = 31,493 / (18 * 100) + 0,0138 / 18 + 3,824 / (1 * 100) = 0,0565 \text{ кмоль/кг}.$$

Из них часть водяных паров расходуется на образование  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Количество киломолей оставшегося в газе водяного пара:

$$N_{\text{ВГ}} = N_{\text{В}} - V_{\text{В}} * (\text{H}_2 + 2 * \text{CH}_4 + 2 * \text{C}_2\text{H}_4) / (V_{1\text{м}} * 100), \text{ кмоль/кг};$$

$$N_{\text{ВГ}} = 0,0565 - 1,745 * (8,5 + 2 * 0,7 + 2 * 1,8) / (22,4 * 100) = 0,046 \text{ кмоль/кг}.$$

Масса водяных паров во влажном генераторном газе:

$$G_{\text{ВГ}} = N_{\text{ВГ}} * M_{\text{В}} = 0,046 * 18 = 0,828 \text{ кг/кг ТКО}.$$

Влагосодержание генераторного газа:

$$d_{\text{Г}} = G_{\text{ВГ}} / V_{\text{Г}} = 0,828 / 1,745 = 0,474 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность сухого генераторного газа:

$$\rho = 0,0125 * \text{CO} + 0,0009 * \text{H}_2 + 0,0072 * \text{CH}_4 + 0,0143 * \text{O}_2 +$$

$$+ 0,0125 * \text{N}_2 + 0,0125 * \text{C}_2\text{H}_4 + 0,0178 * \text{Ar} + 0,0198 * \text{CO}_2, \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho = 0,0125 * 8,8 + 0,0009 * 8,5 + 0,0072 * 1,8 + 0,0143 * 0 +$$

$$+ 0,0125 * 62,5 + 0,0125 * 0,7 + 0,0178 * 0,7 + 0,0198 * 17 =$$

$$= 1,2696 \text{ кг/м}^3.$$

Удельная низшая теплота сгорания сухого генераторного газа:

$$Q_{\text{сг}} = 126,44 * 8,8 + 107,6 * 8,5 + 357,97 * 1,8 + 143,2 * 0,7 =$$

$$= 2771,858 \text{ кДж/м}^3.$$

Коэффициент полезного действия газификации ТКО:

$$\eta = Q_{\text{сг}} * V_{\text{Г}} * 100 / Q_{\text{ТКО}} = 2771,858 * 1,745 * 100 / 10632,121 = 45,493 \text{ \%}.$$

Для проверки правильности расчета материальных потоков составляют материальный баланс газификации на 1 кг ТКО (таблица 3.9).

Невязка между приходной и расходной частями материального баланса составила  $2,809 - 2,784 = 0,025$  кг, или 0.9%, что может быть обусловлено неточностью анализов ТКО и генераторного газа.

Таблица 3.9 – Материальный баланс газификации отходов

	Приходная часть, кг	Показатель	Расходная часть, кг	Показатель
1	Рабочая масса отходов	1,00	Масса сухого генераторного газа ( $V_{\Gamma} * \rho$ )	1,2696 * 1,745= 2,215
2	Масса сухого воздуха	1,293 * 1,38 = 1,784	Масса водяных паров в газе ( $G_{\text{вг}}$ )	0,474
3	-		Масса золы	0,12
Итого		2,784		2,809

В заключение рассчитывается теоретически необходимый объем воздуха для полного сгорания сухого генераторного газа и объем образующихся при этом газообразных продуктов сгорания.

Теоретически необходимый объем воздуха:

$$V^0 = 0,0476 * [0,5 * CO + 0,5 * H_2 + \sum(m + n / 4) * C_m H_n - O_2], \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V^0 = 0,0476 * [0,5 * 8,8 + 0,5 * 8,5 + (1 + 4 / 4) * 1,8 + (2 + 4 / 4) * 0,7] = 0,683 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем трехатомных газов:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 * (CO_2 + CO + \sum(m * C_m H_n)), \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 * (17 + 0,8 + 2 * 0,7 + 1 * 1,8) = 0,29 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем азота:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 * V^0 + 0,01 * N_2 = 0,79 * 0,683 + 0,01 * 62,5 = 1,1645 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем водяных паров:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 * (\sum(n * C_m H_n / 2) + H_2 + H_2S + 0,124 * d_g + 1,61 * V^0), \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

при  $d_g = 10 \text{ г}/\text{м}^3$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 * (4 * 0,7 / 2 + 4 * 1,8 / 2 + 8,5 + 0,124 * 10 + 1,61 * 0,683) = 0,158 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем дымовых газов:

$$V_G^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,29 + 1,1645 + 0,158 = 1,6125 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ генераторного газа.}$$

### 3.8. Пиролиз твердых коммунальных отходов (Задача 4)

#### 3.8.1. Исходные данные

На основе решения Задачи 1 по заданному расходу ТКО ( $G$ ), определенным значениям содержания влаги ( $W^p$ ) и золы ( $A^p$ ) в «рабочей» массе ТКО требуется выполнить ориентировочный технологический расчет пиролиза ТКО. Полученный при этом твердый остаток может использоваться в качестве топлива, а также адсорбента; пиролизный газ – после очистки непосредственно как газообразное топливо в топочных устройствах теплоиспользующего оборудования или в двигателях внутреннего сгорания; после охлаждения, сопровождающегося конденсацией, – для получения жидкого топлива, близкого к печному топливу, неконденсирующегося горючего газа и водяного конденсата, пригодного после нейтрализации в качестве технической воды.

Определить:

- зольность «сухой» массы реальных ТКО;
- удельные выходы летучих веществ, твердого остатка, смолистых веществ, неконденсирующегося газа и водяного конденсата;
- удельные теплотворные способности реальных ТКО и горючих компонентов продуктов пиролиза;
- ориентировочные удельные затраты теплоты и тепловой мощности на осуществление пиролиза реальных ТКО при температуре 600 °С;
- прогнозируемые расходы летучих веществ, твердого остатка, смолистых веществ, неконденсирующегося газа и водяного конденсата;
- прогнозируемые располагаемые тепловые мощности реальных ТКО, смолистых веществ, твердого остатка и неконденсирующихся газов.

#### 3.8.2. Основные теоретические сведения

В России большая работа по разработке научно-технических основ термической утилизации ТКО и их отдельных компонентов была проведена в «НИИСТРОМКОМПОЗИТ» (г. Красноярск), на основе которой была разработана «Технология НИИСК» по термической утилизации ТКО с использованием пиролиза [11]. Специалистами НИИСК была предложена средняя статистическая морфологическая модель ТКО России: бумага – 24–32,3%, пищевые отходы – 36,5–40,0%, древесина – 2,0–2,5%, текстиль – 3,9–5,0%, кожа – 1,5–1,8%, резина – 2,0–2,3%, пластмасса – 7,8–8,5%, группа неорганических отходов – 11,0–12,4%, металлы – 3,0–3,5%. Разработана примерная стехиометрическая формула горючей массы ТКО:  $C_{80} H_{145} O_{50} N_2 S Cl$  с расчетной теплотой сгорания 19567,3 кДж/кг следующего элементного состава в процентах по массе: С – 48%,  $H_2$  – 7,25%,  $O_2$  – 40,0%,  $N_2$  – 1,4%, S – 1,6%,  $Cl_2$  – 1,75%. Прогнозный выход продуктов пиролиза на 1 кг усредненного состава ТКО представлен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Прогнозный выход продуктов пиролиза на 1 кг усредненного состава ТКО

Наименование показателя		Ед. изм.	Величина показателя
Температура процесса		°С	600
Летучие вещества		кг	0,587
Твердый остаток В том числе минеральный остаток		кг	0,413 0,075
Смолистые вещества		кг	0,075
Неконденсирующийся газ		кг	0,269
Водяной конденсат		кг	0,243
Теплотворная способность			
Сухая масса ТКО		кДж/кг	18268,4
Твердый остаток		кДж/кг	31341,2
Смолистое вещество		кДж/кг	26480,8
Неконденсирующийся газ		кДж/кг	12151
Элементный состав, %			
Исходная сухая масса		Смолистое вещество	
С	44,8	С	67,5
Н	6,9	Н	6,25
О	37,4	О	26,25
Н	1,3	Твердый остаток	
С	1,6	С	74,1
Cl	1,5	Н	6,0
зола	6,5	О	1,7
		С	2,4
		зола	15,8
Компонентный состав, %			
Летучие вещества		Неконденсирующийся газ	
CO <sub>2</sub>	26,2	CO <sub>2</sub>	57,5
CO	9,6	CO	20,5
H <sub>2</sub> O	35,8	CH <sub>4</sub>	6,0
пары смол	12,8	H <sub>2</sub> S	2,2
CH <sub>4</sub>	2,7	N	4,8
H <sub>2</sub> S	1,0	Cl	6,0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5,6	Н	3,0
N	2,2		
Cl	2,7		
Н	1,4		

В реальных условиях подлежащие пиролизу ТКО даже после их предварительной подготовки (сепарирования и подсушки) содержат некоторое количество влаги ( $W^p$ ) и золы ( $A^{c'}$ ). Зная значения  $W^p$  и  $A^{c'}$ , пользуясь данными таблицы 3.10, можно рассчитать технологические и энергетические характеристики процесса и отдельных его продуктов.

Зольность рабочей массы усредненного состава ТКО, приведенного в таблице 3.10:

$$A^{rp} = A * (1 - 0,01 * W^p), \% \quad (1)$$

где  $A$  – зольность усредненного состава ТКО, приведенного в таблице 3.10;  $W^p$  – влажность рабочей массы реальных ТКО, % (см. Задачу 1).

Горючая масса реальных ТКО, соответствующая усредненному составу ТКО, приведенному в таблице 3.10:

$$GM = 100 - (W^p + A^p - A^{rp}), \% \quad (2)$$

где  $A^p$  – зольность рабочей массы реальных ТКО, %.

Удельный выход продуктов пиролиза горючей массы реальных ТКО:

– летучих веществ:

$$L^z = 0,01 * L * GM, \text{ кг/кг ТКО}; \quad (3)$$

– твердого остатка:

$$Tв^z = 0,01 * Tв * GM, \text{ кг/кг ТКО}; \quad (4)$$

– смолистого вещества:

$$См^z = 0,01 * См * GM, \text{ кг/кг ТКО}; \quad (5)$$

– неконденсирующегося газа:

$$Нг^z = 0,01 * Нг * GM, \text{ кг/кг ТКО}; \quad (6)$$

– водяного конденсата:

$$Вк^z = 0,01 * Вк * GM, \text{ кг/кг ТКО}, \quad (7)$$

где  $L$ ,  $Tв$ ,  $См$ ,  $Нг$ ,  $Вк$  – удельный выход соответствующих продуктов пиролиза 1 кг сухой массы ТКО, приведенной в таблице 3.10.

Удельное тепловыделение при сгорании одного килограмма реальных ТКО:

$$Q_{\text{ТКО}}^z = 0,01 * Q_{\text{ТКО}} * GM, \text{ кДж/кг}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{ТКО}}$  – удельная теплотворная способность ТКО, приведенная в таблице 3.10.

Для осуществления процесса пиролиза ТКО необходимо подвести тепловую энергию:

- на нагрев подготовленных ТКО до температуры пиролиза, например, для одного килограмма ТКО, состава, приведенного в таблице 3.10, при температуре пиролиза  $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{н}} = 1 * 1,395 * 600 = 837 \text{ кДж/кг};$$

- то же на плавление и парообразование полимеров ТКО, не подверженных термическому распаду:

$$Q_{\text{пл}} = 71,2 \text{ кДж/кг};$$

- то же на термический распад полимеров ТКО:

$$Q_{\text{тр}} = 71,2 \text{ кДж/кг};$$

- то же на компенсацию потерь в окружающую среду (принято 5 % от суммы затрат теплоты):

$$Q_{\text{ос}} = 50,3 \text{ кДж/кг};$$

- суммарная подводимая тепловая энергия:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{ос}} = 1029,7 \text{ кДж/кг}.$$

Принимаем  $Q_{\text{п}} = 1030 \text{ кДж/кг}$ .

Одновременно в процессе пиролиза ТКО выделяется теплота распада содержащихся в них белковой и углеводной составляющих, которые не зависят от температуры пиролиза, так как основное тепловыделение происходит в интервале  $300\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$Q_{\text{бу}} = 733,3 \text{ кДж/кг}.$$

Тогда удельные затраты теплоты на пиролиз рабочей массы усредненного состава ТКО, приведенного в таблице 3.10, при температуре пиролиза  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  равны

$$Q_{\text{з}} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{бу}} = 1030 - 733,3 = 296,7 \text{ кДж/кг}$$

Принимаем  $Q_{\text{з}} = 300 \text{ кДж/кг}$  (при  $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Для ориентировочного расчета удельных затрат теплоты на осуществление пиролиза реальных ТКО при  $t = 600$  °С НИИСК предложена эмпирическая зависимость (9):

$$Q_{з'} = Q_з + 47,05 * W^p + 3,52 * A^c = 300 + 47,05 * W^p + 3,52 * A^c, \text{ кДж/кг.} \quad (9)$$

На основе (9) можно рассчитать требуемую для этих целей тепловую мощность:

$$Q_з = G * \frac{Q_{з'}}{3600}, \text{ кВт.} \quad (10)$$

Можно предположить, что при пиролизе одного килограмма ТКО теплосодержание образующихся летучих веществ ( $H_{лв}$ ) равно разнице между подведенной к процессу тепловой энергией ( $Q_{п}$ ) и суммы теплосодержания твердого остатка ( $h_{тв}$ ) и потерь теплоты в окружающую среду ( $Q_{ос}$ ). При температуре твердого остатка, равной температуре пиролиза  $t = 600$  °С, теплосодержание твердого остатка составит

$$h_{тв} = 310 \text{ кДж/кг ТКО,}$$

$$H_{лв} = Q_{п} - h_{тв} - Q_{ос} = 1030 - 310 - 50,3 = 669,7 \text{ кДж/кг.}$$

Принимаем  $H_{лв} = 670$  кДж/кг.

Если летучие вещества (пиролизный газ) непосредственно сжигаются в топочных устройствах теплоиспользующего оборудования, то дополнительно учитывается их теплота сгорания.

При расчете прогнозируемых расходов под расходами подразумевается выход продуктов:

– летучих веществ:

$$G_{л'} = G * L', \text{ кг/ч,} \quad (11)$$

где  $G$  – расход ТКО, кг/ч;

– твердого остатка

$$G_{тв'} = G * Tв', \text{ кг/ч;} \quad (12)$$

– смолистых веществ

$$G_{смл'} = G * Смл', \text{ кг/ч;} \quad (13)$$

– неконденсирующихся газов

$$G_{нг'} = G * Нг', \text{ кг/ч;} \quad (14)$$

– водяного конденсата

$$G_{вк'} = G * Вк', \text{ кг/ч.} \quad (15)$$

Прогнозируемые располагаемые тепловые мощности:

– реальных ТКО:

$$Q'_{\text{ТКО}} = G * \frac{Q_{\text{ТКО}}}{3600}, \text{ кВт}; \quad (16)$$

– твердого остатка:

$$Q'_{\text{ТВ}} = G_{\text{ТВ}} * \frac{Q_{\text{ТВ}}}{3600}, \text{ кВт}; \quad (17)$$

– неконденсирующихся газов:

$$Q'_{\text{НГ}} = G_{\text{НГ}} * \frac{Q_{\text{НГ}}}{3600}, \text{ кВт}; \quad (18)$$

– смолистых веществ:

$$Q'_{\text{СМЛ}} = G_{\text{СМЛ}} * \frac{Q_{\text{СМЛ}}}{3600}, \text{ кВт}; \quad (19)$$

где  $Q_{\text{ТВ}}$ ,  $Q_{\text{НГ}}$ ,  $Q_{\text{СМЛ}}$  – теплотворные способности твердого остатка, неконденсирующегося газа и смолистого вещества соответственно (таблица 3.10), кДж/кг.

