



МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГУМАНИТАРНО-  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ»)

ФАКУЛЬТЕТ ЕСТЕСТВЕННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КАФЕДРА ГЕОГРАФИИ, БИОЛОГИИ И ХИМИИ

**Возможности и перспективы введения альтернативного топлива  
в производство**

**Выпускная квалификационная работа по направлению  
05.03.06 Экология и природопользование**

**Направленность программы бакалавриата  
«Природопользование»  
Форма обучения очная**

Проверка на объем заимствований:  
86,08 % авторского текста

Выполнила:  
Студентка группы ОФ-423/058-4-1  
Загоровская Елена Владимировна

Работа рекомендована к защите  
рекомендована/не рекомендована

« 23 » 05 2025 г.

И.о. зав. кафедрой географии, биологии и  
ХИМИИ  
(название кафедры)

Научный руководитель:  
канд. пед. наук, доцент

Малаев А.В.

Лисун Наталья Михайловна

Челябинск  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ПОНЯТИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА.....	5
1.1 История возникновения .....	5
1.2 Современные виды альтернативного топлива и их процессы производства.....	7
1.3 RDF-топливо. Основные понятия и классификация.....	15
1.4 Технологические процессы производства RDF-топлива .....	22
1.5 Применение в энергетике .....	27
1.6 Экологические аспекты.....	31
1.7 Экономические характеристики.....	39
1.8 Практические примеры .....	51
Выводы по первой главе .....	54
ГЛАВА 2. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСКОПАЕМЫХ И АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА .....	57
2.1 Тенденция использования альтернативных источников энергии .....	57
2.2 Сравнительный анализ видов альтернативного топлива по энергоёмкости и количеству загрязняющих веществ .....	58
2.3 Расчет эффективности замены ископаемого топлива на альтернативное на основе энергоёмкости и количества выбросов в атмосферу .....	64
Выводы по второй главе.....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	71
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	72

## ВВЕДЕНИЕ

Современное общество сталкивается с актуальной проблемой зависимости от ископаемых видов топлива, что приводит к экологическим катастрофам, истощению ресурсов и глобальным изменениям климата. В условиях нарастающей значимости устойчивого развития и необходимости сокращения углеродного следа, вопрос замены традиционных источников энергии на альтернативные становится особенно актуальным. Альтернативные топлива, как более экологически чистые и возобновляемые источники энергии, представляют собой реальную возможность не только уменьшить негативное влияние на природу, но и обеспечить энергетическую безопасность на долгосрочную перспективу.

На данный момент именно ресурсосбережение является наиболее перспективным способом снижения негативного воздействия на окружающую среду выброшенных в виде отходов ресурсов. Безусловно, использование любого предприятия. Его использование вносит изменения в контроль производства, связанный с особенностями состава топлива и условиями его сжигания альтернативного топлива усложняет традиционную технологию

В данной выпускной квалификационной работе рассматриваются перспективы и возможности введения альтернативного топлива в производство.

Основной целью исследования является анализ существующего альтернативного топлива и их потенциальное применение в промышленности. Для достижения этой цели необходимо решить несколько задач:

1. Провести обзор литературы по существующим видам альтернативного топлива, включая биомассу, водород, этанол а также RDF-топливо.

2. Оценить преимущества и недостатки использования альтернативного топлива по сравнению с традиционным, а также раскрыть экологические аспекты.

3. Исследовать текущие тенденции и практики в мире по внедрению альтернативного топлива в производственные процессы.

Предметами исследования являются виды альтернативного топлива, их достоинства и недостатки, экологические последствия использования альтернативного топлива.

Объектом исследования являются альтернативные виды топлива.

# ГЛАВА 1. ПОНЯТИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА

## 1.1 История возникновения

Топливо – горючие вещества, выделяющие при сжигании значительное количество теплоты, которая используется непосредственно в технологических процессах или преобразуется в др. виды энергии.

Альтернативное топливо – это любое топливо, которое не является традиционным ископаемым топливом, таким как бензин, дизельное топливо и природный газ. Основная цель использования альтернативных видов топлива – снижение зависимости от ископаемого топлива, сокращение выбросов парниковых газов и улучшение экологической обстановки [1].

Первые шаги: растительные масла и спирты.

Идея использования растительных масел в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания зародилась практически одновременно с изобретением этих двигателей. Рудольф Дизель, создатель дизельного двигателя, был одним из первых, кто пропагандировал использование растительного масла в качестве альтернативы нефти. В 1900 г. на Всемирной выставке в Париже он продемонстрировал свой двигатель, работающий на арахисовом масле, заявив, что будущее принадлежит топливу, получаемому из сельскохозяйственных культур.

Преимущества растительных масел были очевидны: они возобновляемы, относительно безопасны и могут производиться локально, снижая зависимость от импорта нефти. Однако существовали и недостатки: высокая вязкость растительных масел приводила к проблемам с распылением топлива и образованию отложений в двигателе.

Другим ранним примером альтернативного топлива стал спирт (этанол). Использование этанола в качестве топлива также имеет давнюю историю. Уже в начале XX в. этанол использовался в качестве добавки к бензину для повышения октанового числа и улучшения характеристик

двигателя. Производство этанола было налажено из различных видов сырья, таких как зерно, картофель и сахарный тростник.

В периоды дефицита нефти, например во время мировых войн, использование спирта как альтернативного топлива активизировалось. Однако после стабилизации поставок нефти интерес к спирту снижался из-за его более высокой стоимости производства и более низкой энергетической плотности по сравнению с бензином [11].

Эпоха нефтяного изобилия и забвение альтернатив (1950–1970 гг.).

В послевоенный период, с развитием нефтедобывающей промышленности и снижением цен на нефть, интерес к альтернативным видам топлива практически сошел на нет. Нефть стала доминирующим источником энергии, обеспечивая потребности промышленности и транспорта. Развитие инфраструктуры, ориентированной на нефть, и лоббирование интересов нефтяных компаний укрепили ее позиции на рынке.

Несмотря на это, исследования в области альтернативных видов топлива не прекращались полностью. Ученые продолжали изучать возможности использования водорода, метана и других веществ в качестве топлива. Однако эти исследования носили скорее теоретический характер и не получали значительной финансовой поддержки.

Энергетические кризисы и возрождение интереса (1970–1980 гг.).

Два нефтяных кризиса 1973 г. и 1979 г. стали поворотным моментом в истории альтернативного топлива. Резкий рост цен на нефть и опасения по поводу надежности поставок заставили правительства и научное сообщество вновь обратиться к поиску альтернативных источников энергии.

В этот период активизировались исследования в области производства этанола из биомассы. Бразилия стала пионером в этой области, запустив масштабную программу Proálcool, целью которой было замещение бензина этанолом, производимым из сахарного тростника.

Программа имела значительный успех, и к концу 1980-х гг. большая часть автомобилей в Бразилии работала на этаноле.

В других странах также предпринимались попытки развития альтернативных видов топлива. В США был принят закон о стимулировании производства этанола из кукурузы. В Европе активизировались исследования в области производства биодизеля из растительных масел.

Экологические проблемы и развитие биотоплива (1990–2000 гг.).

В конце XX в. на первый план вышли экологические проблемы, связанные с использованием ископаемого топлива. Загрязнение воздуха, глобальное потепление и изменение климата стали серьезными угрозами для окружающей среды и здоровья людей. Это привело к дальнейшему развитию альтернативных видов топлива, особенно биотоплива.

Биотопливо получило широкое распространение как более экологически чистая альтернатива бензину и дизельному топливу. В этот период были разработаны новые технологии производства биотоплива, такие как ферментативное расщепление целлюлозы и трансэтерификация растительных масел.

Однако развитие биотоплива столкнулось и с критикой. Высказывались опасения по поводу того, что производство биотоплива может приводить к вырубке лесов, истощению водных ресурсов и росту цен на продовольствие. Это привело к необходимости разработки более устойчивых и эффективных методов производства биотоплива.

## 1.2 Современные виды альтернативного топлива и их процессы производства

Биотопливо – это топливо, производимое из биомассы, то есть из органических материалов растительного или животного происхождения. Его можно разделить на несколько поколений, отличающихся по используемому сырью и технологиям производства [2].

## 1. Биотопливо первого поколения (1G).

Биотопливо первого поколения производится из сахаросодержащих, крахмалосодержащих или масличных культур, таких как сахарный тростник, кукуруза, рапс и соя.

Биоэтанол производится путем ферментации сахаров или крахмала с использованием дрожжей.

Процесс производства (на примере кукурузы):

- подготовка сырья – кукуруза измельчается и смешивается с водой;
- разжижение – крахмал разжижается ферментами, превращаясь в декстрины;
- осахаривание – декстрины расщепляются на глюкозу с помощью ферментов (глюкоамилазы);
- ферментация – глюкоза ферментируется дрожжами (*Saccharomyces cerevisiae*) с образованием этанола и углекислого газа;
- дистилляция – этанол отделяется от бражки путем дистилляции. Обычно получается смесь этанола и воды (около 95 % этанола);
- дегидратация – для получения абсолютного этанола (100 %), вода удаляется путем различных методов, например, молекулярной фильтрацией или азеотропной дистилляции;
- денатурация – этанол денатурируется добавлением небольшого количества (обычно до 5 %) бензина или других веществ, чтобы сделать его непригодным для питья и избежать акцизного сбора.

Биодизель производится путем переэтерификации растительных масел или животных жиров.

Процесс производства (на примере растительного масла).

Подготовка сырья. Растительное масло очищается от примесей.

Переэтерификация. Масло смешивается с метанолом (или этанолом) и катализатором (обычно гидроксидом натрия или калия). В результате реакции образуются метиловые (или этиловые) эфиры жирных кислот (биодизель) и глицерин.



Разделение. Биодизель и глицерин разделяются путем отстаивания или центрифугирования.

Очистка. Биодизель промывается водой для удаления остатков катализатора, метанола и глицерина.

Сушка. Биодизель сушится для удаления остаточной воды.

Ограничения биотоплива первого поколения:

- использование сельскохозяйственных земель, предназначенных для производства продуктов питания, что может привести к росту цен на продовольствие и продовольственной безопасности;
- ограниченная доступность сырья;
- не всегда значительное снижение выбросов парниковых газов (в зависимости от способа производства и используемого сырья).

## 2. Биотопливо второго поколения (2G).

Биотопливо второго поколения производится из непищевой биомассы, такой как сельскохозяйственные отходы (солома, стебли кукурузы), лесные отходы (древесные опилки), энергетические культуры (мискантус, свинорой).

Целлюлозный этанол производится путем расщепления целлюлозы и гемицеллюлозы, содержащихся в лигноцеллюлозной биомассе, на сахара и последующей ферментации этих сахаров в этанол.

Процесс производства:

- биомасса подвергается предварительной обработке для разрушения структуры лигноцеллюлозы и повышения доступности целлюлозы и гемицеллюлозы для дальнейшей обработки. Методы предварительной обработки включают физические (измельчение), химические (кислотная или щелочная обработка) и биологические (ферментная обработка);

- целлюлоза и гемицеллюлоза гидролизуются до сахаров (глюкозы, ксилозы, арабинозы) с помощью ферментов (целлюлазы, гемицеллюлазы) или кислот;

– сахара ферментируются микроорганизмами (дрожжи, бактерии) с образованием этанола. Проблемой является ферментация ксилозы, для которой требуются специализированные микроорганизмы;

– дистилляция и дегидратация – этанол отделяется и дегидратируется, как и в производстве биоэтанола первого поколения.

Биодизель из лигноцеллюлозной биомассы. Этот процесс менее развит, но включает газификацию биомассы с последующим синтезом Фишера-Тропша для производства синтетического дизельного топлива.

Преимущества биотоплива второго поколения:

– использование непищевого сырья, что снижает конкуренцию с производством продуктов питания,

– более широкая доступность сырья,

– потенциально более значительное снижение выбросов парниковых газов.

Проблемы биотоплива второго поколения:

– более сложные и дорогостоящие технологии производства,

– необходимость разработки эффективных ферментов для гидролиза лигноцеллюлозы,

– необходимость разработки микроорганизмов, способных эффективно ферментировать широкий спектр сахаров.

### 3. Биотопливо третьего поколения (3G).

Биотопливо третьего поколения производится из водорослей. Водоросли обладают высокой скоростью роста и могут выращиваться на неплодородных землях или в морской воде.

– биодизель из водорослей – липиды (жиры) из водорослей экстрагируются и переэтерифицируются в биодизель;

– биоэтанол из водорослей – углеводы из водорослей ферментируются в этанол;

– биоводород из водорослей – некоторые виды водорослей способны производить водород под воздействием солнечного света.

Процесс производства (биодизель из водорослей):

- выращивание водорослей – водоросли выращиваются в открытых прудах или закрытых фотобиореакторах. Закрытые системы обеспечивают лучший контроль над условиями выращивания и предотвращают загрязнение, но они более дорогие;

- сбор биомассы – водоросли собираются с помощью различных методов, таких как флотация, фильтрация или центрифугирование;

- разрушение клеток – клеточные стенки водорослей разрушаются для облегчения извлечения липидов. Методы разрушения клеток включают механическое измельчение, химическую обработку и ферментный гидролиз;

- экстракция липидов – липиды экстрагируются из биомассы водорослей с использованием органических растворителей (гексан, хлороформ) или альтернативных методов, таких как сверхкритическая флюидная экстракция с использованием  $\text{CO}_2$ ;

- переэтерификация – липиды переэтерифицируются в биодизель, как и в производстве биодизеля первого поколения.

Преимущества биотоплива третьего поколения:

- высокая продуктивность на единицу площади,
- не требуется сельскохозяйственная земля или пресная вода,
- потенциально более значительное снижение выбросов парниковых газов,
- возможность утилизации  $\text{CO}_2$  при выращивании водорослей.

Проблемы биотоплива третьего поколения:

- высокие затраты на выращивание и сбор водорослей,
- необходимость разработки эффективных методов экстракции липидов,
- необходимость снижения стоимости производства.

#### 4. Биотопливо четвертого поколения (4G).

Биотопливо четвертого поколения включает в себя более продвинутые технологии, такие как:

- «электротопливо» – использование электроэнергии из возобновляемых источников для превращения  $\text{CO}_2$  в жидкое топливо с помощью электрохимических процессов или синтеза Фишера-Тропша;
- генетически модифицированные микроорганизмы – разработка микроорганизмов, которые более эффективно производят биотопливо или улавливают  $\text{CO}_2$ ;
- «углеродно-отрицательное» топливо – биотопливо, производство которого приводит к удалению большего количества  $\text{CO}_2$  из атмосферы, чем выбрасывается при его сжигании.

Синтетическое топливо – это жидкое или газообразное топливо, произведенное из различных источников, таких как уголь, природный газ или биомасса, посредством химических процессов.

Уголь в жидкость (CTL). Преобразование угля в жидкое топливо, такое как бензин или дизельное топливо.

Процесс производства:

- газификация – уголь газифицируется с образованием синтез-газа (смеси  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ );
- очистка синтез-газа – синтез-газ очищается от примесей, таких как сера и  $\text{CO}_2$ ;
- синтез Фишера-Тропша – синтез-газ реагирует в присутствии катализатора (обычно железа или кобальта) с образованием смеси углеводородов, которая затем перерабатывается в бензин, дизельное топливо или авиационный керосин.

Газ в жидкость (GTL). Преобразование природного газа в жидкое топливо.

Процесс производства. Аналогичен процессу CTL, начиная с риформинга природного газа для производства синтез-газа, его очистки и последующего синтеза Фишера-Тропша.

Биомасса в жидкость (BTL). Преобразование биомассы в жидкое топливо. Этот процесс может включать газификацию биомассы с последующим синтезом Фишера-Тропша или пиролиз биомассы с образованием био-масла, которое затем перерабатывается в топливо.

Преимущества синтетического топлива:

- использование различных источников сырья,
- производство топлива с заданными характеристиками.

Проблемы синтетического топлива:

- высокие капитальные затраты на строительство заводов,
- выбросы  $\text{CO}_2$  при использовании угля или природного газа в качестве сырья (хотя можно улавливать и хранить  $\text{CO}_2$ ),
- энергоемкость процессов.

Водород – это перспективный вид альтернативного топлива, который при сжигании производит только воду.

Производство водорода. Паровой риформинг метана (SMR). Природный газ реагирует с паром при высокой температуре и давлении в присутствии катализатора с образованием водорода и  $\text{CO}_2$ . Это наиболее распространенный, но и наиболее углеродоемкий метод.

Электролиз воды. Вода расщепляется на водород и кислород с помощью электрического тока. Если для электролиза используется электроэнергия из возобновляемых источников, то этот процесс является углеродно-нейтральным (зеленый водород).

Газификация биомассы. Биомасса газифицируется с образованием синтез-газа, из которого затем извлекается водород.

Фотоэлектрохимическое разложение воды: Использование солнечного света и полупроводниковых материалов для разложения воды на водород и кислород.

Биологическое производство водорода. Некоторые микроорганизмы способны производить водород в процессе метаболизма.

Использование водорода:

- топливные элементы – водород реагирует с кислородом в топливном элементе с образованием электричества, воды и тепла;
- двигатели внутреннего сгорания – водород может использоваться в двигателях внутреннего сгорания, но требуется модификация двигателя.

Преимущества водородного топлива:

- нулевые выбросы при сжигании (только вода),
- высокий энергетический потенциал.

Проблемы водородного топлива:

- высокие затраты на производство, хранение и транспортировку водорода;
- необходимость развития инфраструктуры для заправки водородом;
- проблемы безопасности, связанные с хранением и использованием водорода.

Сжатый природный газ (CNG) и Сжиженный природный газ (LNG).

CNG и LNG являются более экологически чистыми альтернативами бензину и дизельному топливу.

CNG – Природный газ, сжатый до высокого давления (200–250 бар).

LNG – Природный газ, охлажденный до температуры  $-162^{\circ}\text{C}$ , при которой он становится жидким.