### 3.8.3. Пример расчета

Пусть заданы:

- расход ТКО,  $G = 1000$  кг/ч;
- зольность «рабочей» массы ТКО,  $A^P = 12,397$  %;
- влагосодержание «рабочей» массы ТКО,  $W^P = 31,493$  %.

Зольность рабочей массы усредненного состава ТКО состава, приведенного в таблице 3.10:

$$A_{\text{тр}} = A * (1 - 0,01 * W^P) = 6,5 * (1 - 0,01 * 31,493) = 4,453, \text{ \%},$$

где  $A$  – зольность сухой массы ТКО, приведенной в таблице 3.10.

Условная горючая масса реальных ТКО, соответствующая рабочей массе усредненного состава ТКО, приведенного в таблице 3.10:

$$GM = 100 - (W^P + A^P - A_{\text{тр}}) = 100 - (31,493 + 12,397 - 4,453) = 60,563 \text{ \%},$$

где  $A^P$  – зольность рабочей массы реальных ТКО, %.

Удельный выход продуктов пиролиза условной горючей массы реальных ТКО:

– для летучих веществ

$$L' = 0,01 * L * GM = 0,01 * 0,587 * 60,563 = 0,3555, \text{ кг/кг ТКО};$$

– для твердого остатка

$$T_{В'} = 0,01 * T_{В} * ГМ = 0,01 * 0,413 * 60,563 = 0,25, \text{ кг/кг ТКО};$$

– для смолистого вещества

$$C_{М'} = 0,01 * C_{М} * ГМ = 0,01 * 0,075 * 60,563 = 0,0454, \text{ кг/кг ТКО};$$

– для неконденсирующегося газа

$$H_{Г'} = 0,01 * H_{Г} * ГМ = 0,01 * 0,269 * 60,563 = 0,163, \text{ кг/кг ТКО};$$

– для водяного конденсата

$$B_{К'} = 0,01 * B_{К} * ГМ = 0,01 * 0,243 * 60,563 = 0,147, \text{ кг/кг ТКО},$$

где  $L$ ,  $T_{В}$ ,  $C_{М}$ ,  $H_{Г}$ ,  $B_{К}$  – удельный выход соответствующих продуктов пиролиза 1 кг сухой массы ТКО, приведенной в таблице 3.10.

Удельное тепловыделение при сгорании одного килограмма реальных ТКО:

$$Q'_{\text{ТКО}} = 0,01 * Q_{\text{ТКО}} * ГМ = 0,01 * 18268,4 * 60,563 = 11063,891, \text{ кДж/кг},$$

где  $Q_{\text{ТКО}}$  – удельная теплотворная способность ТКО, приведенная в таблице 3.10.

Зольность сухой массы реальных ТКО:

$$A^c = \frac{A^p}{1 - \frac{W^p}{100}} = 12,397 / (1 - 0,01 * 31,493) = 18,096 \text{ \%}.$$

Ориентировочные удельные затраты теплоты и тепловой мощности на осуществление пиролиза реальных ТКО при температуре 600 °С:

$$Q_3 = 300 + 47,05 * W^p + 3,52 * A^c = 300 + 47,05 * 31,493 + 3,52 * 18,096 = 1845,443 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_3' = G * \frac{Q_3}{3600} = 1000 * 1845,443 / 3600 = 512,623 \text{ кВт}.$$

Прогнозируемые расходы:

– летучих веществ

$$G_{Л'} = G * L' = 1000 * 0,3555 = 355,5, \text{ кг/ч},$$

где  $G$  – расход ТКО, кг/ч;

– твердого остатка

$$G_{ТВ'} = G * T_{В'} = 1000 * 0,25 = 250 \text{ кг/ч};$$

– смолистых веществ

$$G_{СМЛ'} = G * C_{МЛ'} = 1000 * 0,0454 = 45,4 \text{ кг/ч};$$

– неконденсирующихся газов

$$G_{\text{НГ}}' = G * \text{НГ}' = 1000 * 0,163 = 163 \text{ кг/ч};$$

– водяного конденсата

$$G_{\text{ВК}}' = G * \text{ВК}' = 1000 * 0,147 = 147 \text{ кг/ч};$$

– водяного конденсата испарившейся влаги ТКО

$$G_{\text{ВЛ}}' = 0,01 * G * W_p = 0,01 * 1000 * 31,493 = 314,93 \text{ кг/ч};$$

– оставшейся золы (исключая твердый остаток)

$$G_{\text{Оз}}' = 0,01 * G * (A_p - A_{\text{ТР}}) = 0,01 * 1000 * (12,397 - 4,453) = 79,44 \text{ кг/ч}.$$

Прогнозируемые располагаемые тепловые мощности:

– реальных ТКО

$$Q_{\text{ТКО}}' = G * Q_{\text{ТКО}} / 3600 = 1000 * 11063,891 / 3600 = 3073,303 \text{ кВт};$$

– твердого остатка

$$Q_{\text{ТВ}}' = G_{\text{ТВ}} * Q_{\text{ТВ}} / 3600 = 250 * 31341,2 / 3600 = 2176,472 \text{ кВт};$$

– смолистых веществ

$$Q_{\text{СМ}}' = G_{\text{СМ}} * Q_{\text{СМ}} / 3600 = 45,4 * 12151 / 3600 = 339,952 \text{ кВт};$$

– неконденсирующихся газов

$$Q_{\text{НГ}}' = G_{\text{НГ}} * Q_{\text{НГ}} / 3600 = 163 * 12151 / 3600 = 550,17 \text{ кВт},$$

где  $Q_{\text{ТКО}}$ ,  $Q_{\text{ТВ}}$ ,  $Q_{\text{СМ}}$ ,  $Q_{\text{НГ}}$  – удельная теплотворная способность, соответственно ТКО, твердого остатка, смолистых веществ и неконденсирующегося газа, кДж/кг (см. таблицу 3.10).

Следует иметь в виду, что часть располагаемой тепловой мощности расходуется на осуществление процесса пиролиза ТКО.

### **3.9. Утилизация теплоты дымовых газов с получением водяного пара для целей теплоснабжения (Задача 5)**

#### **3.9.1. Исходные данные**

На основе решения Задачи 1 по заданному расходу ( $G$ ) и составу ТКО, а также данных о составе и температуре дымовых газов, полученных при инсинерации ТКО (Задача 2), можно определить расход полезно используемой теплоты

в утилизационном котельном агрегате для целей теплоснабжения и за счет этого рассчитать экономию топлива в замещаемых котельных установках. При этом камера сжигания подключается к топочному устройству котельного агрегата, где происходит их дожигание и полезная утилизация теплоты для получения водяного пара или горячей воды. Это позволяет использовать для отвода отработавших дымовых газов от сжигания ТКО систему газоочистки и дымовую трубу котельного агрегата.

Известны расход ТКО, их теплотехнические характеристики (см. Задачу 1), количество и температура дымовых газов, уходящих из инсинератора газов (Задача 2). Дополнительные исходные данные, необходимые для решения задачи (таблица 3.11): давление пара в котле-утилизаторе  $p_{п}$ ; температуры перегретого пара  $t_{пс}$ , питательной воды  $t_{пв}$  и уходящих из котла-утилизатора дымовых газов  $t_{yx}$ ; величина продувки  $\beta_{пр}$  и присосы холодного воздуха по газовому тракту системы рекуперации теплоты  $\Delta\alpha$ .

Таблица 3.11 – Исходные данные для решения Задачи 5

Посл. цифра	$t_{yx}, ^\circ\text{C}$	$t_{пв}, ^\circ\text{C}$	$t_{пс}, ^\circ\text{C}$	$p_{п}, \text{МПа}$	Предпол. цифра	$\Delta\alpha$	$\beta_{пр}, \%$
0	135	100	240	1,5	0	0,27	3
1	130	104	300	2,5	1	0,25	3,5
2	155	50	320	3	2	0,32	4,5
3	120	102	370	2,5	3	0,26	2,5
4	140	102	240	2,5	4	0,22	2
5	135	100	250	1,5	5	0,22	2
6	120	102	370	2,5	6	0,26	2,5
7	145	100	250	1,5	7	0,24	3
8	130	102	270	1,5	8	0,25	4
9	125	50	Нас.	0,9	9	0,3	5

Определить:

- способ сжигания топлива, тип топки, значение коэффициента избытка (расхода) воздуха в топке  $\alpha$  (см. Задачи 1, 2) и на выходе из системы утилизации теплоты  $\alpha_{yx}$  с учетом присоса холодного воздуха по газовому тракту  $\Delta\alpha$ ;
- потери теплоты с уходящими газами  $q_2$ ;
- коэффициент полезного действия утилизационного котельного агрегата брутто  $\eta_{кабр}$ ;
- расход пара, отпускаемого утилизационным котельным агрегатом;
- экономию топлива в замещаемых котельных установках.

### 3.9.2. Основные теоретические сведения

Для расчета энтальпии дымовых газов состав и удельную низшую теплоту сгорания, а также теплотехнические характеристики отходов (ТКО) и генераторного газа можно принять из решения Задач 1, 2, 3.

Теоретический объем дымовых газов,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :

$$V_{\Gamma}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0.$$

Действительный объем дымовых газов,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)V^0.$$

Энтальпия теоретического объема воздуха,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ :

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 * C_{\text{вз}} * t.$$

Энтальпия теоретического объема дымовых газов,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ :

$$H_{\Gamma}^0 = (V_{\text{RO}_2} * C_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 * C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 * C_{\text{H}_2\text{O}}) * t.$$

Энтальпия действительного объема дымовых газов при  $\alpha > 1$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ :

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)H_{\text{в}}^0,$$

где  $C_{\text{вз}}$ ,  $C_{\text{CO}_2}$ ,  $C_{\text{N}_2}$ ,  $C_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  – средние удельные, объемные при постоянном давлении теплоемкости воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров (см. таблицу 3.4 Задачи 2).

Величина потерь теплоты с уходящими газами  $q_2$ , %, определяется по следующей формуле:

$$q_2 = \frac{(H_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} * H_{\text{XB}}^0) * (100 - q_4)}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}},$$

где  $H_{\text{yx}}$  – энтальпия уходящих газов при  $\alpha_{\text{yx}}$  и  $t_{\text{yx}}$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $H_{\text{XB}}^0$  – энтальпия теоретического количества воздуха, поступившего в котельный агрегат при температуре  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  – удельная низшая теплота сгорания рабочей массы (ТКО) топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $q_4$  – потери теплоты от механического недожога, % (принять 5%);

$$H_{\text{yx}} = H_{\text{yx}}^0 + (\alpha_{\text{yx}} - 1) * H_{\text{вyx}}^0, \text{ кДж}/\text{кг},$$

где  $\alpha_{yx} = \alpha + \Delta\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;  $\Delta\alpha$  – присосы воздуха по газовому трапу.

При наличии дополнительного дизельного топлива

$$q_2 = \frac{(H_{ухТКО} + b \cdot H_{ухДТЛ} - \alpha_{ухТКО} \cdot H_{хвТКО}^0 - \alpha_{ухДТЛ} \cdot b \cdot H_{хвДТЛ}^0) \cdot (100 - q_4)}{Q_{ТКО} + b \cdot Q_{ДТЛ}}, \%$$

где  $H_{ухТКО}$ ,  $H_{ухДТЛ}$  – энтальпии уходящих дымовых газов при принятых и заданных значениях коэффициента избытка воздуха и температуре уходящих дымовых газов после сжигания ТКО и ДТЛ соответственно, кДж/кг;  $\alpha_{ухТКО} = \alpha + \Delta\alpha$ ,  $\alpha_{ухДТЛ} = \alpha_{ДТЛ} + \Delta\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в уходящих дымовых газах для ТКО и ДТЛ соответственно;  $H_{хвТКО}^0$ ,  $H_{хвДТЛ}^0$  – энтальпии теоретического количества холодного воздуха для ТКО и ДТЛ соответственно, кДж/кг;  $Q_{ТКО}$ ,  $Q_{ДТЛ}$  – удельная низшая теплота сгорания ТКО и ДТЛ соответственно, кДж/кг.

В случае подачи охлаждающей воды

$$q_2 = \frac{(H_{ТКОух} + \frac{g \cdot C_{H_2O} \cdot t_{yx}}{\rho_{ВП}} - \alpha_{ТКОух} \cdot H_{ТКОхво}) \cdot (100 - q_4)}{Q_{ТКО}}, \%$$

Величину потерь теплоты от химического недожога  $q_3$  можно принять равной 0,5–1%, от наружного охлаждения  $q_5$  – (1,5 – 4)%, с физической теплотой шлаков  $q_6$  – равной 0%.

Коэффициент полезного действия системы рекуперации теплоты (котельного агрегата) брутто %:

$$\eta_{ка}^{бр} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6).$$

Расход пара, который можно получить за счет рекуперации теплоты процесса термохимической переработки ТКО в котельном агрегате, кг/ч:

$$D = \frac{G_{ТКО} \cdot (Q_{ТКО} + b \cdot Q_{ДТЛ}) \cdot \eta_{ка}^{бр} \cdot 0,01}{h_{п} - h_{пв} + 0,01 \beta_{пр} \cdot (h_{кв} - h_{пв})},$$

где  $h_n$ ,  $h_{пв}$ ,  $h_{кв}$ , кДж/кг – удельные энтальпии пара, питательной и котловой (кипящей) воды, соответственно (таблица 3.12, 3.13), кДж/кг;  $\beta_{пр}$ , % – величина продувки; или без дополнительного топлива

$$D = \frac{G_{ТКО} \cdot Q_{ТКО} \cdot \eta_{ка}^{бр} \cdot 0,01}{h_{п} - h_{пв} + 0,01 \beta_{пр} \cdot (h_{кв} - h_{пв})}.$$

Энергетическая эффективность рекуперации теплоты процесса за счет дополнительного получения водяного пара определяется экономией топлива в замещаемых котельных установках.