Преимущества CNG и LNG:

- меньшие выбросы парниковых газов по сравнению с бензином и дизельным топливом;
- более низкая стоимость топлива (в некоторых регионах);
- широко распространенная инфраструктура (для CNG в некоторых регионах).

Проблемы CNG и LNG:

- меньшая дальность пробега по сравнению с бензином и дизельным топливом;

- необходимость модификации автомобилей для использования CNG или LNG;

- выбросы метана (парникового газа) при утечках.

Пропан является побочным продуктом переработки нефти и природного газа.

Преимущества пропана:

- меньшие выбросы парниковых газов по сравнению с бензином и дизельным топливом;

- широко распространенная инфраструктура.

Проблемы пропана:

- меньшая дальность пробега по сравнению с бензином и дизельным топливом;

- зависимость от ископаемого топлива.

### 1.3 RDF-топливо. Основные понятия и классификация

Проблема утилизации отходов является одной из наиболее актуальных экологических и социально-экономических задач современности. Традиционные методы захоронения отходов на полигонах приводят к загрязнению почвы, воды и воздуха, а также к потере ценных ресурсов. В связи с этим, все большее внимание уделяется технологиям переработки отходов с целью извлечения полезных компонентов и получения энергии. Одним из перспективных направлений является производство RDF-топлива (Refuse-Derived Fuel), также известного как топливо из отходов, которое представляет собой горючий продукт, полученный из твердых коммунальных отходов (ТКО).

Основные понятия и определения:

RDF-топливо (Refuse-Derived Fuel) – это твердое топливо, произведенное из твердых коммунальных отходов (ТКО) путем механической обработки и сепарации, в результате чего получается

продукт с повышенной теплотворной способностью и улучшенными характеристиками горения по сравнению с необработанными отходами.

Твердые коммунальные отходы (ТКО) – отходы, образующиеся в жилых домах, общественных зданиях, торговых и офисных помещениях, а также отходы от уборки территорий.

Механическая обработка ТКО – комплекс технологических операций, включающих сортировку, дробление, измельчение, прессование и другие процессы, направленные на выделение горючей фракции из ТКО и улучшение ее характеристик.

Сепарация ТКО – разделение ТКО на различные фракции (органические, неорганические, горючие, негорючие) с использованием различных методов, таких как ручная сортировка, магнитная сепарация, воздушная сепарация и др.

Теплотворная способность – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы или объема топлива. Для RDF-топлива теплотворная способность является важным показателем, определяющим его энергетическую ценность.

Использование RDF-топлива преследует следующие основные цели:

- RDF-топливо позволяет значительно уменьшить количество ТКО, отправляемых на полигоны, что снижает негативное воздействие на окружающую среду;
- RDF-топливо может использоваться в качестве альтернативного источника энергии для производства тепла и электроэнергии, что способствует снижению зависимости от ископаемого топлива;
- использование RDF-топлива позволяет заменить традиционные виды топлива, такие как уголь и газ, тем самым сохраняя природные ресурсы;
- производство и использование RDF-топлива требует создания новых предприятий и рабочих мест в сфере переработки отходов и энергетики;



- использование RDF-топлива в некоторых случаях может приводить к снижению выбросов парниковых газов по сравнению с захоронением отходов на полигонах, особенно при использовании технологий сжигания с улавливанием и утилизацией тепла.

Классификация RDF-топлива критически важна для стандартизации его производства, оптимизации его использования в энергетических установках и обеспечения соответствия экологическим нормам.

Не существует единой, общепризнанной международной системы классификации RDF-топлива. Различные страны и организации разрабатывают собственные стандарты, основанные на локальных потребностях и технологических возможностях. Тем не менее, можно выделить несколько ключевых параметров, которые обычно используются для классификации RDF [9]:

- определение типа отходов, используемых для производства RDF (бытовые, промышленные, коммерческие);
- методы обработки – описание технологий, применяемых для переработки отходов (измельчение, сортировка, сушка, брикетирование);
- размер частиц – определение гранулометрического состава RDF, которое напрямую влияет на его транспортировку, хранение и сжигание;
- определение процентного содержания основных компонентов RDF, таких как бумага, пластик, текстиль, древесина и инертные материалы;
- определение количества энергии, выделяемой при сжигании единицы массы RDF, что является ключевым показателем его энергетической ценности;
- определение процентного содержания влаги в RDF, что влияет на его теплотворную способность и процессы горения;
- определение процентного содержания несгораемых веществ в RDF, что влияет на процессы удаления золы и образование шлака;

- определение концентрации хлора в RDF, что является критическим параметром для оценки коррозионной активности дымовых газов и необходимости применения систем очистки;

- содержание тяжелых металлов – определение концентрации тяжелых металлов в RDF, что важно для оценки экологического воздействия процесса сжигания и захоронения золы;

- форма и плотность – определение формы RDF (фракция, брикеты, пеллеты) и его насыпной плотности, что влияет на процессы транспортировки, хранения и подачи топлива в котел.

Первичная классификация RDF-топлива часто основывается на происхождении отходов, из которых оно произведено. Это позволяет определить потенциальный состав RDF и выбрать наиболее подходящую технологию его переработки.

RDF из бытовых отходов (MSW-RDF). Наиболее распространенный тип RDF, получаемый из твердых бытовых отходов, собираемых в жилых районах. MSW-RDF характеризуется высокой гетерогенностью и переменным составом.

RDF из промышленных отходов (Industrial RDF). RDF, получаемый из промышленных отходов, таких как отходы производства бумаги, пластика, текстиля и т.д. Состав Industrial RDF обычно более однородный, чем MSW-RDF, и может быть адаптирован под конкретные энергетические потребности.

RDF из коммерческих отходов (Commercial RDF). RDF, получаемый из отходов, генерируемых коммерческими предприятиями, такими как супермаркеты, рестораны и офисы. Состав Commercial RDF может варьироваться в зависимости от типа коммерческой деятельности.

Классификация по методам обработки предполагает разделение RDF на различные типы в зависимости от технологического процесса, используемого для его производства. Это позволяет определить степень

обработки отходов и их пригодность для конкретных энергетических установок.

Необработанный RDF. RDF, прошедший минимальную обработку, такую как сортировка и измельчение.

Фракционированный RDF. RDF, прошедший процесс разделения на различные фракции по размеру и составу.

Плотный RDF. RDF, прошедший процесс уплотнения, такой как брикетирование или пеллетирование, для повышения его плотности и удобства транспортировки и хранения.

Размер частиц RDF является важным параметром, влияющим на его горение и эффективность энергетической установки. RDF с мелкими частицами легче воспламеняется и сгорает более полно, но может приводить к образованию пыли и засорению оборудования. RDF с крупными частицами горит медленнее, но требует более мощного оборудования для его подачи и сжигания.

Классификация по размеру частиц может включать следующие категории:

- мелкий RDF (fine RDF): размер частиц менее 20 мм;
- средний RDF (medium RDF): размер частиц от 20 мм до 80 мм;
- крупный RDF (coarse RDF): размер частиц более 80 мм.

Классификация по составу является более сложной задачей, так как требует определения процентного содержания различных компонентов RDF. Однако, определение содержания основных компонентов позволяет оценить его теплотворную способность, зольность и потенциальное экологическое воздействие.

Обычно рассматриваются следующие компоненты:

- бумага и картон – целлюлозные материалы, обладающие высокой теплотворной способностью, но требующие контроля образования выбросов CO<sub>2</sub>;

– пластик – полимерные материалы, обладающие высокой теплотворной способностью, но требующие контроля образования выбросов диоксинов и фуранов;

– текстиль – волокнистые материалы, обладающие переменной теплотворной способностью и требующие контроля образования выбросов  $\text{NO}_x$ ;

– древесина – природный полимер, обладающий высокой теплотворной способностью и не содержащий вредных веществ;

– инертные материалы – стекло, металл, камни и другие несгораемые материалы, снижающие теплотворную способность RDF и увеличивающие зольность.

Нежелательными компонентами в RDF являются:

– металлы – могут вызывать коррозию оборудования и загрязнять золу;

– стекло – не горит и увеличивает зольность топлива;

– пищевые отходы – содержат большое количество влаги и снижают теплотворную способность RDF;

– опасные отходы (батарейки, аккумуляторы, медицинские отходы) – необходимо удалять перед производством RDF из-за рисков загрязнения окружающей среды и здоровья человека.

Теплотворная способность RDF является наиболее важным показателем его энергетической ценности. Она определяется количеством энергии, выделяемой при сжигании единицы массы RDF в калориметре при стандартных условиях. Теплотворная способность RDF зависит от его состава, влажности и зольности.

Классификация по теплотворной способности может включать следующие категории [23]:

– низкая теплотворная способность – менее 10 МДж/кг;

– средняя теплотворная способность – от 10 МДж/кг до 15 МДж/кг;

– высокая теплотворная способность – более 15 МДж/кг.

Влажность RDF оказывает существенное влияние на его теплотворную способность и процессы горения. Высокое содержание влаги снижает теплотворную способность RDF и требует дополнительной энергии для его испарения, что снижает эффективность энергетической установки.

Классификация по влажности может включать следующие категории:

- сухой RDF – влажность менее 15 %;
- умеренно влажный RDF – влажность от 15 % до 30 %;
- влажный RDF – влажность более 30 %.

Зольность RDF определяет количество несгораемых веществ, остающихся после его сжигания. Высокая зольность RDF приводит к образованию большого количества золы и шлака, что увеличивает затраты на их удаление и захоронение.

Классификация по зольности может включать следующие категории:

- низкая зольность – зольность менее 10 %;
- средняя зольность – зольность от 10 % до 20 %;
- высокая зольность – зольность более 20 %.

Содержание хлора в RDF является критическим параметром для оценки коррозионной активности дымовых газов. Хлорсодержащие соединения, образующиеся при сжигании RDF, могут вызывать коррозию металлических конструкций котла и дымовой трубы.

Классификация по содержанию хлора может включать следующие категории:

- низкое содержание хлора – менее 0,5 %;
- среднее содержание хлора – от 0,5 % до 1,0 %;
- высокое содержание хлора – более 1,0%.

Содержание тяжелых металлов в RDF является важным параметром для оценки экологического воздействия процесса сжигания и захоронения

зола. Тяжелые металлы могут накапливаться в почве и воде, представляя опасность для окружающей среды и здоровья человека.

Классификация по содержанию тяжелых металлов обычно основывается на предельно допустимых концентрациях, установленных в национальных и международных стандартах.

#### 1.4 Технологические процессы производства RDF-топлива

Производство RDF-топлива представляет собой комплексный технологический процесс, включающий сортировку, измельчение, сушку, компактирование и другие операции, направленные на получение однородного и высококалорийного продукта.

##### 1. Предварительная обработка и сортировка отходов.

Первый и наиболее важный этап – предварительная обработка и сортировка входящих отходов. Цель этого этапа – удалить из потока ТБО материалы, которые не подходят для производства RDF-топлива, а также извлечь ценные ресурсы для дальнейшей переработки. Этот этап включает в себя следующие процессы:

Прием и подача отходов. Отходы поступают на предприятие и выгружаются в приемный бункер. Затем с помощью конвейерных систем отходы подаются на дальнейшую обработку.

Первичная сортировка. На этом этапе удаляются крупногабаритные отходы, такие как мебель, строительный мусор, а также опасные отходы, такие как батарейки, лампы, и медицинские отходы. Используются ручные или автоматизированные системы сортировки.

Механическая сортировка. Используется для отделения различных фракций отходов. Широко применяются следующие методы:

Грохочение. Процесс разделения отходов по размеру с использованием вращающихся барабанов или вибрирующих сит. Позволяет отделить мелкие органические отходы от крупных фракций.

Магнитная сепарация. Используется для извлечения черных металлов (железа, стали) из потока отходов с помощью магнитных сепараторов.

Вихретоковая сепарация. Применяется для извлечения цветных металлов (алюминия, меди) из отходов. Основана на создании вихревых токов в проводящих материалах.

Воздушная сепарация. Используется для разделения легких и тяжелых фракций отходов. Легкие материалы (пленка, бумага) выдуваются потоком воздуха, а тяжелые (стекло, камни) оседают.

Оптическая сортировка. Применяется для автоматического разделения отходов по материалу и цвету с помощью камер и датчиков, распознающих различные типы материалов. Оптические сортировщики способны отделять различные виды пластика, бумаги и других материалов с высокой точностью.

Ручная сортировка. Несмотря на автоматизацию, ручная сортировка все еще необходима для окончательной очистки потока отходов от нежелательных материалов и для повышения качества RDF-топлива.

## 2. Измельчение и гомогенизация.

После сортировки отходы, предназначенные для производства RDF-топлива, подвергаются измельчению. Этот процесс позволяет уменьшить размер частиц и повысить однородность материала, что необходимо для эффективной дальнейшей обработки и сжигания.

Для измельчения отходов используются различные типы дробилок и шредеров, включая:

Молотковые дробилки. Используют вращающиеся молотки для измельчения отходов. Подходят для обработки широкого спектра материалов.

Роторные дробилки. Используют вращающиеся роторы с ножами для измельчения отходов. Обеспечивают более равномерное измельчение, чем молотковые дробилки.

Шредеры. Используют вращающиеся валы с ножами для грубого измельчения отходов. Шредеры предназначены для предварительной обработки крупногабаритных отходов.

Гомогенизация. После измельчения отходы смешиваются для достижения однородного состава. Это позволяет стабилизировать калорийность и другие характеристики RDF-топлива. Используются смесители различного типа.

### 3. Сушка.

Сушка является важным этапом в производстве RDF-топлива, так как влажность отходов существенно влияет на их калорийность и эффективность сжигания. Снижение влажности увеличивает теплотворную способность топлива и уменьшает выбросы вредных веществ при сжигании.

Механическая сушка. Использует механические методы для удаления влаги из отходов.

Прессование. Отходы сжимаются под высоким давлением для удаления воды.

Центрифугирование. Отходы вращаются с высокой скоростью, что позволяет отделить воду от твердых частиц.

Термическая сушка. Использует тепло для испарения влаги из отходов. Наиболее распространенные методы:

Сушка горячим воздухом. Отходы продуваются горячим воздухом. Простой и эффективный метод, но требует больших затрат энергии.

Барабанная сушка. Отходы вращаются в барабане, нагреваемом горячим воздухом или паром.

Ленточная сушка. Отходы перемещаются по ленте, обдуваемой горячим воздухом.

Использование отходящего тепла. В целях повышения энергоэффективности на многих предприятиях используется отходящее



тепло от других процессов (например, от сжигания RDF-топлива) для сушки отходов.

#### 4. Сепарация и обогащение.

На данном этапе происходит дополнительное разделение отходов для повышения качества RDF-топлива. Цель – удалить материалы, которые могут снизить калорийность или увеличить выбросы при сжигании.

Удаление инертных материалов. Используются методы сепарации для удаления стекла, камней, металла и других инертных материалов. Применяются грохочение, воздушная сепарация и другие методы.

Обогащение топливной фракции. На этом этапе увеличивается концентрация горючих материалов в RDF-топливе. Например, могут использоваться методы флотации для отделения пластика и бумаги от других материалов.

#### 5. Компактирование и гранулирование.

Для удобства транспортировки, хранения и сжигания RDF-топливо подвергается компактированию или гранулированию. Этот процесс позволяет увеличить плотность топлива и уменьшить его объем.

Компактирование. Отходы сжимаются под высоким давлением в брикеты или тюки. Простой и недорогой метод.

Гранулирование. Отходы продавливаются через матрицу с отверстиями, формируя гранулы. Гранулированное RDF-топливо имеет более однородный размер и форму, что облегчает его сжигание. Используются грануляторы различного типа, включая матричные и ленточные грануляторы.

Изготовление RDF-паллет. Альтернативный метод, при котором отходы формируются в паллеты, что упрощает их транспортировку и хранение.

## 6. Контроль качества.

На заключительном этапе производится контроль качества RDF-топлива. Проверяются следующие параметры:

- калорийность – определяется теплотворная способность топлива;
- влажность – измеряется содержание влаги в топливе;
- зольность – определяется содержание негорючих остатков после сжигания;
- содержание хлора и других вредных веществ – контролируется содержание хлора, серы и других веществ, которые могут привести к выбросам вредных веществ при сжигании;
- размер частиц – определяется гранулометрический состав топлива.

## 7. Хранение и транспортировка.

Готовое RDF-топливо хранится в специальных складах, оборудованных системами пожаротушения. Транспортировка осуществляется автомобильным, железнодорожным или водным транспортом. Важно обеспечить герметичность упаковки, чтобы предотвратить увлажнение топлива и потери материала.

Преимущества производства RDF-топлива:

- сокращение объема отходов, направляемых на захоронение – RDF-топливо позволяет использовать неперерабатываемые отходы в качестве источника энергии, снижая нагрузку на полигоны;
- RDF-топливо может использоваться для производства электроэнергии и тепла на специализированных мусоросжигательных заводах или в цементной промышленности;
- снижение зависимости от ископаемого топлива – RDF-топливо является альтернативным источником энергии, который может заменить часть ископаемого топлива;
- сокращение выбросов парниковых газов – при сжигании RDF-топлива образуется меньше парниковых газов, чем при захоронении отходов на полигонах;

- производство RDF-топлива требует создания новых рабочих мест в сфере переработки отходов и энергетики.

### 1.5 Применение в энергетике

RDF-топливо может использоваться в энергетике различными способами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Прямое сжигание (Direct Combustion). RDF сжигается непосредственно в котлах для производства пара, который затем используется для генерации электроэнергии и/или тепла. Этот метод является наиболее распространенным и экономически эффективным.

Преимущества: относительно низкие капитальные затраты, простота технологии, возможность утилизации больших объемов RDF.

Недостатки: высокий уровень выбросов загрязняющих веществ, необходимость в эффективной системе очистки дымовых газов, более низкий КПД по сравнению с другими технологиями.