Таблица 3.12 – Термодинамические характеристики перегретого водяного пара

Давление $P_1$ , МПа	Температура $t_1$ , °С	Энтальпия $h_1$ , кДж/кг	Энтропия $S_1$ , кДж/(кг*К)
1,5	240	2900,0	6,6649
1,5	250	2924,0	6,711
1,5	270	2970,6	6,798
2,5	240	2852,3	6,3555
2,5	300	3009,6	6,646
2,5	370	3172,5	6,9142
3	320	3044,2	6,6267
0,7	200	2845,3	6,8884
0,7	210	2867,6	6,935

Таблица 3.13 – Термодинамические характеристики воды и водяного пара в состоянии насыщения

Давление $P_2$ , МПа	Температура $t_2$ , °С	Энтальпия воды $h'$ , кДж/кг	Теплота парообразования $r$ , кДж/кг	Энтропия воды $S_{2s}'$ , кДж/(кг*К)	Энтропия пара $S_{2s}''$ , кДж/(кг*К)
3	233,86	1008,4	1794,9	2,6456	6,1858
2,5	223,96	962,0	1840,1	2,5544	6,256
1,5	198,3	844,7	1946,3	2,3147	6,4431
0,9	175,36	742,7	2030,3	2,0944	6,6212
0,7	164,95	694,6	2067,5	1,9863	6,7119
0,6	158,83	670,5	2085,6	1,9311	6,7592
0,5	151,84	640,2	2107,9	1,8606	6,8206
0,3	133,5	561,5	2163,4	1,6718	6,9916
0,0049	32,88	137,77	2423,0	0,4763	8,3939

Экономия «условного» топлива в замещающей котельной установке, кг/ч:

$$\Delta B_{\text{ку}} = \frac{D*[h_{\text{п}} - h_{\text{пв}} + 0,01\beta_{\text{пр}}*(h_{\text{кв}} - h_{\text{пв}})]}{Q_{\text{ут}}*\eta_{\text{ку}}} - B,$$

где  $Q_{\text{ум}} = 29350$  кДж/кг – удельная теплота сгорания «условного» топлива;  
 $\eta_{\text{ку}} = 0,9$  – КПД замещающей котельной установки;  $B$  – расход дополнительного топлива (см. Задачу 2), пересчитанный на «условное» топливо, кг/ч.

При годовом числе использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_2 = \Delta B_{\text{КУ}} * \tau * 3,6, \text{ т/год.}$$

Аналогично рассчитывается расход водяного пара, который можно получить в котельном агрегате при сжигании в топке котла сухого генераторного газа (СГ), полученного при газификации ТКО (см. Задачу 2).

Потеря теплоты с уходящими дымовыми газами:

$$q_2 = \frac{(H_{\text{СГУХ}} - \alpha_{\text{СГУХ}} * H_{\text{СГХВО}}) * 100}{Q_{\text{СГ}}}, \%,$$

где  $H_{\text{СГУХ}}$  – энтальпия уходящих дымовых газов при сжигании СГ, кДж/м<sup>3</sup>;  
 $\alpha_{\text{СГУХ}} = \alpha_{\text{СГ}} + \Delta\alpha$  – коэффициент избытка воздуха уходящих дымовых газов при сжигании СГ ( $\alpha_{\text{СГ}} = 1,1$ );  $H_{\text{СГХВО}}$  – энтальпия теоретического количества холодного воздуха при сжигании СГ, кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{СГ}}$  – удельная низшая теплота сгорания СГ, кДж/м<sup>3</sup>.

КПД котельного агрегата брутто:

$$\eta_{\text{КА}}^{\text{бр}} = 100 - q_2 - q_3 - q_5, \%$$

Расход водяного пара, получаемого в котельном агрегате:

$$D = \frac{G_{\text{ТКО}} * Q_{\text{ТКО}} * V_{\text{Г}} * \eta_{\text{КА}}^{\text{бр}} * 0,01}{h_{\text{П}} - h_{\text{ПВ}} + 0,01\beta_{\text{ПР}} * (h_{\text{КВ}} - h_{\text{ПВ}})}, \text{ кг/ч.}$$

### 3.9.3. Пример расчета

Пусть заданы:

- расход ТКО:  $G = 1000$  кг/ч;
- теоретические объемы воздуха и дымовых газов при сжигании ТКО:

$$V^0 = 2,875 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (0 } ^\circ\text{C; 0,1 МПа);}$$

$$V_{\text{RO}_2} = 0,542 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 2,28 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{г}}^0 = 3,683 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

- удельная низшая рабочая теплота сгорания ТКО:  $Q_{\text{Н}}^{\text{р}} = 10632,121$  кДж/кг;
- коэффициент избытка воздуха при сжигании ТКО:  $\alpha = 2,0$ ;
- теоретический объем воздуха и дымовых газов при сжигании ДТЛ:

$$V_{\text{ДТЛ}}^0 = 10,62 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{RO}_2\text{ДТЛ}} = 1,58 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2\text{ДТЛ}}^0 = 8,39 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{H_2O_{ДТЛ}}^0 = 1,51 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{g_{ДТЛ}}^0 = 11,48 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

- удельная низшая рабочая теплота сгорания ДТЛ:  $Q_{ндтл}^p = 42600 \text{ кДж/кг}$ ;
- удельный расход ДТЛ:  $b = 0,1078 \text{ кг/кг}$ ;
- коэффициент избытка воздуха при сжигании ДТЛ:  $\alpha_{дтл} = 1,1$ ;
- давление водяного пара:  $P_{п} = 2,5 \text{ МПа}$ ;
- температура перегретого водяного пара:  $t_{пе} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура питательной воды:  $t_{пв} = 102 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура уходящих газов:  $t_{ух} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- присосы холодного воздуха:  $\Delta\alpha = 0,25$ ;
- величина продувки:  $\beta = 4\%$ .

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах после сжигания ТКО:

$$\alpha_{ухтко} = \alpha + \Delta\alpha = 2,0 + 0,25 = 2,25.$$

Энтальпия теоретического количества воздуха для сжигания ТКО при температуре уходящих газов:

$$H_{втко}^0 = V^0 * C_{вз} * t_{ух};$$

$$H_{втко}^0 = 2,875 * 1,327 * 130 = 496,172 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия теоретического количества дымовых газов после сжигания ТКО при температуре уходящих газов:

$$H_{ухтко}^0 = (V_{RO_2} * C_{CO_2} + V_{N_2}^0 * C_{N_2} + V_{H_2O}^0 * C_{H_2O}) * t_{ух}, \text{ кДж/кг};$$

$$H_{ухтко}^0 = (2,28 * 1,298 + 0,542 * 1,324 + 0,861 * 1,511) * 130 = 647,142 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия уходящих газов после сжигания ТКО:

$$H_{ухтко} = H_{ухтко}^0 + (\alpha_{ух} - 1) * H_{втко}^0, \text{ кДж/кг};$$

$$H_{ухтко} = 64,142 + (2,25 - 1) * 496,172 = 1267,357 \text{ кДж/кг}.$$

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах после сжигания ДТЛ:

$$\alpha_{ухдтл} = \alpha_{дтл} + \Delta\alpha = 1,1 + 0,25 = 1,35.$$

Энтальпия теоретического количества воздуха для сжигания ДТЛ при температуре уходящих газов:

$$H_{дтл}^0 = V^0 * C_{вз} * t_{ух}, \text{ кДж/кг};$$

$$H_{дтл}^0 = 10,62 * 1,327 * 130 = 1832,056 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия теоретического количества дымовых газов после сжигания ДТЛ при температуре уходящих газов:

$$H_{\text{ухдтл}}^0 = (V_{\text{RO}_2\text{дтл}} * C_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2\text{дтл}}^0 * C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{Oдтл}}^0 * C_{\text{H}_2\text{O}}) * t_{\text{ух}}, \text{кДж/кг};$$

$$H_{\text{ухдтл}}^0 = (8,39 * 1,298 + 1,58 * 1,324 + 1,51 * 1,511) * 130 =$$

$$= 1984,287 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия уходящих дымовых газов после сжигания ДТЛ:

$$H_{\text{ухдтл}} = H_{\text{ухдтл}}^0 + (\alpha_{\text{ухдтл}} - 1) * H_{\text{дтл}}^0, \text{кДж/кг};$$

$$H_{\text{ухдтл}} = 1984,287 + (1,35 - 1) * 1832,056 = 2660,507 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия теоретического количества воздуха для сжигания ТКО при температуре холодного воздуха  $t_{\text{хв}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$H_{\text{хвтко}}^0 = V^0 * C_{\text{вз}} * t_{\text{хв}}, \text{кДж/кг};$$

$$H_{\text{хвтко}}^0 = 2,875 * 1,3214 * 30 = 113,97 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия теоретического количества воздуха для сжигания ДТЛ при температуре холодного воздуха:

$$H_{\text{хвдтл}}^0 = 10,62 * 1,3214 * 30 = 420,998 \text{ кДж/кг}.$$

Потеря теплоты с уходящими газами:

$$q_2 = (H_{\text{ухтко}} + b * H_{\text{ухдтл}} - \alpha_{\text{ухтко}} * H_{\text{хвтко}}^0 - \alpha_{\text{ухдтл}} * b * H_{\text{хвдтл}}^0) * (100 - q_4) / (Q_{\text{тко}} + b * Q_{\text{дтл}}), \text{ } \%;$$

$$q_2 = (1267,357 + 0,1078 * 2660,507 - 2,25 * 113,97 - 1,35 * 0,1078 * 420,998) * (100 - 5) / (10632,121 + 0,1078 * 42600) = 7,715 \text{ } \%.$$

КПД (коэффициент использования теплоты) брутто системы термохимической утилизации ТКО с рекуперацией теплоты:

$$\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \text{ } \%;$$

$$\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 100 - (7,715 + 1 + 5 + 2) = 84,285 \text{ } \%.$$

Удельная энтальпия водяного пара  $h_{\text{п}}$ , полученного в котле-утилизаторе системы рекуперации:

$$h_{\text{п}} = f(P_{\text{п}}, t_{\text{пе}}), \text{кДж/кг};$$

при  $P_{\text{п}} = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{пе}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $h_{\text{п}} = 3009,6 \text{ кДж/кг}$  (см. таблицу 3.12).

Удельная энтальпия питательной воды  $h_{\text{пв}}$ :

$$h_{\text{пв}} = C_{\text{в}} * t_{\text{пв}} = 4,19 * 102 = 427,38 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная энтальпия котловой (кипящей) воды  $h_{\text{кв}}$ :

$$h_{\text{кв}} = f(P_{\text{п}});$$

при  $P_{\text{п}} = 2,5 \text{ МПа}$  и  $h_{\text{кв}} = 962 \text{ кДж/кг}$  (см. таблицу 3.13).

Расход водяного пара, который можно получить за счет рекуперации теплоты термохимической утилизации ТКО:

$$D = G_{\text{ТКО}} * (Q_{\text{p}}^{\text{H}} + b * Q_{\text{длр}}^{\text{H}}) * \eta_{\text{бр ка}} * 0,01 / [h_{\text{п}} - h_{\text{пв}} + 0,01 \beta_{\text{пр}} * (h_{\text{кв}} - h_{\text{пв}})], \text{ кг/ч};$$

$$D = 1000 * (10632,121 + 0,1078 * 42600) * 84,285 * 0,01 /$$

$$/ [3009,6 - 427,38 + 0,01 * 4 * (962 - 427,38)] = 4928,508 \text{ кг/ч.}$$

Энергетическая эффективность рекуперации теплоты процесса термохимической утилизации ТКО за счет дополнительного получения водяного пара определяется экономией «условного» топлива в замещаемых котельных установках.

Экономия «условного» топлива в замещаемой котельной установке:

$$\Delta B_{\text{ку}} = D * [h_{\text{п}} - h_{\text{пв}} + 0,01 \beta_{\text{пр}} * (h_{\text{кв}} - h_{\text{пв}})] / Q_{\text{ут}} * \eta_{\text{ку}} - B_{\text{ут}}, \text{ кг/ч},$$

где  $Q_{\text{ут}} = 29350 \text{ кДж/кг}$  – удельная теплота сгорания «условного» топлива;  $\eta_{\text{ку}} = 0,9$  – КПД замещаемой котельной установки;  $B_{\text{ут}}$  – расход ДТл, пересчитанный на «условное» топливо,

$$B_{\text{ут}} = b * G_{\text{ТКО}} * Q_{\text{Hдлр}} * Q_{\text{ут}} = 0,1078 * 1000 * 42600 * 29350 = 182,176 \text{ кг ут/ч.}$$

Выполняя подстановку, получаем:

$$\Delta B_{\text{ку}} = 4928,508 * [3009,6 - 427,38 + 0,01 * 4 * (962 - 427,38)] / 29350 *$$

$$* 0,9 - 182,176 = 303,604 \text{ кг/ч.}$$

При годовом количестве часов использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_{\text{г}} = \Delta B_{\text{ку}} * \tau = 303,604 * 7000 = 2125228 \frac{\text{кг}}{\text{г}} = 2125,228 \frac{\text{т}}{\text{г}}.$$

Полученный дополнительно водяной пар может быть полезно использован для тепло- и холодоснабжения (с помощью теплоиспользующих абсорбционных холодильных машин) потребителей, а также в паросиловых установках – для получения механической, электрической (с помощью электрического генератора) энергии, в случае когенерации и тригенерации – для совместного получения механической, электрической, тепловой энергии и холода.

### 3.10. Получение электрической и тепловой энергии в паровой турбине (Задача 6)

#### 3.10.1. Исходные данные

Цель задачи – определить электрическую мощность и экономию топлива в замещаемых теплоэнергетических установках, которую можно получить, используя энергию водяного пара из системы утилизации теплоты (котельного агрегата) термохимической утилизации ТКО в паротурбинных установках. Паро-

вые турбины – конденсационная или противодавленческая – работают без регенерации теплоты.

Заданы (таблица 3.14) расход  $D$  и параметры водяного пара на входе в турбину: давление  $P_1$  и температура  $t_1$  (см. решение Задачи 5), давление водяного пара на выходе из турбины  $P_2$  (в конденсаторе  $P_k$  или у потребителя теплоты  $P_T$ ), КПД паровой турбины: внутренний относительный  $\eta_{oi}$ , механический  $\eta_m$ , электрического генератора  $\eta_{эг}$ .

Таблица 3.14 – Исходные данные для решения Задачи 6

Последняя цифра шифра	$P_{п} = P_2$	$P_k = P_2$	Предпоследняя цифра шифра	$\eta_{эг}$	$\eta_m$	$\eta_{oi}$
0	0,5	-	0	0,96	0,97	0,8
1	0,005	-	1	0,94	0,93	0,72
2	0,5	-	2	0,95	0,98	0,68
3	-	0,005	3	0,98	0,94	0,74
4	-	0,005	4	0,96	0,95	0,72
5	0,7	-	5	0,97	0,96	0,76
6	-	0,005	6	0,93	0,92	0,66
7	0,3	-	7	0,97	0,98	0,7
8	0,5	-	8	0,95	0,96	0,75
9	0,6	-	9	0,97	0,99	0,78

Требуется определить:

- параметры и характеристики водяного пара на входе в турбину и выходе из нее (давление, температуру, энтальпию, энтропию, степень сухости водяного пара);
- удельную изоэнтропийную  $W_s$  и внутреннюю  $W_i$  работу пара в турбине;
- эффективную  $N_e$  и электрическую  $N_э$  мощность турбины;
- расход охлаждающей воды на конденсатор  $M$  и кратность охлаждения  $m$  в конденсаторе (для паротурбинных установок с конденсатором при давлении  $P_k$ );
- расход теплоты  $Q_T$  (тепловая мощность) для потребителя теплоты и относительную выработку электрической энергии на тепловом потреблении  $\mathcal{E}_o$  (для паротурбинных установок, получающих теплоту для потребителя под давлением  $P_T$ );
- экономию «условного» топлива в замещаемых теплоэнергетических установках.