Совместное сжигание (Co-Combustion). RDF сжигается совместно с другими видами топлива, такими как уголь, биомасса или природный газ, в существующих энергетических установках. Этот метод позволяет снизить зависимость от ископаемого топлива и сократить выбросы CO<sub>2</sub>.

Преимущества: низкие капитальные затраты (использование существующей инфраструктуры), возможность постепенного перехода на возобновляемые источники энергии, снижение выбросов CO<sub>2</sub>.

Недостатки: необходимость в модификации существующего оборудования, ограничения по содержанию RDF в топливной смеси, возможные проблемы с коррозией и образованием отложений.

Газификация (Gasification). RDF подвергается термической обработке при высоких температурах в условиях недостатка кислорода, в результате чего образуется синтез-газ (смесь CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>). Синтез-газ может быть использован для производства электроэнергии, тепла или синтетического топлива.

Преимущества: более высокая эффективность по сравнению с прямым сжиганием, меньший объем выбросов загрязняющих веществ, возможность производства различных видов энергии и топлива.

Недостатки: более высокие капитальные затраты, сложность технологии, необходимость в очистке синтез-газа.

Пиролиз (Pyrolysis). RDF подвергается термическому разложению при высоких температурах в отсутствие кислорода. В результате образуются жидкие продукты (пиролизное масло), твердый остаток (уголь) и газ. Пиролизное масло может быть использовано в качестве топлива или сырья для химической промышленности.

Преимущества: возможность производства жидкого топлива, меньший объем выбросов загрязняющих веществ, возможность переработки сложных отходов.

Недостатки: высокие капитальные затраты, сложность технологии, необходимость в переработке пиролизного масла.

Плазменная газификация (Plasma Gasification). Использует плазменную дугу для разложения RDF на элементарные составляющие (синтез-газ и шлак). Эта технология позволяет перерабатывать даже сложные и опасные отходы.

Преимущества: высокая эффективность, возможность переработки широкого спектра отходов, минимальный объем выбросов загрязняющих веществ, получение инертного шлака.

Недостатки: очень высокие капитальные затраты, высокое энергопотребление, сложность технологии.

Преимущества использования RDF-топлива:

– уменьшение объема отходов на полигонах – RDF перерабатывает отходы, которые в противном случае были бы захоронены на свалках. Это снижает нагрузку на полигоны, продлевает срок их службы и уменьшает необходимость в новых площадках. Уменьшает выделение метана (парникового газа) из разлагающихся отходов на свалках;

– энергетическая эффективность и возобновляемость. RDF – источник энергии, который может заменить ископаемое топливо, способствуя снижению выбросов парниковых газов;

– является возобновляемым источником энергии, так как основой для его производства служат отходы;

– высокая теплотворная способность (по сравнению с необработанными отходами), что делает его эффективным топливом для производства энергии;

– использование RDF позволяет диверсифицировать источники энергии, уменьшая зависимость от ограниченных запасов ископаемого топлива (угля, нефти, газа). Стабилизирует энергетические цены, особенно в условиях волатильности цен на традиционное топливо.

Экономические преимущества:

– может быть дешевле, чем традиционные виды топлива, особенно в регионах с ограниченным доступом к ископаемому топливу;

– создает рабочие места в процессе сбора, сортировки, переработки и использования отходов;

– уменьшает затраты на утилизацию отходов, так как часть отходов используется для производства топлива.

Улучшение экологической обстановки:

– снижает загрязнение окружающей среды, связанное с добычей, транспортировкой и сжиганием ископаемого топлива;

– уменьшает загрязнение почвы и воды, связанное с захоронением отходов на полигонах;

– способствует циклической экономике, преобразуя отходы в ресурс.

Недостатки использования RDF-топлива.

Загрязнение окружающей среды:

– при сжигании RDF образуются выбросы загрязняющих веществ, таких как оксиды азота, серы, тяжелые металлы, диоксины и фураны;

- выбросы могут загрязнять атмосферу и влиять на здоровье людей.

Необходимы эффективные системы очистки выбросов.

Сложность и стоимость производства:

- процесс производства RDF требует сортировки отходов, измельчения, сушки и гранулирования, что требует значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов;
- качество RDF зависит от состава исходных отходов, что может требовать сложных процессов сортировки и контроля.

Возможные негативные последствия для здоровья:

- некачественное RDF может содержать вредные вещества, которые при сжигании выделяют токсичные соединения;
- необходимо обеспечить надежную фильтрацию выбросов, чтобы минимизировать воздействие на здоровье человека.

Качество RDF зависит от состава исходных отходов. Некоторые отходы, такие как опасные отходы, требуют специальной обработки, прежде чем их можно будет использовать для производства RDF.

Неоднородность состава отходов может привести к нестабильности процесса сжигания и снижению эффективности топлива.

Строительство мусоросжигательных заводов, использующих RDF, часто встречает сопротивление со стороны общественности, опасющейся загрязнения окружающей среды и воздействия на здоровье.

Важно обеспечивать прозрачность и информирование населения о процессах производства и использования RDF.

RDF может быть трудно хранить из-за его воспламеняемости и способности к самовозгоранию.

Транспортировка RDF может быть дорогостоящей и требовать специальных условий.

## 1.6 Экологические аспекты

Выбросы углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) оказывают значительное и многогранное воздействие на окружающую среду, являясь основной причиной глобального изменения климата. Вот основные последствия:

### 1. Глобальное потепление.

$\text{CO}_2$  является парниковым газом. Это значит, что он пропускает солнечную радиацию, но поглощает и переизлучает инфракрасное (тепловое) излучение, исходящее от Земли. Это приводит к задержке тепла в атмосфере и повышению средней температуры планеты.

Последствия.

Повышение температуры воздуха и океана. Ведет к аномальной жаре, увеличению частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений.

Таяние ледников и полярных льдов. Способствует повышению уровня моря, угрожая прибрежным городам и экосистемам.

Изменение погодных условий нарушает устоявшиеся паттерны осадков, приводя к засухам в одних регионах и наводнениям в других.

Увеличение частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений. Ураганы, засухи, наводнения, лесные пожары становятся более частыми и разрушительными.

### 2. Подкисление океана.

Океаны поглощают значительную часть атмосферного  $\text{CO}_2$ . Когда  $\text{CO}_2$  растворяется в морской воде, он реагирует с водой, образуя угольную кислоту. Это снижает pH океана, делая его более кислым.

Последствия.

Угроза морской жизни. Подкисление океана затрудняет строительство раковин и скелетов морскими организмами, такими как кораллы, моллюски и планктон. Это разрушает морские экосистемы и ставит под угрозу пищевые цепи.

Разрушение коралловых рифов. Кораллы особенно чувствительны к подкислению, что приводит к обесцвечиванию и гибели рифов.

Нарушение пищевых цепей. Подкисление влияет на фитопланктон, основу морской пищевой цепи, что может иметь каскадные последствия для всей экосистемы.

### 3. Воздействие на экосистемы.

Повышение температуры и изменение осадков заставляют многие виды перемещаться в поисках более подходящих условий обитания. Это может приводить к нарушению существующих экосистем и конкуренции между видами.

Вымирание видов. Виды, неспособные адаптироваться к быстро меняющимся условиям, могут оказаться на грани вымирания.

Увеличение распространения вредителей и болезней: Изменение климата может способствовать распространению вредителей и болезней, поражающих растения и животных.

Лесные пожары. Более высокие температуры и засухи увеличивают риск и интенсивность лесных пожаров, которые разрушают экосистемы и выбрасывают в атмосферу огромное количество CO<sub>2</sub>.

### 4. Воздействие на сельское хозяйство.

Изменение урожайности. Изменение климата может приводить к снижению урожайности сельскохозяйственных культур из-за засух, наводнений, экстремальных температур и увеличения распространения вредителей.

Необходимость адаптации. Сельскохозяйственным производителям приходится адаптироваться к меняющимся условиям, внедряя новые методы ведения сельского хозяйства, устойчивые к изменению климата.

Проблемы с продовольственной безопасностью: Снижение урожайности может приводить к проблемам с продовольственной безопасностью и росту цен на продукты питания.



## 5. Воздействие на здоровье человека.

Волны жары. Увеличение частоты и интенсивности волн жары приводит к увеличению смертности, особенно среди пожилых людей и людей с хроническими заболеваниями.

Распространение инфекционных заболеваний. Изменение климата может способствовать распространению инфекционных заболеваний, таких как малярия, лихорадка денге и холера.

Загрязнение воздуха. Лесные пожары и увеличение концентрации озона в приземном слое атмосферы, связанные с изменением климата, ухудшают качество воздуха и приводят к респираторным заболеваниям.

Нехватка продовольствия и воды. Изменение климата может приводить к нехватке продовольствия и воды, что увеличивает риск недоедания и болезней, связанных с недостатком воды.

RDF-топливо обладает потенциалом для замещения ископаемого топлива в различных отраслях промышленности, способствуя сокращению выбросов парниковых газов и снижению зависимости от ископаемых ресурсов.

Однако, производство и использование RDF-топлива связаны с рядом экологических аспектов, которые необходимо тщательно изучить и оценить для обеспечения устойчивости и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [8].

Производство RDF-топлива включает в себя несколько этапов, каждый из которых может оказывать воздействие на окружающую среду:

Сбор и сортировка отходов. Исходным сырьем для производства RDF-топлива являются отходы, не пригодные для переработки и повторного использования. Сбор и транспортировка отходов сами по себе связаны с выбросами парниковых газов и загрязняющих веществ, обусловленными использованием транспортных средств. Неэффективная сортировка может привести к попаданию в RDF-топливо опасных отходов, что в свою очередь может создавать проблемы при его использовании

(например, выбросы токсичных веществ, при сжигании). Для снижения негативного воздействия на этом этапе необходимы:

- оптимизация логистики сбора и транспортировки отходов – использование более эффективных транспортных средств, планирование маршрутов для минимизации пробега;

- внедрение эффективных систем сортировки отходов – автоматизированные системы сортировки с использованием оптических датчиков, магнитных сепараторов и других технологий для отделения полезных фракций от отходов, подлежащих дальнейшей переработке в RDF;

- обучение населения – повышение осведомленности о правилах сортировки отходов с целью снижения загрязнения сырья.

Предварительная обработка отходов. На этом этапе отходы измельчаются, высушиваются и из них удаляются крупные нежелательные элементы. В процессе измельчения может образовываться пыль, содержащая вредные вещества, которые могут загрязнять воздух. Высушивание отходов требует потребления энергии, что может приводить к выбросам парниковых газов, если используется энергия из ископаемых источников. Для снижения негативного воздействия на этом этапе необходимы:

- Установка систем пылеудаления. Фильтры, скрубберы и другие системы для очистки воздуха от пыли и вредных веществ;

- Использование энергоэффективного оборудования. Оптимизация процессов сушки, использование возобновляемых источников энергии (солнечные панели, ветряные турбины) для обеспечения энергоснабжения;

- Оптимизация процесса обработки. Минимизация объемов отходов, проходящих через этапы обработки;

- Формирование RDF-топлива. На заключительном этапе подготовленное сырье прессуется в брикеты или гранулы. В процессе прессования может использоваться связующее вещество, которое может

содержать вредные вещества. Для снижения негативного воздействия на этом этапе необходимы:

- выбор связующих веществ с низким содержанием вредных веществ и минимальным влиянием на окружающую среду;
- контроль параметров прессования для обеспечения качества RDF-топлива и минимизации выбросов;
- хранение RDF-топлива требует соблюдения определенных условий для предотвращения самовозгорания, образования неприятных запахов и распространения вредных веществ. Для снижения негативного воздействия на этом этапе необходимы: хранение в сухих и хорошо вентилируемых помещениях. Соблюдение требований пожарной безопасности, регулярный мониторинг состава RDF-топлива для выявления возможных изменений.

Основной областью применения RDF-топлива является энергетика, в частности, цементная промышленность, ТЭЦ и котельные. При сжигании RDF-топлива выделяются различные продукты сгорания, состав которых зависит от состава самого топлива, параметров сжигания и используемого оборудования. Экологическое воздействие использования RDF-топлива включает в себя:

Выбросы парниковых газов. При сжигании RDF-топлива, как и при сжигании любого другого топлива, выделяется углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ). Однако, важно учитывать, что RDF-топливо производится из отходов, в состав которых входит биомасса. В теории,  $\text{CO}_2$ , выделяемый при сжигании биомассы, является частью природного углеродного цикла, и его выброс не увеличивает общее количество  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Фактически, эффект может быть меньше, если RDF содержит ископаемые компоненты. Снижение выбросов парниковых газов достигается за счет замещения ископаемого топлива RDF-топливом. При сравнении с углем, RDF-топливо обычно имеет более низкую теплотворную способность, но может иметь меньшие выбросы  $\text{CO}_2$  на единицу произведенной энергии. Для оценки

экологического эффекта необходимо учитывать жизненный цикл всего процесса, от сбора отходов до сжигания RDF-топлива.

Методы снижения выбросов CO<sub>2</sub>:

- использование RDF-топлива с высоким содержанием биомассы;
- эффективное сжигание для максимального использования топлива;
- улавливание и хранение CO<sub>2</sub> (CCS – Carbon Capture and Storage).

Выбросы загрязняющих веществ. При сжигании RDF-топлива образуются различные загрязняющие вещества, включая оксиды азота (NO<sub>x</sub>), оксиды серы (SO<sub>x</sub>), твердые частицы (PM), тяжелые металлы и диоксины и фураны. Содержание этих веществ зависит от состава RDF-топлива, параметров сжигания (температура, время пребывания газов в зоне горения, избыток воздуха) и наличия систем очистки дымовых газов.

Оксиды азота (NO<sub>x</sub>). Образуются в основном при высоких температурах горения. Влияют на образование смога и кислотных дождей.

Оксиды серы (SO<sub>x</sub>). Образуются из серы, содержащейся в топливе. Влияют на образование кислотных дождей.

Твердые частицы (PM). Могут вызывать проблемы с дыханием и другие заболевания.

Тяжелые металлы. Могут накапливаться в окружающей среде и оказывать токсическое воздействие.

Диоксины и фураны. Образуются при неполном сгорании. Являются высокотоксичными веществами.

Методы снижения выбросов загрязняющих веществ:

Оптимизация процесса горения: контроль температуры, времени пребывания газов в зоне горения и подачи воздуха для обеспечения полного сгорания.

Установка систем очистки дымовых газов.

Скрубберы: для удаления SO<sub>x</sub>.

Селективное некаталитическое восстановление (SNCR) и селективное каталитическое восстановление (SCR): для удаления  $\text{NO}_x$ .

Фильтры твердых частиц (электрофильтры, рукавные фильтры): для удаления РМ.

Адсорбция на активированном угле для удаления диоксинов и фуранов.

Контроль за составом RDF-топлива. Ограничение содержания хлора, серы и тяжелых металлов в сырье.

Образование золы. При сжигании RDF-топлива образуется зола, которая содержит несгоревшие вещества, минералы и тяжелые металлы. Зола должна быть утилизирована безопасным способом.

Методы утилизации золы:

- использование в строительстве в качестве компонента для производства цемента, бетона и других строительных материалов;
- захоронение на специализированных полигонах, при условии соблюдения всех требований экологической безопасности;
- рециклинг – извлечение полезных компонентов из золы.

Для минимизации негативного воздействия RDF-топлива на окружающую среду необходимо применять комплексный подход, включающий в себя следующие технологии и методы:

Оптимизация производства RDF-топлива:

- улучшение процессов сортировки – внедрение автоматизированных систем сортировки с использованием оптических датчиков, магнитных сепараторов и других технологий;
- использование энергоэффективного оборудования – внедрение энергосберегающих технологий на всех этапах производства;
- управление качеством сырья – контроль за составом исходного сырья для минимизации содержания вредных веществ.

Оптимизация процесса горения:

- разработка и внедрение современных технологий сжигания (кипящий слой, газификация, пиролиз);
- контроль параметров горения – поддержание оптимальной температуры, времени пребывания газов в зоне горения и подачи воздуха;
- мониторинг выбросов – установка систем непрерывного мониторинга выбросов для контроля за качеством отходящих газов.

Установка систем очистки дымовых газов:

- скрубберы для удаления  $SO_x$ ,
- SNCR и SCR для удаления  $NO_x$ ,
- фильтры твердых частиц для удаления РМ,
- адсорбция на активированном угле для удаления диоксинов и фуранов,
- выбор оптимальной комбинации технологий – подбор технологий очистки дымовых газов в соответствии с составом RDF-топлива и требованиями к выбросам.

Утилизация золы:

- использование в строительстве – проведение исследований по использованию золы в качестве компонента для производства строительных материалов;
- разработка и внедрение технологий рециклинга золы – извлечение полезных компонентов, таких как металлы;
- обеспечение безопасного захоронения золы – соблюдение всех требований экологической безопасности при захоронении золы на специализированных полигонах.

Оценка жизненного цикла (LCA – Life Cycle Assessment):

- проведение LCA – оценка воздействия RDF-топлива на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла, от сбора отходов до утилизации золы;

- анализ результатов LCA – выявление “узких мест” и областей, требующих улучшения;

- применение результатов LCA – использование результатов LCA для принятия обоснованных решений по улучшению процессов производства и использования RDF-топлива.

Разработка нормативной базы:

- установление стандартов на качество RDF-топлива, включая содержание вредных веществ;

- установление строгих требований к выбросам при сжигании RDF-топлива;

- установление требований к утилизации золы.

Мониторинг и контроль:

- проведение регулярного мониторинга выбросов загрязняющих веществ;

- контроль за соблюдением стандартов на RDF-топливо и требований к выбросам;

- проведение независимой экспертизы для оценки экологической эффективности RDF-топлива.

В целом, RDF-топливо представляет собой перспективный способ утилизации отходов и получения альтернативного топлива. Однако, его использование требует тщательного контроля за всеми этапами производства и использования для минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Для обеспечения устойчивости необходимо внедрение передовых технологий, соблюдение экологических стандартов и активное участие всех заинтересованных сторон.