Расчет произвести при помощи таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара или таблиц 3.12, 3.13 (Задача 5).

### **3.10.2. Основные теоретические сведения**

Водяной пар, получаемый в системе рекуперации термохимической утилизации ТКО, используется в паротурбинных установках для получения механической, электрической, а в случае когенерации – и тепловой энергии.

Паровые турбины – это роторные тепловые двигатели, в которых преобразование теплоты пара в механическую работу (энергию) осуществляется в результате двух процессов. Первоначально в соплах турбины в процессе расширения (снижения давления пара) происходит преобразование потенциальной энергии пара в кинетическую энергию потока пара, которая на рабочих лопатках, закрепленных на диске турбины, преобразуется в механическую энергию вращающегося ротора турбины (ротор турбины – это рабочие лопатки, диск, насаженный на вал, и вал турбины).

В процессе преобразования энергии водяного пара в механическую энергию его давление снижается от давления на входе в турбину  $P_1$  до давления на выходе из турбины  $P_2$ . Отработавший водяной пар, отдавая теплоту при давлении  $P_2$ , конденсируется. При этом температура конденсации зависит от давления  $P_2$ . Если температура конденсации водяного пара близка к температуре окружающей среды (около 30–40 °С), то теплота конденсации водяного пара при такой температуре практически не используется. В этом случае с помощью паротурбинной установки можно получать только механическую или электрическую энергию. С повышением давления водяного пара  $P_2$  растет его температура конденсации и возможность полезного использования выделяющейся при этом теплоты (температура конденсации 100 °С и более). В этом случае паротурбинная установка работает как когенерационная паротурбинная установка с одновременным получением механической (электрической) и тепловой энергии.

Для определения параметров пара в турбине можно воспользоваться построением процесса в  $h-S$  -диаграмме или термодинамическими характеристиками воды и водяного пара, приведенными в таблицах 3.12, 3.13 Задачи 5. При  $S_1 > S_2''$ , где  $S_2''$  – энтропия сухого насыщенного пара при давлении  $P_2$ , состояние пара на выходе из турбины попадает в область перегретого пара. При  $S_1 < S_2''$  состояние водяного пара на выходе из турбины попадает в область «влажного» насыщенного пара.

Определить параметры водяного пара в турбине при использовании таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара (таблицы 3.12, 3.13 в Задаче 5) можно следующим образом.

Вначале по таблице 3.12 «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» по давлению пара  $P_1$  и температуре пара  $t_1$  определяют энтальпию пара  $h_1$  и энтропию пара  $S_1$  на входе в турбину. В случае насыщенного водяного пара по таблице 3.13 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения».

Затем определяют параметры пара на выходе из турбины. Для этого вначале по таблице 3.12 «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» при давлении пара на выходе из турбины  $P_2$  ищут состояние пара при значении его энтропии  $S_{2s} = S_1$  (величина энтропии пара на выходе из турбины при изоэнтروпийном процессе расширения). При изоэнтропийном процессе расширения пара от давления  $P_1$  до давления  $P_2$  энтропия пара на выходе из турбины  $S_{2s} = S_1$ . Если такое состояние находят, то сразу определяют величину энтальпии пара  $h_{2s}$ .

Если такое состояние в этой таблице отсутствует, то состояние пара на выходе из турбины при изоэнтропийном процессе расширения попадает в область «влажного» пара. В этом случае переходят к таблице 3.13 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)», из которой при заданном давлении пара на выходе определяют значения энтальпии  $h_2'$ , энтропии  $S_2'$  воды и теплоты парообразования  $r_2$  в состоянии насыщения, а также энтальпии  $h_2''$  и энтропии  $S_2''$  насыщенного водяного пара.

На основе определенных значений рассчитывают:

- степень сухости «влажного» водяного пара на выходе из турбины при изоэнтропийном процессе расширения

$$X = (S_{2s} - S_2') / (S_2'' - S_2'),$$

где  $S_{2s}$  – энтропия пара на выходе из турбины при изотропийном расширении ( $S_{2s} = S_1$ );  $S_2'$  – энтропия кипящей воды при давлении  $P_2$  на выходе из турбины;  $S_2''$  – энтропия насыщенного пара на выходе из турбины при давлении  $P_2$ .

- энтальпию «влажного» пара на выходе из турбины при изоэнтропийном процессе расширения

$$h_{2s} = h_2' + X * r_2, \text{ кДж/кг.}$$

Удельная изоэнтропийная работа пара в турбине:

$$W_s = h_1 - h_{2s}, \text{ кДж/кг.}$$

Удельная внутренняя работа пара в турбине:

$$W_i = W_s * \eta_{oi}, \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия водяного пара на выходе из турбины при действительном внутреннем процессе расширения:

$$h_2 = h_1 - W_i, \text{ кДж/кг.}$$

Эффективная мощность турбины:

$$N_e = D * W_s * \eta_{oi} * \eta_m / 3600, \text{ кВт.}$$

Электрическая мощность, вырабатываемая электрическим генератором:

$$N_3 = D * W_s * \eta_{oi} * \eta_m * \eta_{эг} / 3600, \text{ кВт.}$$

Внутренняя мощность турбины:

$$N_i = D \cdot W_s \cdot \eta_{0i} / 3600, \text{ кВт.}$$

Для конденсационной паротурбинной установки определяют: расход охлаждающей воды на конденсатор, кг/с,

$$M_{об} = \frac{D \cdot (h_2 - c_k \cdot t_k)}{c_{об} \cdot (t''_{об} - t'_{об})}$$

и величину кратности охлаждения  $m = \frac{M_{об}}{D}$ , где  $D$  – расход пара на входе в конденсатор, кг/с;  $h_2 = h_1 - w_s \cdot \eta_{0i}$  – энтальпия пара на входе в конденсатор, кДж/кг;  $t_k$  – температура конденсата, °С, принимается равной температуре насыщенного пара, соответствующей его давлению на входе в конденсатор  $p_k$ ;  $c_k$  – удельная теплоемкость конденсата, кДж/(кг·К);  $c_{об}$  – удельная теплоемкость охлаждающей воды, кДж/(кг·К);  $t'_{об}$  – температура охлаждающей воды при входе в конденсатор, °С;  $t''_{об}$  – температура охлаждающей воды при выходе из конденсатора, °С.

Для противодавленческой паровой турбины определяют расход теплоты (мощность), отпускаемой потребителю, кВт,

$$Q_T = D \cdot (h_2 - h_{кт}),$$

где  $h_2 = h_1 - (w_s \cdot \eta_{0i})$  – энтальпия пара, отпускаемого потребителю, кДж/кг;  $h_{кт}$  – энтальпия конденсата, кДж/кг, принимается при температуре 70 °С, а также относительное комбинированное получение электрической энергии на тепловом потреблении  $\Delta_0 = \frac{N_э}{Q_T}$ .

Энергетическая эффективность утилизации теплоты термохимической переработки ТКО для дополнительного получения теплоты и электрической энергии определяется (годовой) экономией условного топлива  $\Delta B$  по сравнению с замещаемым отдельным способом получения отпускаемых видов энергетической продукции: теплоты  $Q_T$  в котельной установке, электрической энергии  $N_э$  на тепловых конденсационных электростанциях (КЭС), кг/с,

$$\Delta B = B_{КЭС} + B_{КУ} - B_{УТ},$$

где  $B_{КЭС} = N_э / (Q_{УТ} \cdot \eta_{КЭС})$  – расход топлива на замещаемой КЭС, кг/с;  $Q_{УТ}$  – теплота сгорания условного топлива, равняется 29350 кДж/кг;  $\eta_{КЭС}$  – к.п.д. КЭС, принимается для сравнительных расчетов равным 0,37;  $B_{КУ} = Q_T / (Q_{УТ} \cdot \eta_{КУ})$  – расход топлива в замещаемой котельной, кг/с;  $\eta_{КУ}$  – к.п.д. замещаемой котельной, принимается равным 0,9.

При годовом числе часов использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия «условного» топлива составляет

$$\Delta B_T = \Delta B \cdot \tau \cdot 3,6, \text{ т/год.}$$

### 3.10.3. Пример расчета

Расчет выполняется при следующих исходных данных:

- расход водяного пара  $D = 4928,137$  кг/ч;
- расход дополнительного топлива  $B = 182,176$  кг/ч («условное» топливо);
- давление водяного пара на входе в турбину  $P_1 = 2,5$  МПа;
- температура водяного пара на входе в турбину  $t_1 = 300$  °С;
- давление водяного пара на выходе из турбины  $P_2 = P_k = 0,005$  МПа;
- внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,8$ ;
- механический КПД турбины  $\eta_m = 0,95$ ;
- КПД электрического генератора  $\eta_{эг} = 0,97$ .

Определение параметров и характеристик водяного пара на входе в турбину и на выходе из нее производится по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара или таблицам 3.12, 3.13.

Расчет производится для двух вариантов – конденсационной турбины и противодавленческой турбины.

#### Вариант I. Конденсационная турбина

Состояние водяного пара на входе в турбину: давление  $P_1 = 2,5$  МПа, температура  $t_1 = 300$  °С. (водяной пар перегретый). По таблице 3.12 «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» этому состоянию соответствуют энтальпия водяного пара  $h_1 = 3009,6$  кДж/кг и энтропия  $S_1 = 6,646$  кДж / (кг \* К).

Состояние водяного пара на выходе из турбины при теоретическом изоэнтропийном (адиабатном) процессе расширения (снижения давления) до давления:  $P_2 = P_k = 0,005$  МПа =  $5 * 10^3$  кПа. При изоэнтропийном процессе расширения водяного пара в турбине от давления  $P_1$  до давления  $P_2$  его энтропия не меняется, т.е. энтропия водяного пара в конце изоэнтропийного расширения  $S_{2s} = S_1 = 6,646$  кДж/кг. Определение остальных характеристик водяного пара осуществляем в два этапа.

Первоначально по таблице 3.12 «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» при давлении  $P_2 = 0,005$  МПа ищем состояние водяного пара при значении энтропии  $S_{2s} = S_1 = 6,466$  кДж/(кг\*К). Минимальное значение энтропии перегретого водяного пара при давлении  $P_2 = 0,005$  МПа по таблице равно  $S = 8,3939$  кДж/(кг\*К), т.е. больше  $S_{2s} = 6,466$  кДж/(кг\*К), что свидетельствует о том, что состояние пара на выходе из турбины при изоэнтропийном процессе расширения находится в области влажного насыщенного водяного пара.

На следующем этапе по таблице 3.13 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)» при давлении  $P_2 = 0,005$  МПа определяем значения энтальпии воды в состоянии насыщения  $h'_2 = 137,77$  кДж/кг, теплоты парообразования  $r = 2423$  кДж/кг, энтропии воды  $S'_2 = 0,4763$  кДж/(кг\*К) и энтропии насыщенного водяного пара  $S''_2 = 8,3939$  кДж/(кг\*К). Так как  $S''_2 > S_1$ , состояние пара на выходе из турбины при изоэнтропийном расширении находится в области влажного насыщенного водяного пара.

Определяем степень сухости «влажного» насыщенного водяного пара в конце изоэнтропийного процесса расширения:

$$X_s = (S_{2s} - S_2') / (S_2'' - S_2') = (6,466 - 0,4763) / (8,3939 - 0,4763) = 0,7565,$$

где  $S_{2s}$  – энтропия пара на выходе из турбины при изотропном расширении ( $S_{2s} = S_1$ );  $S_2'$  – энтропия кипящей воды при давлении  $P_2$  на выходе из турбины;  $S_2''$  – энтропия насыщенного пара на выходе из турбины при давлении  $P_2$ .

Энтальпия влажного насыщенного водяного пара в конце изоэнтропийного процесса расширения:

$$h_{2s} = h_2' + r_2 * X_s = 137,77 + 2423 * 0,7565 = 1970,77 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная изоэнтропийная работа пара в турбине:

$$W_s = h_1 - h_{2s} = 3009,6 - 1970,77 = 1038,83 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная внутренняя работа пара в турбине:

$$W_i = W_s * \eta_{oi} = 1038,83 * 0,8 = 831,064 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия водяного пара на выходе из турбины:

$$h_2 = h_1 - W_i = 3009,6 - 831,064 = 2178,536 \text{ кДж/кг.}$$

Эффективная мощность турбины:

$$N_e = D * W_s * \eta_{oi} * \eta_M / 3600 = 4928,137 * 1038,83 * 0,8 * 0,95 / 3600 = 1080,158 \text{ кВт}$$

Электрическая мощность, вырабатываемая электрическим генератором:

$$N_g = D * W_s * \eta_{oi} * \eta_M * \eta_{гг} / 3600 = 4928,137 * 1038,83 * 0,8 * 0,95 * 0,97 / 3600 = 1047,754 \text{ кВт}$$

Расход охлаждающей воды на конденсатор:

$$M = D * (h_2 - C_k * t_k) / [C_{ов} * (t'' - t')], \text{ кг/ч,}$$

где  $t_k = 32,88 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура конденсата при давлении  $P_2 = P_k = 0,005 \text{ МПа}$ ;  $C_k = C_{ов} = 4,19 \text{ кДж / (кг*К)}$  – удельные массовые теплоемкости конденсата и охлаждающей воды;  $t' = 12 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор;  $t'' = t_k - 3 = 32,88 - 3 = 29,88 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора.

$$M = 4928,137 * (2178,536 - 4,19 * 32,88) / [4,19 * (29,88 - 12)] = 134244,049 \text{ кг/ч} = 134,244 \text{ т/ч.}$$

Величина кратности охлаждения:

$$m = M / D = 134244,049 / 4928,137 = 27,24.$$

Энергетическая эффективность дополнительного получения электрической энергии за счет рекуперации теплоты термохимической утилизации ТКО определяется экономией «условного» топлива на замещаемой конденсационной электрической станции (КЭС):

$$\Delta B = N_3 * 3600 / (Q_u * \eta_{кэс}) - B_{ут} = 1047,754 * 3600 / (29350 * 0,37) - 182,176 = 165,162 \text{ кг/ч,}$$

где  $\eta_{кэс} = 0,37$  – КПД замещаемой КЭС. При годовом числе часов использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_{г} = \Delta B * \tau = 165,162 * 7000 = 1156134 \text{ кг/год} = 1156,134 \text{ т/год.}$$

### Вариант II. Противодавленческая турбина

В этом варианте расчет работы водяного пара в турбине производится при давлении пара на выходе из турбины  $P_2 = P_T = 1,5$  МПа. Остальные исходные данные остаются прежние.

Состояние водяного пара на входе в турбину: давление пара  $P_1 = 2,5$  МПа, температура пара  $t_1 = 300$  °С, энтальпия  $h_1 = 3009,6$  кДж/кг, энтропия  $S_1 = 6,466$  кДж/(кг \* К).