### 1.7 Экономические характеристики

RDF-топливо приобретает все большее значение в энергетической стратегии многих стран благодаря своим потенциальным экономическим, экологическим и социальным преимуществам. Экономические

характеристики RDF-топлива играют ключевую роль в его привлекательности и успешном внедрении в различные секторы экономики [7].

Стоимость производства RDF-топлива является одним из основных факторов, определяющих его конкурентоспособность на рынке топлива. Она включает в себя различные компоненты, которые необходимо учитывать при расчете конечной цены продукта.

Первым этапом в производстве RDF-топлива является сбор и транспортировка исходного сырья – отходов. Стоимость этого этапа зависит от нескольких факторов:

Удаленность источников отходов от перерабатывающего предприятия существенно влияет на затраты на транспортировку. В сельских районах, где расстояния больше, а инфраструктура менее развита, стоимость транспортировки будет выше, чем в густонаселенных городских районах.

Более крупные объемы отходов позволяют снизить удельную стоимость транспортировки за счет оптимизации маршрутов и использования более вместительных транспортных средств.

Некоторые виды отходов, такие как крупногабаритные отходы, требуют специального оборудования и, следовательно, более высоких затрат на транспортировку.

Наличие развитой дорожной сети и логистической инфраструктуры снижает затраты на транспортировку.

Колебания цен на топливо и оплата труда водителей и грузчиков напрямую влияют на стоимость транспортировки.

Переработка отходов в RDF-топливо включает в себя ряд технологических процессов, каждый из которых влияет на стоимость производства:

Сортировка является критически важным этапом, направленным на отделение пригодных для переработки материалов (металл, пластик,



стекло) от горючих компонентов. Стоимость сортировки зависит от используемой технологии (ручная, автоматизированная), производительности оборудования, сложности исходного сырья и требований к качеству RDF-топлива. Автоматизированные системы сортировки, хотя и требуют больших начальных инвестиций, могут снизить эксплуатационные расходы за счет повышения эффективности и снижения трудозатрат.

Измельчение уменьшает размер отходов, облегчая их дальнейшую обработку и улучшая характеристики топлива. Стоимость зависит от типа используемого оборудования (дробилки, измельчители), производительности и энергопотребления.

Сушка снижает содержание влаги в RDF-топливе, что повышает его теплотворную способность и улучшает характеристики сгорания. Стоимость сушки зависит от используемого метода (конвективная сушка, сушка с использованием тепловой энергии, получаемой от процесса производства), энергозатрат и масштаба производства.

Прессование и гранулирование позволяют получить топливо с более высокой плотностью, улучшенной транспортабельностью и удобством хранения. Стоимость гранулирования включает в себя затраты на оборудование, связующие вещества (при необходимости) и энергопотребление.

Регулярный контроль качества RDF-топлива необходим для обеспечения соответствия стандартам и требованиям потребителей. Стоимость контроля качества включает в себя затраты на лабораторные анализы, оборудование и персонал.

Общая стоимость производства RDF-топлива включает в себя как капитальные затраты, так и эксплуатационные расходы.

Капитальные затраты – это затраты на приобретение земли, строительство завода по переработке отходов, покупку оборудования (сортировочные линии, дробилки, сушилки, грануляторы и т.д.) и транспортных средств.

Капитальные затраты имеют решающее значение, особенно при строительстве нового завода, и оказывают влияние на сроки окупаемости проекта.

Эксплуатационные расходы. Это текущие расходы, включающие в себя:

- затраты на электроэнергию (для работы оборудования),
- затраты на оплату труда персонала,
- затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования,
- затраты на приобретение сырья (если необходимо, например, связующие вещества для гранулирования),
- арендная плата (если применимо),
- страхование,
- налоги и сборы.

На стоимость производства RDF-топлива оказывают влияние различные факторы.

Использование современных технологий, таких как автоматизированные системы сортировки и эффективные сушилки, может снизить эксплуатационные расходы и улучшить качество топлива.

Более крупные заводы могут извлечь выгоду из эффекта масштаба, снижая удельные затраты на производство.

Налоговые льготы, субсидии и требования к обращению с отходами могут существенно повлиять на стоимость производства RDF-топлива.

Наличие других предприятий по переработке отходов в регионе может оказывать влияние на стоимость сырья (отходов) и цену готовой продукции.

Если оборудование приобретается за рубежом или сырье импортируется, колебания валютных курсов могут повлиять на стоимость производства.

Рынок RDF-топлива формируется под влиянием спроса и предложения, а также регулирующих факторов.

Спрос на RDF-топливо определяется в основном следующими факторами:

- наличие и стоимость альтернативных видов топлива – RDF-топливо становится более конкурентоспособным, когда цены на традиционные виды топлива (уголь, газ, мазут) высоки;

- требования к охране окружающей среды – ужесточение экологических норм и правил, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и захоронения отходов, стимулирует спрос на RDF-топливо как альтернативное топливо;

- энергетическая политика государства – государственная поддержка, такая как субсидии, налоговые льготы и инвестиции в переработку отходов, стимулирует спрос на RDF-топливо;

- технологический прогресс – развитие более эффективных и экологически чистых технологий использования RDF-топлива (например, в цементной промышленности, на электростанциях) увеличивает спрос;

- местные условия – наличие крупных потребителей RDF-топлива в регионе (например, цементные заводы, теплоэлектростанции) создает устойчивый спрос.

Предложение RDF-топлива зависит от следующих факторов:

- объем и состав отходов, которые могут быть переработаны в RDF-топливо, напрямую влияют на объем предложения;

- количество и мощность заводов по переработке отходов в RDF-топливо определяют объемы производства;

- стоимость производства влияет на рентабельность производства RDF-топлива, что, в свою очередь, влияет на предложение;

- регулирование обращения с отходами и экологические требования влияют на условия производства и реализации RDF-топлива.

Ценообразование RDF-топлива определяется рыночными силами, но также подвержено влиянию других факторов. Себестоимость производства является основой для определения цены. Производители стремятся

установить цену, которая позволит им покрыть свои затраты и получить прибыль.

Качество RDF-топлива (теплотворная способность, содержание влаги, содержание примесей) влияет на его цену. Более качественное топливо обычно продается по более высокой цене.

Цена на традиционные виды топлива оказывает существенное влияние на цену RDF-топлива. RDF-топливо часто продается со скидкой по сравнению с ценой альтернативных видов топлива, чтобы сделать его конкурентоспособным.

Цена может варьироваться в зависимости от условий поставки, таких как объем поставки, частота поставок и место поставки.

Цена может быть согласована в рамках долгосрочных контрактов между производителем и потребителем, что обеспечивает стабильность поставок и цен.

Государственное регулирование, такое как налоги, субсидии и экологические сборы, может влиять на цену RDF-топлива.

Рынок RDF-топлива постоянно развивается. Основные тенденции включают в себя:

По мере ужесточения экологических норм и роста цен на традиционные виды топлива спрос на RDF-топливо продолжает расти.

Развитие технологий переработки отходов приводит к улучшению качества RDF-топлива, повышая его привлекательность для потребителей.

RDF-топливо все чаще используется в различных отраслях, таких как цементная промышленность, теплоэнергетика и производство электроэнергии.

Развитие рынка RDF-топлива различно в разных регионах в зависимости от уровня экономического развития, экологического регулирования и наличия инфраструктуры.

Растет понимание экологических преимуществ RDF-топлива, таких как сокращение захоронения отходов и выбросов парниковых газов, что способствует его продвижению.

Экономические преимущества использования RDF-топлива.

Использование RDF-топлива предлагает ряд экономических преимуществ, которые делают его привлекательным для различных заинтересованных сторон.

Сокращение объема захоронения. Переработка отходов в RDF-топливо значительно уменьшает объем отходов, направляемых на полигоны. Это снижает затраты на захоронение, включая оплату сборов за захоронение, транспортные расходы и затраты на обслуживание полигонов.

Сокращение объема отходов продлевает срок службы существующих полигонов, откладывая необходимость строительства новых и дорогостоящих полигонов.

Снижение объемов захоронения отходов уменьшает риски загрязнения окружающей среды, связанные с полигонами, такие как выбросы метана и загрязнение грунтовых вод.

Снижение зависимости от традиционных видов топлива.

RDF-топливо может быть использовано в качестве альтернативы традиционным видам топлива (уголь, газ, мазут), особенно в цементной промышленности и на электростанциях. Использование RDF-топлива позволяет снизить затраты на топливо, особенно когда цены на традиционные виды топлива высоки.

Цены на RDF-топливо могут быть более стабильными по сравнению с ценами на традиционные виды топлива, которые подвержены волатильности на мировых рынках.

Использование RDF-топлива способствует диверсификации источников энергии, снижая зависимость от одного или нескольких видов топлива и повышая энергетическую безопасность.

Производство и использование RDF-топлива создает новые рабочие места в перерабатывающей промышленности, логистике, энергетике и сфере обслуживания.

Развитие отрасли RDF-топлива привлекает инвестиции в строительство новых заводов, модернизацию существующей инфраструктуры и разработку новых технологий.

Развитие отрасли RDF-топлива оказывает положительное воздействие на экономику в целом, стимулируя развитие смежных отраслей, таких как транспорт, машиностроение и строительная индустрия.

Дополнительные доходы для муниципалитетов и предприятий:

Производство и продажа RDF-топлива может стать источником дополнительных доходов для муниципалитетов и предприятий по переработке отходов.

Переработка отходов в RDF-топливо может быть прибыльным бизнесом, особенно при эффективном управлении затратами и наличии устойчивого спроса на рынке.

Производство RDF-топлива может помочь муниципалитетам снизить общие затраты на управление отходами, включая затраты на сбор, транспортировку и захоронение отходов.

Экономическая эффективность проектов по производству RDF-топлива является ключевым фактором для принятия инвестиционных решений. Оценка экономической эффективности включает в себя анализ следующих показателей:

1. Чистая приведенная стоимость (NPV).

NPV – это разница между приведенной стоимостью денежных притоков и приведенной стоимостью денежных оттоков за весь срок реализации проекта.

Расчет NPV рассчитывается путем дисконтирования будущих денежных потоков по определенной ставке дисконтирования, которая отражает стоимость капитала и риски проекта.

Положительное значение NPV указывает на то, что проект является экономически эффективным и прибыльным. Более высокое значение NPV указывает на более привлекательный проект.

## 2. Внутренняя норма доходности (IRR).

IRR – это ставка дисконтирования, при которой NPV проекта равна нулю.

Расчет IRR рассчитывается путем итеративного процесса, который находит ставку дисконтирования, при которой NPV равна нулю.

IRR показывает ожидаемую доходность проекта. Если IRR превышает минимальную приемлемую норму доходности (например, стоимость капитала), проект считается экономически эффективным.

## 3. Срок окупаемости (Payback period).

Срок окупаемости – это период времени, необходимый для того, чтобы проект окупил первоначальные инвестиции.

Расчет срока окупаемости рассчитывается путем определения периода, в течение которого кумулятивные денежные потоки становятся положительными.

Более короткий срок окупаемости указывает на более привлекательный проект, так как инвестиции окупаются быстрее.

## 4. Анализ чувствительности.

Анализ чувствительности оценивает, как изменения ключевых параметров проекта (например, цены на RDF-топливо, стоимость сырья, эксплуатационные расходы) влияют на его экономическую эффективность.

Методика анализа чувствительности обычно включает в себя моделирование различных сценариев, в которых изменяются отдельные параметры, а затем оценивается влияние этих изменений на NPV, IRR и другие показатели.

Анализ чувствительности помогает выявить критические факторы, которые оказывают наибольшее влияние на экономическую эффективность проекта, и оценить риски.

## 5. Учет рисков.

Оценка рисков. При оценке экономической эффективности проектов по производству RDF-топлива необходимо учитывать различные риски, такие как риски, связанные с волатильностью цен на сырье и топливо, технологические риски, риски, связанные с изменением законодательства и экологическими нормами, а также риски, связанные с конкуренцией на рынке.

Стратегии управления рисками. Для снижения рисков могут быть использованы различные стратегии, такие как диверсификация источников сырья, заключение долгосрочных контрактов, страхование, резервирование средств и разработка планов реагирования на непредвиденные обстоятельства.

Экономическая эффективность RDF-топлива зависит от множества факторов, которые необходимо учитывать при планировании и реализации проектов.

Выбор подходящей технологии переработки отходов в RDF-топливо является критически важным фактором. Необходимо учитывать производительность, эффективность, энергопотребление, стоимость оборудования, сложность обслуживания и соответствие требованиям к качеству RDF-топлива.

Оптимизация процессов переработки отходов, включая сортировку, измельчение, сушку и гранулирование, может повысить эффективность производства и снизить затраты.

Качество RDF-топлива (теплотворная способность, содержание влаги, содержание примесей) влияет на его цену и спрос. Обеспечение высокого качества топлива является важным фактором для достижения экономической эффективности.

Стоимость сырья (отходов), используемого для производства RDF-топлива, является значительным фактором, влияющим на себестоимость



продукции. Необходимо обеспечить стабильные поставки сырья по конкурентоспособным ценам.

Цена RDF-топлива должна быть конкурентоспособной по отношению к альтернативным видам топлива. Необходимо учитывать рыночный спрос, цену альтернативных видов топлива и затраты на производство.

Масштаб производства влияет на удельные затраты на производство. Более крупные заводы могут извлечь выгоду из эффекта масштаба, снижая удельные затраты.

Эффективное управление затратами на всех этапах производства, включая затраты на энергию, трудозатраты, техническое обслуживание и ремонт, является важным фактором для обеспечения экономической эффективности.

Получение доступного финансирования для реализации проекта является важным фактором для обеспечения его экономической эффективности.

Соответствие экологическим требованиям. Необходимо обеспечить соответствие всем экологическим требованиям, включая требования к выбросам, захоронению отходов и обращению с отходами. Несоблюдение экологических требований может привести к штрафам и другим санкциям, что негативно повлияет на экономическую эффективность.

Использование RDF-топлива позволяет сократить выбросы парниковых газов и других загрязняющих веществ по сравнению с традиционными видами топлива. Это может привести к получению дополнительных выгод, таких как продажа квот на выбросы или участие в программах по сокращению выбросов.

Использование RDF-топлива способствует сокращению захоронения отходов, что снижает негативное воздействие на окружающую среду и продлевает срок службы полигонов.

Государственная поддержка, такая как субсидии, налоговые льготы и инвестиции в переработку отходов, может значительно повысить экономическую эффективность проектов по производству RDF-топлива.

Законодательство об отходах, включая требования к сортировке, переработке и захоронению отходов, оказывает влияние на стоимость сырья (отходов) и условия производства и реализации RDF-топлива.

Экологические нормы, такие как требования к выбросам, оказывают влияние на выбор технологий и затраты на эксплуатацию.

Наличие стандартов качества для RDF-топлива обеспечивает его соответствие требованиям потребителей и повышает его конкурентоспособность на рынке.

RDF-топливо имеет значительный потенциал для дальнейшего развития, однако его широкое внедрение сталкивается с определенными вызовами.

Ожидается, что спрос на RDF-топливо будет расти в связи с ужесточением экологических норм, ростом цен на традиционные виды топлива и государственной поддержкой.

Развитие новых технологий переработки отходов и улучшения характеристик RDF-топлива будет способствовать повышению его эффективности и привлекательности.

RDF-топливо будет находить новые рынки сбыта, включая цементную промышленность, теплоэнергетику, производство электроэнергии и другие отрасли.

Ожидается увеличение инвестиций в проекты по производству и использованию RDF-топлива, что будет способствовать развитию отрасли.

RDF-топливо способствует созданию рабочих мест, снижению загрязнения окружающей среды и улучшению качества жизни.

Высокая стоимость производства RDF-топлива, особенно на начальном этапе, может быть препятствием для развития отрасли.

Необходимо совершенствование законодательства в области обращения с отходами и энергетической политики для стимулирования развития отрасли RDF-топлива.

Требуются значительные инвестиции в строительство новых заводов, модернизацию существующей инфраструктуры и разработку новых технологий.

Возможно сопротивление общественности из-за опасений по поводу загрязнения окружающей среды и негативного воздействия на здоровье.

Конкуренция. RDF-топливо сталкивается с конкуренцией со стороны традиционных видов топлива и других альтернативных видов топлива.

Качество исходного сырья (отходов) может варьироваться, что может влиять на качество RDF-топлива и эффективность его использования.

## 1.8 Практические примеры

RDF-топливо используется в качестве альтернативного топлива в различных сферах:

1. Цементные заводы. RDF-топливо используется для частичной или полной замены ископаемого топлива в печах для обжига цемента. Это один из наиболее распространенных способов применения RDF-топлива.

Летом 2015 г. на заводе «ЛафаржХолсим» в п. Ферзиково Калужской области был введен в эксплуатацию цех альтернативного топлива (АТ), позволяющий утилизировать различные виды отходов экологичным и безопасным способом. Сегодня компания является единственным производителем цемента в России, использующим остатки сортировки твердых коммунальных отходов в качестве возобновляемого источника энергии.

Утилизация отходов в процессе производства цемента признана наилучшей доступной технологией в России и Европе и, на сегодняшний день, является одной из самых эффективных технологий энергетической

утилизации. Температура в печи для производства цемента доходит до 2000 °С, что обеспечивает безопасное разрушение органики. Благодаря строгому входному контролю, использование веществ, которые могут нанести вред окружающей среде и человеку, заведомо исключено. Применение альтернативного топлива (co-processing) экономит огромные запасы газа и угля, а также позволяет сокращать выбросы CO<sub>2</sub>. А на выходе не остаётся зольного остатка, а только безопасный продукт.

«В процессе утилизации отходов возникает тепловая энергия, которая в настоящее время используется на цементных заводах в России исключительно для производства клинкера – полупродукта для производства цемента. Однако существует технологическая возможность направлять энергию и на другие цели по примеру наших европейских коллег», – говорит Максим Гончаров, Генеральный директор ЛафаржХолсим Россия [17].

Лицензия компании «ЛафаржХолсим» позволяет использовать 14 