Определим состояние водяного пара на выходе из турбины при изоэнтропийном расширении от давления  $P_1 = 2,5$  МПа до давления  $P_2 = 1,5$  МПа. В этом случае энтропия водяного пара в конце расширения  $S_{2s} = S_1 = 6,466$  кДж/(кг\*К). Первоначально, как в варианте 1, по таблице 3.12 «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» при давлении  $P_2 = 1,5$  МПа ищем состояние пара при значении энтропии  $S_{2s} = 6,466$  кДж/(кг \* К). Находим, что этому значению энтропии соответствует значение энтальпии водяного пара  $h_{2s} = 2800,65$  кДж/кг.

Удельная изоэнтропийная работа пара в турбине:

$$W_s = h_1 - h_{2s} = 3009,6 - 2800,65 = 208,95 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная внутренняя работа пара в турбине:

$$W_i = W_s * \eta_{oi} = 208,95 * 0,8 = 167,16 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия водяного пара на выходе из турбины при действительном внутреннем процессе:

$$h_2 = h_1 - W_i = 3009,6 - 167,16 = 2842,44 \text{ кДж/кг.}$$

Эффективная мощность турбины:

$$N_e = D * W_s * \eta_{oi} * \eta_m / 3600 = 4928,137 * 0,8 * 0,95 / 3600 = 217,388 \text{ кВт.}$$

Электрическая мощность, вырабатываемая электрическим генератором:

$$N_3 = D * W_s * \eta_{oi} * \eta_m * \eta_{эГ} / 3600 = 4928,137 * 0,8 * 0,95 * 0,97 / 3600 = 210,866 \text{ кВт.}$$

Расход тепловой энергии, получаемой для потребителя:

$$Q_T = D * (h_2 - h_k) = 4928,137 * (2842,44 - 4,19 * 70) = 12562511,15 \text{ кДж/ч} = \\ = 3489,586 \text{ кВт},$$

где  $h_k = C_k * t_k$  – энтальпия конденсата при температуре  $t_k = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Относительное комбинированное получение электрической энергии на тепловом потреблении:

$$\Xi_o = N_e / Q_T = 210,866 / 3489,586 = 0,0604.$$

Энергетическая эффективность рекуперации теплоты термохимической утилизации ТКО в случае дополнительного получения электрической и тепловой энергии определяется экономией «условного» топлива в замещаемых КЭС для получения электрической энергии и котельной установки для получения тепловой энергии за вычетом расхода дополнительного топлива (пересчитанного на «условное» топливо). Экономия «условного» топлива на замещаемых КЭС и котельной установке:

$$\Delta B = N_e * 3600 / (Q_u * \eta_{кэс}) + Q_T * 3600 / (Q_u * \eta_k) - B_{ут}, \text{ кг/ч} \\ \Delta B = 210,866 * 3600 / (29350 * 0,37) + 3489,586 * 3600 / (29350 * 0,9) - 182,176 = \\ = 363,31 \text{ кг/ч}.$$

При годовом числе часов установленной мощности  $\tau = 7000 \text{ ч}$ . годовая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_\tau = \Delta B * \tau = 363,31 * 7000 = 2543170 \text{ кг/год} = 2543,17 \text{ т/год}.$$

### **3.11. Утилизация генераторного газа в двигателе внутреннего сгорания (Задача 7)**

#### **3.11.1. Исходные данные**

Цель задачи – определение теплотехнических характеристик и энергетической эффективности поршневого двигателя внутреннего сгорания и разработка мероприятий по их повышению.

Необходимо определить составляющие уравнения теплового баланса двигателя:

- теплоту, преобразованную в полезную работу;
- потери теплоты с охлаждающей жидкостью (водой);
- потери теплоты с отработанными газами;
- остаточные потери;
- теплопроизводительность теплового насоса;
- возможную суммарную теплопроизводительность;
- коэффициент использования теплоты комплекса тепловой двигатель – тепловой насос.

Исходные данные для решения задачи: при испытании поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) измеренная эффективная мощность двигателя составила  $N_e$  (кВт); за время  $\tau$  (с) двигатель израсходовал  $G$  (кг) топлива с низкой теплотой сгорания  $Q_H^p = 42,5$  мДж/кг, расход охлаждающей воды через двигатель –  $G_v$  (кг/с), повышение ее температуры в двигателе –  $\Delta t_v$  (°C), объем газов, получаемый при сгорании 1 кг топлива  $V_r = 16,5$  м<sup>3</sup>/кг (0 °C, 0,1МПа), объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива  $V_{вз} = 15,6$  м<sup>3</sup>/кг, температура уходящих газов  $t_r$  (°C) и средняя объемная теплоемкость газов  $c_{pg} = 1,45$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C), средняя объемная теплоемкость воздуха  $C_{pv} = 1,297$ , температура воздуха кДж/(м<sup>3</sup>·°C),  $t_{вз} = 20$  °C.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 3.15.

Таблица 3.15– Исходные данные для решения задачи 7

$\mu$	$t_r$ , °C	$\Delta t_v$ , °C	$G_v$ , кг/с	Предпоследняя цифра шифра	$G$ , кг/с	$\tau$ , мин	$N_e$ , кВт	Последняя цифра шифра
2	500	10	1,3	0	10	40	50	0
3	450	12	1,1	1	10	44	45	1
3,2	550	13	1	2	10	48	42	2
2,75	460	15	0,9	3	5	18	52	3
3,4	480	14	0,9	4	5	8	55	4
3,6	490	11	1	5	10	30	60	5
3,3	520	10	1,4	6	5	17	58	6
3,1	540	12	1,2	7	5	19	48	7
4,6	560	13	1,1	8	5	21	45	8
4,3	600	14	1	9	10	36	56	9

### 3.11.2. Основные теоретические сведения

Использование пиролизного жидкого топлива или генераторного газа после термохимической утилизации ТКО возможно в двигателях внутреннего сгорания для получения механической, электрической и тепловой энергии [8].

Четырехтактный поршневой двигатель внутреннего сгорания может являться приводом компрессора холодильной машины, работающей в режиме теплового насоса с коэффициентом трансформации  $\mu$ . Рассмотрим расчет основных показателей для этого случая.

Расход топлива двигателем, кг/с:

$$B = G/\tau.$$

Теплота, преобразованная в эффективную работу, кВт:

$$Q_e = N_e,$$

$$q_e = \left[ \frac{Q_e}{(B \cdot Q_H^p)} \right] \cdot 100, \%$$

Потери теплоты с охлаждающей водой, кВт:

$$Q_{\text{охл}} = G_B \cdot c_B \cdot \Delta t_B,$$

$$q_{\text{охл}} = \left[ \frac{Q_{\text{охл}}}{(B \cdot Q_H^p)} \right] \cdot 100, \%$$

Потери теплоты с отработавшими газами, кВт:

$$Q_{\text{уг}} = B \cdot (V_{\text{г}} \cdot c_{\text{рг}} \cdot t_{\text{г}} - V_{\text{вз}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot t_{\text{в}}),$$

$$q_{\text{уг}} = \left[ Q_{\text{уг}} / (B \cdot Q_H^p) \right] \cdot 100, \%$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания и остаточные потери тепла, кВт:

$$Q_{\text{хн}} + Q_{\text{ост}} = B \cdot Q_H^p - (Q_e + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{уг}}),$$

$$q_{\text{хн}} + q_{\text{ост}} = \left[ (Q_{\text{хн}} + Q_{\text{ост}}) / (B \cdot Q_H^p) \right] \cdot 100, \%$$

Теплопроизводительность теплового насоса, кВт:

$$Q_{\text{тн}} = N_e \cdot \mu.$$

Теплопроизводительность рекуператора теплоты  $Q_{\text{рг}}$ , кВт, отработавших газов при температуре газов на выходе из рекуператора:

$$Q_{\text{рг}} = B \cdot (V_{\text{г}} \cdot c'_{\text{рг}} \cdot t'_{\text{г}} - V_{\text{г}} \cdot c_{\text{рг}} \cdot t_{\text{г}}),$$

где  $t_{\text{г}} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $c_{\text{рг}} = 1,35 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Возможная теплопроизводительность установки с учетом рекуперации теплоты, кВт:

$$Q_{\text{те}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{рг}} + Q_{\text{тн}}.$$

Коэффициент использования теплоты топлива:

$$\eta_{\text{и}} = Q_{\text{те}} / (B \cdot Q_H^p).$$

Экономия «условного» топлива в замещаемых котельных установках за счет рекуперации теплоты охлаждающей жидкости и уходящих дымовых газов, кг/с:

$$\Delta B = (Q_{\text{охл}} + Q_{\text{рг}}) / (Q_{\text{уг}} \cdot \eta_{\text{ку}}).$$

При годовом числе использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия условного топлива составит

$$\Delta B_{\text{г}} = \Delta B \cdot \tau \cdot 3,6, \text{ т/год}.$$

Фактическая экономия «условного» топлива в замещаемых котельных установках при использовании в качестве привода теплового насоса поршневого ДВС с рекуперацией теплоты, кг/с:

$$\Delta B = Q_{\text{те}} / (Q_{\text{ут}} * \eta_{\text{ку}}) - B_{\text{ут}} * Q_{\text{пр}} / Q_{\text{ут}}$$

Годовая фактическая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_{\text{Г}} = \Delta B * \tau * 3,6, \text{ т/год.}$$

### 3.11.3. Пример решения

Для расчета выбран четырехтактный поршневой ДВС, который является приводом компрессора паровой холодильной машины, работающей в режиме теплового насоса. Расчет производится при следующих исходных данных:

- количество жидкого топлива  $G = 12$  кг;
- время расходования топлива  $\tau = 40$  мин.;
- эффективная мощность ДВС  $N_e = 55$  кВт;
- коэффициент трансформации (тепловой коэффициент) теплового насоса  $\mu = 3,5$ ;
- температура отработавших газов на выходе из ДВС  $t_r = 530$  °С.;
- повышение температуры охлаждающей воды  $\Delta t_b = 12$  °С;
- расход охлаждающей воды  $G_b = 1,5$  кг/с.
- удельная низшая рабочая теплота сгорания топлива  $Q_H^p = 42,5$  МДж/кг;
- объем дымовых газов, получаемый при сжигании 1 кг топлива,  $V_r = 16,5$  м<sup>3</sup>/кг (0 °С, 0,1 МПа)
- средняя объемная теплоемкость дымовых газов при постоянном давлении  $C_{\text{рг}} = 1,45$  кДж/(м<sup>3</sup>\*К),
- температура наружного воздуха  $t_b = 20$  °С,
- действительный объем воздуха при сжигании 1 кг топлива  $V_b = 15,6$  м<sup>3</sup>/кг
- средняя объемная теплоемкость воздуха  $C_{\text{рв}} = 1,297$  кДж/(м<sup>3</sup>\*К).

Расход топлива:

$$B = G/\tau = 12 / (40 * 60) = 0,005 \text{ кг/с.}$$

Процент теплоты топлива, преобразованный в эффективную мощность (эффективный КПД):

$$q_e = N_e * 100 / (B * Q_H^p) = 55 * 100 / (0,005 * 42500) = 25,882 \%$$

Потери теплоты с охлаждающей водой:

$$Q_b = G_b * C_b * \Delta t_b = 1,5 * 4,19 * 12 = 75,42 \text{ кВт}$$

$$q_b = Q_b * 100 / (B * Q_H^p) = 75,42 * 100 / (0,005 * 42500) = 35,49 \%$$

Потери теплоты с отработавшими газами:

$$Q_{\Gamma} = B \cdot (V_{\Gamma} \cdot C_{\text{пр}} \cdot t_{\Gamma} - V_{\text{в}} \cdot C_{\text{пр}} \cdot t_{\text{в}}) = 0,005 \cdot (16,5 \cdot 1,45 \cdot 530 - 15,6 \cdot 1,297 \cdot 20) = 61,378 \text{ кВт};$$

$$q_{\Gamma} = Q_{\Gamma} \cdot 100 / (B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{п}}) = 61,378 \cdot 100 / (0,005 \cdot 42500) = 28,884 \text{ \%}.$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания и остаточные потери:

$$Q_{\text{хн}} + Q_{\text{ост}} = B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{п}} - (Q_{\text{е}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{г}}) = 0,005 \cdot 42500 - (55 + 75,42 + 61,378) = 20,702 \text{ кВт},$$

$$q_{\text{хн}} + q_{\text{ост}} = (Q_{\text{хн}} + Q_{\text{ост}}) \cdot 100 / (B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{п}}) = 20,702 \cdot 100 / (0,005 \cdot 42500) = 9,742 \text{ \%}.$$

Для повышения энергетической эффективности поршневого ДВС можно полезно использовать часть потерь теплоты. Для снижения потерь теплоты с отработавшими газами можно после ДВС по ходу газов установить рекуператор (теплообменный аппарат), в котором за счет тепловыделения при охлаждении отработавших газов от температуры  $t_{\text{г}} = 530 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры уходящих из рекуператора газов  $t_{\text{гр}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  можно получить горячую воду или водяной пар, полезно используемые для теплоснабжения.

Теплопроизводительность (тепловая мощность) рекуператора теплоты отработавших газов:

$$Q_{\text{пр}} = B \cdot V_{\text{г}} \cdot (C_{\text{пр}} \cdot t_{\text{г}} - C''_{\text{пр}} \cdot t''_{\text{гр}}) = 0,005 \cdot 16,5 \cdot (1,45 \cdot 530 - 1,35 \cdot 150) = 46,695 \text{ кВт}.$$

Потери теплоты с охлаждающей водой практически полностью могут быть полезно использованы. Коэффициент использования теплоты топлива ДВС мощностью  $N_{\text{е}} = 55 \text{ кВт}$  с рекуперацией потерь теплоты с охлаждающей водой и отработавшими газами (когенерационная установка):

$$\eta_{\text{и}} = (N_{\text{е}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{пр}}) / (B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{п}}) = (55 + 75,42 + 46,695) / (0,005 \cdot 42500) = 0,833.$$

Экономия «условного» топлива в замещаемых котельных установках за счет рекуперации потерь теплоты с охлаждающей водой и отработавшими газами:

$$\Delta B = (Q_{\text{в}} + Q_{\text{гг}}) / (Q_{\text{ут}} \cdot \eta_{\text{к}}) = (75,42 + 46,695) / (29350 \cdot 0,9) = 0,0046 \text{ кг/с}.$$

При годовом числе часов использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_{\Gamma} = \Delta B \cdot \tau = 0,0046 \cdot 3600 \cdot 7000 = 115920 \text{ кг/ч} = 115,92 \text{ т/ч}.$$

Теплопроизводительность (тепловая мощность) теплового насоса:

$$Q_{\text{тн}} = N_{\text{е}} \cdot \mu = 55 \cdot 3,5 = 192,5 \text{ кВт}.$$

Суммарная максимальная теплопроизводительность (тепловая мощность) установки с учетом теплового насоса и рекуперации потерь теплоты:

$$Q_T = Q_{ТН} + Q_w + Q_{тг} = 192,5 + 75,42 + 46,695 = 314,615 \text{ кВт.}$$

Коэффициент использования теплоты топлива установки при максимальной тепловой мощности:

$$\eta_{и} = Q_T / (B * Q_H^p) = 314,615 / (0,005 * 42500) = 1,48.$$

Фактическая экономия «условного» топлива в замещаемых котельных установках при максимальной тепловой мощности установки:

$$\Delta B = Q_T / (Q_{УТ} * \eta_{кУ}) - B * Q_H^p / Q_{УТ} = 314,615 / (29350 * 0,9) - 0,005 * 42500 / 29350 = 0,00467 \text{ кг/с.}$$

При годовом числе часов использования установленной мощности  $\tau = 7000$  часов годовая экономия «условного» топлива составит

$$\Delta B_{г} = \Delta B * \tau = 0,00467 * 3600 * 7000 = 117684 \text{ кг/год} = 117,684 \text{ т/год.}$$

Полученные результаты расчетов свидетельствуют о целесообразности рекуперации потерь теплоты поршневых ДВС и их использования в качестве привода компрессора теплового насоса. Значение коэффициента использования теплоты топлива при этом может достигать  $\eta_{и} = 0,833-1,48$ , а годовая экономия «условного» топлива  $\Delta B_{г} = 117,684 \text{ т/год}$ .

## Вопросы для самопроверки

### Задача 1

1. Масса ТКО, подвергаемая термическому обезвреживанию (сжигание, газификация, пиролиз), называется:

- а) сухой;
- б) горючей;
- в) рабочей. \*

2. Горючими элементами рабочей массы ТКО являются:

- а) углерод, водород, азот;
- б) углерод, водород, сера; \*
- в) углерод, водород, кислород.

3. Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг ТКО, когда образующиеся водяные пары не конденсируются, называют:

- а) удельной высшей теплотой сгорания ТКО;
- б) удельным тепловыделением ТКО;
- в) удельной низшей теплотой сгорания ТКО. \*

### Задача 2

1. Отношение действительного количества воздуха, подаваемого на горение ТКО, к теоретически необходимому количеству воздуха, называется:

- а) присосами воздуха;
- б) коэффициентом избытка воздуха; \*
- в) концентрацией воздуха.

2. Действительный объем газообразных продуктов огневого обезвреживания (сжигания, инсинерации) ТКО учитывает:

- а) теоретический объем воздуха;
- б) объем водяных паров в результате испарения влаги ТКО;
- в) объемы избыточного воздуха, трехатомных газов, водяных паров, хлористого водорода, теоретический объем азота. \*

3. Температура, при которой в процессе горения вся выделяемая в реакционном объеме инсинератора теплота расходуется только на нагрев продуктов сгорания, называется:

- а) максимальной;
- б) адиабатной (теоретической, калориметрической); \*
- в) средней.

### **Задача 3**

1. Процесс преобразования органической части ТКО в горючие газы при высокотемпературном (1000-2000°C) нагреве с окислителем (кислород, воздух, водяной пар, CO<sub>2</sub> или их смесь) называется:

- а) сжиганием ТКО;
- б) пиролизом ТКО;
- в) газификацией ТКО. \*

2. Продукты газификации ТКО содержат:

- а) кокс;
- б) генераторный газ и золу; \*
- в) генераторный газ.

3. КПД газогенератора называют:

- а) разность между удельной теплотой сгорания ТКО и теплотой сгорания полученного из 1 кг ТКО генераторного газа;
- б) отношение удельной теплоты сгорания ТКО к теплоте сгорания полученного из 1 кг ТКО генераторного газа;
- в) отношение теплоты сгорания генераторного газа, полученного из 1 кг ТКО, к удельной теплоте сгорания ТКО. \*

### **Задача 4**

1. Процесс термического разложения ТКО без доступа кислорода называют:

- а) газификацией ТКО;
- б) пиролизом ТКО; \*
- в) сжиганием ТКО.

2. В результате пиролиза ТКО образуются:

- а) пиролизный газ;
- б) твердый углеродистый остаток (пирокарбон);
- в) пиролизный (неконденсирующийся) газ, жидкие продукты (смолистые вещества) и твердый углеродистый остаток (пирокарбон, кокс). \*

3. Полезная тепловая мощность пиролиза ТКО учитывает:

- а) тепловую мощность, получаемую при сгорании твердого углеродистого остатка;
- б) тепловую мощность, получаемую при сгорании неконденсирующегося газа и смолистых веществ;
- в) тепловую мощность, получаемую при сгорании неконденсирующегося газа, смолистых веществ и твердого углеродистого остатка за вычетом тепловой мощности, расходуемой на осуществление процесса пиролиза. \*

### **Задача 5**

1. Устройства, предназначенные для получения полезной теплоты в виде водяного пара или горячей воды за счет теплоты высокотемпературных уходящих газов технологических установок, называются:

- а) водогрейными котлами;
- б) котлами-утилизаторами; \*
- в) тепловыми двигателями.

2. Потери теплоты с уходящими газами в котле-утилизаторе зависят от:

- а) температуры и объема уходящих газов; \*
- б) тепловой нагрузки на котел-утилизатор;
- в) вида отходов.

3. КПД установки, включающей в себя инсинератор с котлом-утилизатором, учитывает потери теплоты:

- а) от химической и механической неполноты сгорания (в реакционном объеме инсинератора);
- б) с уходящими газами, от наружного охлаждения, с физической теплотой шлаков;
- в) от химической, механической неполноты сгорания, с физической теплотой шлаков, уходящими газами, от наружного охлаждения. \*

### **Задача 6**

1. Паровая турбина является тепловым двигателем, в котором:

- а) потенциальная энергия пара преобразуется в механическую энергию вращающегося ротора турбины;
- б) кинетическая энергия пара преобразуется в механическую энергию вращающегося ротора турбины;
- в) потенциальная и кинетическая энергия пара преобразуется в механическую энергию вращающегося ротора турбины. \*

2. Теоретический процесс расширения пара в турбине от начального давления пара до конечного давления пара осуществляется при:

- а) постоянной температуре пара (изотермический процесс);
- б) постоянном удельном объеме пара (изохорный процесс);
- в) при постоянной энтропии пара (изоэнтропийный, адиабатный процесс). \*

3. К показателям энергетической эффективности работы установки термического обезвреживания ТКО относятся:

- а) годовая продолжительность работы установки;
- б) КПД, экономия условного топлива в замещаемых теплоэнергетических установках; \*

в) количество дополнительно получаемой энергии.

### Задача 7

1. Двигателем внутреннего сгорания (ДВС) называют тепловой двигатель для получения механической энергии за счет использования:

- а) потенциальной энергии водяного пара;
- б) потенциальной энергии сжатого воздуха (газа);
- в) теплоты сгорания топлива. \*

2. Тепловым балансом ДВС называют сумму тепловых потерь ДВС;

- б) количество теплоты, которое выделяется в камере сгорания ДВС;
- в) равенство располагаемой теплоты ДВС сумме полезной теплоты и потерь теплоты при работе ДВС. \*

3. Тепловой насос – это:

- а) насос для перекачки теплой воды;
- б) устройство для передачи тепла;
- в) техническое устройство для отвода тепла от объектов с относительно низкой температурой к объектам (приемникам тепла) с более высокой температурой. \*

### Литература к главе 3

1. ИТС 9-2020. Утилизация и обезвреживание отходов термическими методами. – URL: [http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1500&etkstructure\\_id=1872](http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1500&etkstructure_id=1872)
2. Бернадинаер И.М., Александрова Е.Ю. Использование отходов как альтернативного топлива в цементной печи. – 2017. – С. 22–25.
3. Васильев А.В., Кондратьев А.Ф. Определение морфологического состава твердых бытовых отходов и степени их токсичности в условиях Самарской области России – Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 22, № 2. – 2020. Машиностроение и машиноведение. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-morfologicheskogo-sostava-tverdyh-bytovyh-othodov-i-stepeni-ih-toksichnosti-v-usloviyah-samarskoj-oblasti-rossii>
4. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч. I. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб, 2011. – 84 с. – URL: <http://nizrp.narod.ru/toplivoiteor2.pdf>
5. Возможности переработки отходов в энергию в процессе управления твердыми бытовыми отходами. Руководство для принимающих решение ответственных лиц. – URL: <https://www.giz.de/de/downloads/giz2017-ru-waste-to-energy-guidelines.pdf>
6. Тугов А.Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (Обзор). – ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА. – 2021, № 1. – С. 3–20. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=tepen&year=2021&vol=2021&iss=1&file=ТепEn2101018Tugov.pdf>

7. Petroline Пиролиз. Экопром[Электронный ресурс]//piroliz-ecoprom.ru – 2015. – Режим доступа: <http://piroliz-ecoprom.ru>
8. Расчет газогенераторных установок, определение основных параметров процесса газификации. <https://carlines.ru/modules/Articles/article.php?storyid=279>
9. Infiesta L.R. et al. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel // J. Environ. Manage. – Elsevier, 2019. – Vol. 236, № February. – P. 715–719.
10. Rezaei H. et al. Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content // Fuel Process. Technol. – Elsevier, 2020. – Vol. 205, № April. – P. 106437.
11. Мини-завод термической утилизации твёрдых коммунальных отходов (ТКО). ООО «НИИ СТРОМКОМПОЗИТ» – URL: <https://www.stromkomposit.ru/29.html>

## Глава 4. ВЫБОР НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

### 4.1. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами. Основные понятия и определения

#### 4.1.1 Основные понятия и определения

В соответствии со ст. 1 ФЗ от 24.06.1998 № 89-ФЗ (с изменениями на 02.07.2021) «Об отходах производства и потребления» обновлены термины и определения в сфере обращения с отходами [1].

*Отходы* – отходы производства и потребления – вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению.

*Твердые коммунальные отходы* – отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе потребления физическими лицами

*Обращение с отходами* – деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации и обезвреживанию, размещению отходов.

*Размещение отходов* – хранение и захоронение отходов.

*Утилизация отходов* – использование отходов для производства товаров (продукции), оказания услуг, в том числе повторное применение по прямому назначению (рециклинг), их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (регенерация), извлечение полезных компонентов для повторного применения (рекуперация), а также использование в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки (энергетическая утилизация).

*Обезвреживание отходов* – уменьшение массы отходов, изменение их состава, физических и химических свойств (включая сжигание, за исключением сжигания, связанного с использованием ТКО в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) и (или) обеззараживание на специализированных установках) в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

#### 4.1.2 Законодательная база по определению наилучших доступных технологий обращения с отходами

*Наилучшие доступные технологии* (НДТ) – правовая норма, определенная в ст. 28.1 Федерального закона «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ (с изменениями и дополнениями на 14.07.2022 № 343-ФЗ); впервые была введена Федеральным законом от 21.07.2014 N 219-ФЗ «О внесении изменений

в федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [4,5].

В течение последнего десятилетия в нашей стране происходит существенная реформа промышленной политики, ее превращение в экологическую индустриальную политику, что связано как с возможностями государства по координации социально-экономического развития на основе сбора и получения более полной экологической информации от всех хозяйствующих субъектов, так и со значительной институциональной поддержкой через создаваемые государственные и негосударственные институты. Так, созданное в 2014 г. Бюро НДТ и позднее Центр экологической промышленной политики осуществляют разработку информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ), обеспечивающим переход российских предприятий к новой системе экологического нормирования – к технологическому нормированию негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) [2,3].

Разработанные ИТС НДТ создают основу для оценки результатов деятельности предприятий и отраслей экономики, повышения их экологической и ресурсной эффективности, а также для обоснования инвестиционных проектов для экологической модернизации экономики и совершенствования системы государственных закупок. Переход к технологическому нормированию на основе принципов НДТ требует участия всех заинтересованных сторон, активного диалога и сотрудничества между отраслевыми институтами, промышленными предприятиями и академическими кругами как на уровне отдельных регионов, так и страны в целом. Особое значение приобретает расширение областей применения НДТ на новые отрасли, связанные с созданием промышленности по переработке отходов и соответствующей инфраструктуры для превращения отходов в ценные вторичные ресурсы в рамках развития экономики замкнутого цикла.

Постановление Правительства РФ от 17.11.2022 № 2087 «Правила определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» [6] и «Методические рекомендации по определению технологии в качестве наилучшей доступной технологии», утвержденные Приказом Минпромторга России от 23.08.2019 N 3134 [7], по существу, создают законодательную базу по определению технологий в качестве НДТ. Однако данное понятие трактуется шире, чем только технология производства, так как НДТ представляет собой «совокупность ... технологических процессов, оборудования, технических методов, способов, приемов и средств, основанных на современных достижениях науки и техники, обладающих наилучшим сочетанием показателей достижения целей охраны окружающей среды и экономической эффективности, при условии технической возможности их применения». «НДТ – технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны

окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения» [8].

Введение НДТ как новой правовой нормы влечет за собой большую подготовительную и аналитическую работу по созданию ИТС и пилотному внедрению НДТ в России, проводимую экспертным сообществом.

На сегодняшний день определен перечень областей применения НДТ, т.е. виды экономической деятельности, производства, процессы, оборудование, способы и методы их реализации. Определен и порядок разработки и актуализации справочников НДТ, а также и критерии отнесения к НДТ. ИТС должны периодически обновляться и пересматриваться, не реже чем один раз в 10 лет после публикации предыдущей версии [8].

Созданы и активно обновляются информационно-технические справочники в области НДТ по обращению с отходами [2]:

**ИТС 9–2020** — Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами; в 2022 году проходит актуализацию;

**ИТС 15-2021** — Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов); первая редакция принята в 2016 году; в 2022 году проходит актуализацию;

**ИТС 17-2021** Размещение отходов производства и потребления; первая редакция принята в 2016 году;

**ИТС 52-2022** Обращение с отходами I и II класса опасности;

**ИТС 53-2022** Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде.

Как видно, текущая актуализация ИТС и расширение областей применения НДТ по обращению с отходами подтверждают приоритетность данного направления для развития экономики замкнутого цикла в нашей стране.

#### ***4.1.3 Сущность реформы обращения с отходами***

В 2012 г. Президентом РФ были утверждены «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года», которые определяют долгосрочную стратегию экологизации экономического развития страны. В них обозначены и предусмотрены основные механизмы обеспечения экологически безопасного обращения с отходами, которые предполагают [9]:

- предупреждение и сокращение образования отходов, их вовлечение в повторный хозяйственный оборот посредством максимально полного использования исходного сырья и материалов, предотвращения образования отходов в источнике их образования, сокращения объемов образования и снижения уровня опасности отходов, использования образовавшихся отходов путем переработки, регенерации, рекуперации, рециклинга;
- внедрение и применение малоотходных и ресурсосберегающих технологий и оборудования;
- создание и развитие инфраструктуры экологически безопасного удаления отходов, их обезвреживания и размещения;

- поэтапное введение запрета на захоронение отходов, не прошедших сортировку, механическую и химическую обработку, а также отходов, которые могут быть использованы в качестве вторичного сырья (металлолом, бумага, стеклянная и пластиковая тара, автомобильные шины и аккумуляторы и другие);
- установление ответственности производителей за экологически безопасное удаление произведенной ими продукции, представленной готовыми изделиями, утратившими свои потребительские свойства, а также связанной с ними упаковки;
- обеспечение экологической безопасности при хранении и захоронении отходов и проведение работ по экологическому восстановлению территорий объектов размещения отходов после завершения эксплуатации указанных объектов.

В качестве основной цели Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. [10] обозначено формирование и перспективное развитие промышленности по обработке, утилизации и минимизации количества отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, с применением мирового принципа 3R, который предполагает предотвращение образования отходов, повторное использование и переработку во вторичные ресурсы. Указанная цель предполагает максимальное вовлечение отходов в производственный оборот, планомерное снижение количества не утилизируемых отходов, а также обеспечение промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления современным высокотехнологичным оборудованием.

Предполагается, что в период 2016–2030 гг. объем образования отходов производства и потребления снизится на 8,8%, а доля утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов вырастет до 86% [10]. Количество комплексов по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов увеличится с шести (в 2016 г.) до 226 единиц, а количество мусоросортировочных комплексов ТКО – с 60 до 310. С 2018 по 2025 год уровень образования отходов ежегодно будет снижаться на 1,8-1,9%, а к 2030 году снижение составит 3,7%.

Реализацию стратегии планируется провести в два этапа:

- а) 2018–2021 гг. – корректировка нормативно-правовой базы, создание комплексной системы управления и регулирования, разработка комплексной территориальной схемы развития и размещения объектов промышленности;
  - подготовка и осуществление мер по экономическому стимулированию в целях развития отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов, а также по переработке вторичных ресурсов;
  - формирование механизмов стимулирования хозяйствующих субъектов к стремлению сокращать количество образования отходов и к увеличению объемов их утилизации и обезвреживания;
  - реализация мер содействия отечественным машиностроительным предприятиям, выпускающим оборудование для обработки, утилизации и обезвреживания

отходов, по дальнейшему выпуску оборудования по переработке вторичных ресурсов.

б) 2022–2030 гг. – создание, развитие и обеспечение эффективного функционирования инфраструктуры отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов в субъектах Российской Федерации, а также российской научно-технологической и промышленной инфраструктуры, обеспечивающей выпуск обладающих высоким экспортным потенциалом, конкурентоспособных, высокотехнологичных типов оборудования, техники, машин и механизмов для обработки, утилизации и обезвреживания отходов производства продукции из вторичного сырья.

Становление отрасли переработки отходов целесообразно строить на основе экотехнопарков с соответствующей государственной поддержкой.

Законодательно закрепленное положение о начале перехода на принципы НДТ в 2014 г. [5] предусматривает поэтапность процесса, начиная с крупных предприятий, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду.

Под негативным воздействием на окружающую среду (НВОС) понимают результат деятельности производств и предприятий, который приводит к негативным изменениям качества окружающей среды, а именно: выбросы вредных веществ в атмосферный воздух, сбросы загрязняющих веществ в водные объекты и размещение опасных отходов.

При традиционном подходе к экологическому регулированию практика выдачи экологических разрешений ведется по отдельным компонентам окружающей среды. Напротив, развитие разрешительной деятельности заключается в рассмотрении окружающей среды как единого целого, и выбросы в атмосферу, сбросы загрязняющих веществ в водные объекты, обращение с отходами и другие виды негативного воздействия должны рассматриваться во взаимосвязи, комплексно. Именно такой подход заложен в идее реформы разрешительной деятельности посредством выдачи комплексных экологических разрешений (КЭР). Применение системы КЭР позволит предотвратить НВОС там, где это возможно, или сократить его до приемлемого уровня там, где это не осуществимо [11].

Порядок выдачи комплексных разрешений на НВОС определен Постановлением Правительства РФ от 28.09.2015 № 1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов оказывающих НВОС, к объектам I–IV категорий» и, по существу, представляет собой порядок перехода к НДТ российской промышленности как многоэтапный процесс, начинающийся в первую очередь с предприятий, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду [12].

Начиная с 2019 г., предприятия должны заявить о своей принадлежности к той или иной установленной категории НВОС и в ближайшее десятилетие должны осуществить переход на НДТ, при этом выполняя требования к экологической документации.

Для всех категорий объектов НВОС общие требования заключаются в сле-

дующем: ведение учета в области обращения с отходами; предоставление статистического отчета по форме «2ТП (отходы)»; паспортизация отходов I-IV классов опасности и подтверждение отнесения отходов к V классу опасности.

В зависимости от категории объекта НВОС дифференцированы следующие требования к предприятиям [13]:

- I категория – объекты, оказывающие значительное НВОС и относящиеся к областям применения НДС; они предоставляют комплексное экологическое разрешение (КЭР), программу производственного экологического контроля (ПЭК) и налоговую декларацию о расчете платы за НВОС; они осуществляют переход на НДС в период до 01.01.2024 года. Срок действия КЭР – 7 лет, но может быть продлен на тот же период [4]. Объекты размещения отходов или полигоны ТКО относятся к I категории.
- II категория – объекты, оказывающие умеренное НВОС; они предоставляют декларацию о воздействии на окружающую среду, программу ПЭК, план мероприятий по охране окружающей среды (ПМООС) и налоговую декларацию о плате за НВОС.
- III категория – объекты, оказывающие незначительное НВОС; они предоставляют программу ПЭК, ПМООС и налоговую декларацию о плате за НВОС.
- IV категория – объекты, оказывающие минимальное НВОС; они осуществляют только паспортизацию отходов I–IV классов опасности и подтверждение отнесения отходов к V классу опасности; ведут учет и составляют отчетность в области обращения с отходами. Вносить плату за НВОС им не требуется. К данной категории относятся объекты со следующими признаками [12]:
  - наличие на объекте стационарных источников загрязнения, масса загрязняющих веществ (ЗВ) в выбросах в атмосферный воздух которых не превышает 10 т/год, при отсутствии в составе выбросов веществ I и II классов опасности, радиоактивных веществ;
  - отсутствие сбросов ЗВ в составе сточных вод в централизованные системы водоотведения, другие сооружения и системы отведения и очистки сточных вод, за исключением сбросов ЗВ, образующихся в результате использования вод для бытовых нужд, а также отсутствие сбросов ЗВ в окружающую среду.

#### **4.2 Определение экологических результатов и экономической эффективности проектов энергетической утилизации отходов**

Значительные инвестиционные затраты для перехода на принципы экономики замкнутого цикла и, особенно внедрение проектов энергетической утилизации отходов требует оценки соответствующих затрат и результатов.

По своей сути, определение наилучших доступных технологий должно быть экономически обосновано с учетом требований законодательства, возможностей рынка и местных условий, где планируется внедрение технологий. Это положение нашло свое отражение и в алгоритме или логическом подходе выбора НДС (рисунок 5) [14, 15].

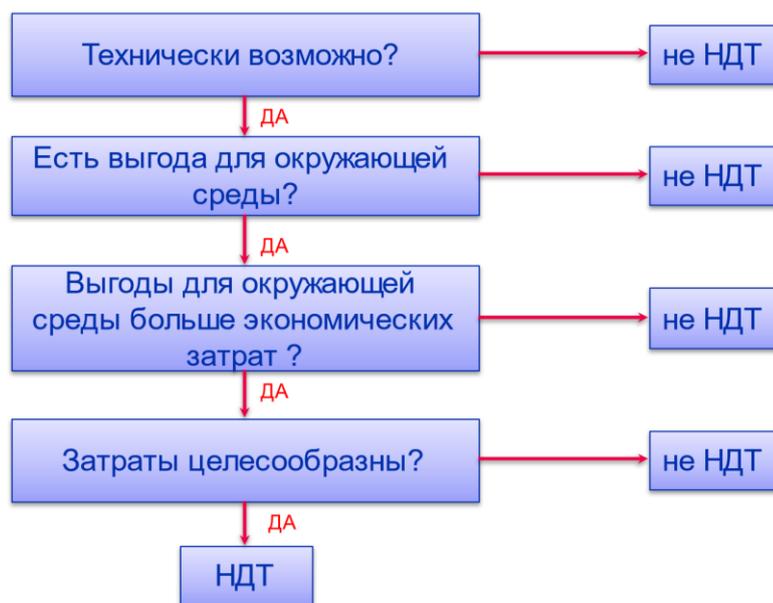


Рисунок 4.1 – Логический подход к выбору НДТ [15]

В соответствии с Методическими рекомендациями [7] для выбора технологии в качестве НДТ достаточно сравнить затраты на внедрение и эксплуатацию технологии и выгоды от ее внедрения путем применения метода анализа затрат и выгод (англ. Cost Benefit Analysis, CBA). Экономическая эффективность от внедрения НДТ может быть определена как соотношение между годовыми затратами на внедрение в рублях и достигнутым сокращением эмиссий в тоннах в год. Однако данный метод имеет ограничения, если, помимо экологических результатов, внедрение технологии дает также и экономические результаты.

В значительной степени это относится к проектам энергетической утилизации отходов с рекуперацией энергии и получением вторичных сырьевых ресурсов. В этом случае выбор той или иной технологии в качестве наилучшей требует технико-экономического обоснования с выполнением анализа эффективности затрат для определения того, какой проект является наиболее предпочтительным для достижения определенной экологической цели при возможно более низкой стоимости. Недостаток данного вида анализа, как показано в [7], заключается в необходимости сбора большого количества данных и сложности учета всех взаимосвязанных эффектов в денежной форме.

#### **4.2.1 Технико-экономическое обоснование проекта по внедрению НДТ**

Составление технико-экономического обоснования (ТЭО) проекта по внедрению НДТ проводится с целью предварительного определения затрат и результатов при внедрении проекта и их сопоставлении путем расчета показателей экономической эффективности. Создание ТЭО - процесс итерационный, он начинается с предварительного технико-экономического обоснования и уточняется по мере детализации и разработки технической документации проекта.

В соответствии с рекомендациями [16] ТЭО включает три этапа – техническая, экологическая и экономическая оценка.

**Техническая оценка.** Приводятся описание сущности предлагаемого технического решения, перечень и технические характеристики приобретаемого оборудования. Указывается потребляемая электрическая мощность, расход воды, реагентов, материалов и т. п., продолжительность работы оборудования (ч/год). Приводятся поясняющие схемы, рисунки, графики, результаты экспериментальных или промышленных испытаний.

На основе предполагаемого проекта по обращению с отходами определяются покупное оборудование, капитальные и текущие эксплуатационные (операционные) затраты.

В соответствии с методологией учета капитальных затрат при внедрении НДТ [14] рекомендуется разукрупнение (деагрегация) данных о затратах на отдельные составляющие до такого уровня детализации, чтобы можно было отдельно показать следующие виды затрат:

- разработка технического задания; разработка проекта; планирование работ;
- приобретение участка земли (если необходимо); подготовка участка под застройку;
- затраты на установку и монтаж (сооружения, оборудование), в том числе: затраты на строительство здания и сооружения (фундамент (опоры) монтаж, электросети, трубопроводы, изоляцию, отделку и т.д.);
- затраты на инженерные коммуникации, строительство и расходы на инженерные изыскания;
- стоимость выбора подрядчика и оплата работы подрядчика;
- испытание оборудования; затраты на запуск;
- затраты на вывод из эксплуатации;
- затраты на средозащитное оборудование:
- затраты на оборудование для экологического контроля, например, для улавливания, извлечения первичных загрязняющих веществ, образующихся в технологическом процессе;
- вспомогательное (запасное) оборудование;
- аппаратура и инструменты;
- непредвиденные расходы, определяемые в процентах от капитальных затрат.

Для упрощенной оценки структуру капитальных затрат можно представить в зависимости от стоимости приобретаемого оборудования (таблица 4.1).

Эксплуатационные затраты (таблица 4.2) при внедрении НДТ – это текущие расходы, связанные с эксплуатацией и обслуживанием оборудования проекта после его внедрения; рассчитываются на годовой выпуск и включают в себя:

- затраты на энергоносители: электроэнергия, нефтепродукты, природный газ и др. виды топлива;
- затраты на материалы и услуги: замена деталей; вспомогательные средства, например, химические вещества, воду; услуги в области охраны окружающей среды, например, обращение с отходами;

- затраты на оплату труда;
- фиксированные затраты – расходы на ремонт: страховые премии; лицензионные платежи; резерв на непредвиденные случаи и аварийные работы; другие общие накладные расходы (например, административные);
- последующие затраты: внедрение новой технологии может привести к изменению объема производства или ухудшению качества продукции.

Таблица 4.1 – Структура капитальных (инвестиционных) затрат

№ п/п	Наименование статьи затрат	Стоимость, тыс. руб.	Примечание
1	Приобретение оборудования		Необходимо знать!
2	Разработка проекта		10–40 % от п.1
3	Монтажные и пусконаладочные работы		10–15 % от п.1
4	Транспортно-заготовительные расходы		3–7 % от п.1
5	Обучение		3–5 % от п.1
6	Прочие расходы		2–3 % от п.1
	ИТОГО:		

Таблица 4.2 – Структура эксплуатационных затрат

№ п/п	Наименование статьи затрат	Единица измерения	Количество	Цена за ед., тыс. руб.	Стоимость, тыс. руб.
1	Электроэнергия	кВт-ч/год			
2	Водопотребление	м <sup>3</sup> /год			
3	Водоотведение	м <sup>3</sup> /год			
4	Природный газ	тыс. м <sup>3</sup> /год			
5	Техническое обслуживание и ремонт	тыс. руб./год			
6	Оплата труда	тыс. руб./год			
	ИТОГО:				

**Экологическая оценка** позволяет определить возможное снижение или увеличение негативного воздействия на ОС в результате внедрения проекта НДТ. Определяются положительные и отрицательные экологические эффекты (воздействия), связанные с внедрением проекта; результаты заносятся в таблицу (таблица 4.3). Количественную и стоимостную оценку экологических сбережений проекта

выполняют по каждому из воздействий, как это показано на примере проекта внедрения пиролизной установки с образованием незначительных выбросов в атмосферу. В проектах утилизации отходов экологическое воздействие (эффект) от внедрения соответствует определенному классу опасности и количеству перерабатываемых отходов. Все воздействия приводятся на годовое сокращение.

Таблица 4.3 – Экологическая оценка

Наименование проекта	Вид воздействия	Характеристика воздействия			
		Отходы класс 3	Выбросы	....	...
		т/год	т/год	т/год	ед. изм.
Внедрение пиролизной установки	1. Сокращение размещения отходов нефтешлама на полигоне	50	–		
	2. Образование дымовых газов	–	0,004		

Сумма экономии или экологические сбережения определяются на основе расчета сокращения платы за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС) при внедрении инвестиционного проекта (таблица 4.4). Сумма платы за выбросы рассчитывается по каждому загрязняющему веществу и затем суммируется. В таблице 4.4 показана итоговая сумма за выбросы.

Таблица 4.4 – Экологические сбережения

Экологическое воздействие	Характеристика воздействия		Экономия, тыс. руб./год
	Количество, т/ год	%	
1. Сокращение размещения отходов нефтешлама на полигоне	50	100	83 601
2. Образование дымовых газов	0,004	2	– 22
Всего:			83 579

Подробно правила расчета платы за НВОС приводятся в работе [13]. Плата за НВОС определяется путем перемножения массы выбросов, сбросов и отходов на соответствующую базовую ставку платы (базовый тариф) в рублях за одну тонну. Базовые ставки для расчета выбираются на основе Постановления Прави-

тельства РФ от 13.09.2016 № 913 (ред. от 24.01.2020) «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» по состоянию на 2018 г. с учетом коэффициента индексации Ки [17].

В 2022 г. коэффициент Ки равен 1,19 [18] (Постановление Правительства от 01.03.2022 № 274); в 2023 г. коэффициент Ки запланирован на уровне 1,26.

**Экономическая оценка** позволяет учесть, помимо экологических сбережений, также и другие виды доходов и текущих затрат, возникающих при реализации проекта

На этапе экономической оценки определяются экономия и доходы, а также затраты при эксплуатации проекта и показатели экономической эффективности проекта. Доходы могут быть получены в результате увеличения объема производства продукции, за счет реализации вторичных ресурсов, полученных из отходов, снижения себестоимости продукции, повышения качества продукции и улучшения ее потребительских свойств. Упрощенно можно считать, что расходы связаны только с эксплуатационными (текущими) затратами, структура которых приведена в таблице 4.2 «Структура эксплуатационных затрат».

В соответствии с методологией оценки затрат и результатов при внедрении НДТ [14] различают доходы, прибыли и предотвращенные издержки.

Таблица 4.5 – Экономическая оценка

Наименование статей экономии (или затрат)	Текущая ситуация		После внедрения		Экономия	
	Количество	Сумма, тыс. руб.	Количество	Сумма, тыс. руб.	Количество	Сумма, тыс. руб.
Экологические сбережения, всего						
Экономия за счет потребления энергии на собственные нужды						
Экономия за счет отпуска тепловой энергии						
Доход от реализации печного топлива						
Эксплуатационные затраты						
<b>Итого: чистая годовая экономия В:</b>						

К доходам относятся:

- продажа очищенных сточных вод для ирригации;
- продажа произведенной электроэнергии;
- продажа золы (золошлаковых отходов) для производства строительных материалов.

Экономия или предотвращенные издержки включают в себя:

- экономия сырьевых материалов;
- экономия вспомогательных материалов (например, химических реагентов, воды) и услуг;
- экономия энергоносителей;
- экономия трудовых затрат;
- экономия затрат на мониторинг выбросов / сбросов.

К последующим выгодам относятся выгоды, получаемые от внедрения новой техники или технологии, например, за счет изменения объема производства или улучшения качества продукции.

Источником экономии после внедрения природоохранных проектов, направленных на повышение энерго- и ресурсосбережения и сокращение образования отходов, могут стать сокращение эксплуатационных расходов и снижение платы за НВОС.

Результаты экономической оценки удобно привести в табличной форме (таблица 4.5). Экономия показывается в крайнем правом столбце со знаком «плюс», а эксплуатационные затраты – со знаком «минус».

#### ***4.2.2 Показатели экономической эффективности***

Зная величину чистой годовой экономии  $B$  при внедрении проекта и допуская, что она будет постоянной величиной в течение экономического срока службы проекта  $n$ , можно определить простой период окупаемости.

Простой период окупаемости проекта  $PВ$ , лет рассчитывается по формуле

$$PВ = \frac{I_0}{B},$$

где  $I_0$  – инвестиционные затраты, тыс. руб.;  $B$  – чистая годовая экономия, тыс. руб./ год. Однако с течением времени ценность денег уменьшается, поэтому для снижения рисков для инвесторов определение показателей экономической эффективности проводится с учетом процедуры дисконтирования денежных потоков, базирующейся на концепции временной стоимости денег.

Дисконтирование – это процедура приведения стоимости будущих денежных потоков к их стоимости в текущий период. Процедура дисконтирования позволяет привести разновременные доходы и расходы к одному, нулевому моменту времени, когда принимается решение об экономической эффективности инвестиций – здесь и сейчас.

С помощью дисконтирования затраты и выгоды, накапливающиеся в течение различных периодов времени, представляются таким образом, чтобы их можно было выразить в одном временном периоде и сравнить. Дисконтирование осуществляется путем умножения суммы денежного потока на коэффициент дисконтирования  $k$ , значение которого зависит от процентной ставки и порядкового номера года в течение срока экономической жизни проекта. Чем больше коэффициент дисконтирования, тем быстрее снижается приведенная стоимость будущих денежных потоков с течением времени:

$$PV = \frac{FV}{(1+r)^y},$$

где  $PV$  – настоящая стоимость будущего денежного потока, приведенного к нулевому моменту времени (англ. *Present Value*), тыс. руб.;  $FV$  – сумма денежных средств, поступающих в конце каждого текущего года (периода времени) (англ. *Future Value*), тыс. руб.;  $r$  – номинальная процентная ставка, ставка дисконтирования или норма прибыли или рентабельности инвестиционного проекта (в долях единицы); принимается, например, на уровне ставки за пользование кредитом банка;  $k$  – коэффициент дисконтирования,  $k = (1+r)^{-y}$ ;  $y$  – порядковый номер года, в течение экономического срока службы проекта,  $y$  изменяется от 0 до  $n$ ; обычно  $n$  принимается равным не менее 10 лет.

Суммируя дисконтированные денежные потоки можно найти один из основных показателей экономической эффективности инвестиционных проектов – чистый дисконтированный доход  $NPV$  (англ. *Net Present Value*).

Чистый дисконтированный доход  $NPV$  представляет собой алгебраическую сумму дисконтированных денежных потоков или разность между дисконтированными денежными доходами и затратами, возникающими при реализации проекта за время его существования, и определяется по формуле

$$NPV = \sum \frac{FV}{(1+r)^y}.$$

Показатель  $NPV$  можно определить табличным способом. Для упрощенных расчетов можно принять, что денежные потоки чистой годовой экономии  $B$  постоянны в течение всего экономического срока службы проекта. Проект рентабелен, если показатель  $NPV \geq 0$ .

Вторым, не менее важным показателем экономической эффективности проектов является внутренняя норма рентабельности  $IRR$  (англ. *Internal Rate of Return*). Внутренняя норма рентабельности  $IRR$  – это величина номинальной процентной ставки (нормы прибыли), при которой значение  $NPV$  равняется нулю, т.е. сумма дисконтированных денежных доходов равна сумме дисконтированных денежных расходов (рисунок 4.2).  $IRR$  трактуется как предельный уровень доходности инвестиций.

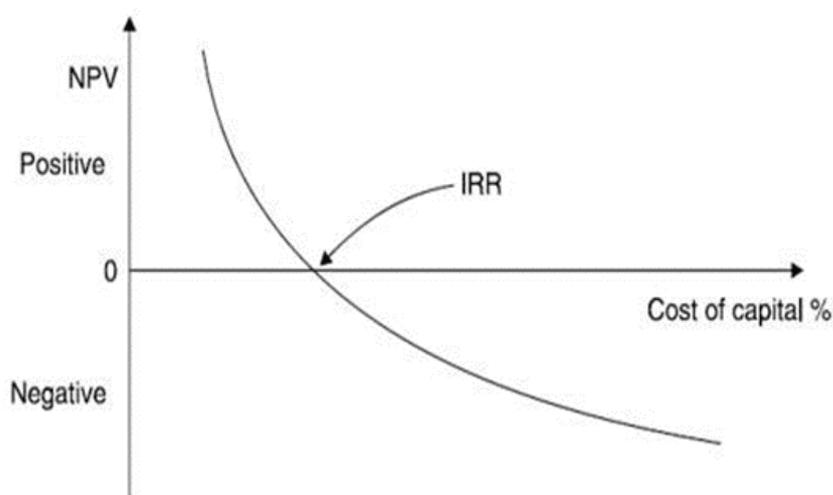


Рисунок 4.2 – Внутренняя норма рентабельности проекта

Обычно внутренняя норма доходности определяется методом итерационного подбора значений ставки дисконтирования  $r$ . При этом выбирают несколько значений ставки дисконтирования  $r$  и определяют показатель  $NPV$ . Величина показателя  $IRR$  находится на интервале значений  $r$ , при котором показатель  $NPV$  меняет свой знак. При одном значении  $r$  значение  $NPV$  должно быть отрицательным, при другом значении  $r$  – положительным. Затем величина  $IRR$  находится по формуле интерполяции.

Показатель  $IRR$  можно также упрощенно определять графическим способом, предполагая, что зависимость  $NPV$  от  $r$  линейная.

Проект рентабелен, если внутренняя норма рентабельности больше ставки дисконтирования  $IRR > r$ .

Зная чистый дисконтированный доход  $NPV$ , можно найти индекс доходности проекта  $PI$  (от англ. *Profitability Index*). Индекс доходности  $PI$  показывает отношение дисконтированных денежных поступлений при реализации проекта к величине инвестиций:

$$PI = NPV / I_0,$$

где  $NPV$  – чистый дисконтированный доход; тыс. руб.;  $I_0$  – инвестиционные затраты, тыс. руб. Проект рентабелен, если индекс доходности  $PI \geq 1$ .

В качестве дополнительного показателя для оценки эффективности инвестиций применяется дисконтированный период окупаемости,  $DPB$  (англ. *Discounted Payback Period*) – это продолжительность времени, в течение которого сумма чистых дисконтированных доходов становится равной сумме вложенных инвестиций. Данный показатель можно использовать для принятия решений по внедрению НДТ, так как любой инвестиционный проект с жизненным циклом более дисконтированного периода окупаемости обеспечивает окупаемость инвестиций.

Таким образом, анализируя затраты и выгоды, получаемые при внедрении проекта, можно определить основные экономические показатели эффективности

и достижимости целей проекта. При сравнительной оценке технологий для выбора НДТ рекомендуется рассматривать все перечисленные показатели, так как они позволяют дать инвестору наиболее полную оценку эффективности инвестиций.

### Вопросы для самопроверки

1. В чем разница между понятиями «обращение с отходами» и «утилизация отходов»?
2. В чем сущность логического подхода к выбору НДТ?
3. Что относится к капитальным затратам при внедрении инвестиционного проекта, для организации инсинерации отходов?
4. Приведите примеры, что относится к эксплуатационным затратам при внедрении пиролизной установки.
5. Перечислите показатели, которые используются для обоснования экономической эффективности проектов.

### Литература к главе 4

1. Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления", отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных законодательных актов (положений законодательных актов) Российской Федерации" от 29.12.2014 N 458-ФЗ – URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201412290022.pdf>
2. Бюро наилучших доступных технологий. – URL: <https://burondt.ru/>
3. Центр экологической промышленной политики. – URL: <https://eipc.center/>
4. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (в ред. от 14.07.2022). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297>
5. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды и отдельные законодательные акты Российской Федерации" – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201407220035>
6. Постановление Правительства РФ от 17.11.2022 № 2087 «Правила определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211180025>
7. Методические рекомендации по определению технологии в качестве наилучшей доступной технологии. утв. Приказом Минпромторга России от 23.08.2019 N 3134. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/561106991>
8. Сравнительный анализ процедур разработки, пересмотра и актуализации справочников по наилучшим доступным технологиям в Европейском Союзе

- и Российской Федерации/ Под редакцией Д.О. Скобелева (на русском и английском языках). – М.: Издательство “Перо”, 2018. – 114 с.
9. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. Президентом Российской Федерации 30 апреля 2012 года. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902369004>
  10. Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>
  11. Наилучшие доступные технологии и комплексные экологические разрешения: перспективы использования в России/ Под редакцией М.В. Бегака. – М.: ООО “ЮрИнфоР-Пресс”, 2010. – 220 с.
  12. Постановление Правительства РФ от 28 сентября 2015 г. №1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854>
  13. Ю.Г. Гладштейн, О.И. Сергиенко, Р.Ф. Юльметова, С. Сильвеннойнен-Хийску, С. Пииппо, Е.Б. Королева. Обращение с отходами: российский и финский опыт. - Учебное пособие./ Коллектив авторов. – СПб.: ООО “Политехника Сервис”, 2021. – 158 с.
  14. Reference Document on Economics and Cross-Media Effects July 2006 . – URL: [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ecm\\_bref\\_0706.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ecm_bref_0706.pdf)
  15. ГОСТ Р 54097-2010. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085351>
  16. Методология и практика чистого производства : учебное пособие / О. А. Кобыч, В. В. Жиделева, В. С. Пунгина [и др.] ; отв. ред. В. В. Жиделева ; Сыкт. лесн. ин-т. — Сыктывкар : СЛИ, 2015. — 196 с. URL: [https://www.sli.komi.com/files/met\\_i\\_praktika\\_chist\\_proizvodstva\\_2015.pdf](https://www.sli.komi.com/files/met_i_praktika_chist_proizvodstva_2015.pdf)
  17. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420375216>
  18. Постановление Правительства от 01.03.2022 № 274 "О применении в 2022 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду”. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728324879>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обращение с отходами производства и потребления на основе принципов экономики замкнутого цикла представляет актуальную научную и практическую задачу, решение которой в нашей стране и во всем мире создает огромные возможности для снижения негативного воздействия хозяйственной деятельности человека на окружающую среду при размещении отходов на полигонах захоронения, препятствуя загрязнению земель, потерям биоразнообразия и глобальному изменению климата.

Одна из провозглашенных целей экономического развития России, а именно создание экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики), предполагает не только замедление потоков ресурсов и сокращение образования отходов и других видов эмиссий, но возврат отходов в виде ресурсов в хозяйственный оборот, что будет способствовать повышению ресурсной и энергетической эффективности производства.

Как показывает накопленный опыт экологической модернизации российской экономики, для развития экономики замкнутого цикла большое значение имеет применение наилучших доступных технологий (НДТ) для переработки и утилизации отходов. Быстрая актуализация информационно-технических справочников по НДТ, рассмотренных в данном издании, подтверждает необходимость подготовки специалистов, обладающих компетенциями в данной области для создания индустрии переработки отходов. При этом применение биохимических и термохимических технологий переработки отходов требует не только знания особенностей применения технологий, но и определенных навыков для решения технических вопросов, определения энергетических характеристик и выбора оборудования. Немаловажным фактором успешного применения технологий, как правило, требующих значительных инвестиций, является выполнение эколого-экономического обоснования выбранных решений для соответствия требованиям НДТ.

Энергетические технологии утилизации отходов рассматриваются как дополнительные методы в иерархии отходов, следуя за сокращением в источниках образования, переработкой и рециклингом отходов. Однако их применение широко распространено во всем мире, и при проведении в контролируемых условиях с рекуперацией энергии и использованием побочных продуктов эти технологии успешно заменяют прямое захоронение на полигонах. Они должны рассматриваться в составе экотехнопарков и включаться в территориальные схемы обращения с отходами.

Авторы выражают глубокую признательность Благотворительному фонду Владимира Потанина за поддержку проекта № ГСГК-0144-21 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в экономике замкнутого цикла» в 2021–2022 гг. в рамках «Конкурса на предоставление грантов преподавателям магистратуры», благодаря которой стала возможной подготовка предлагаемого издания.

Ольга Ивановна Сергиенко  
Юрий Алексеевич Рахманов  
Ксения Геннадьевна Кузнецова  
Наталия Владимировна Курникова

**НОВЫЕ  
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
В ЭКОНОМИКЕ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА**

**Научно-учебное издание**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе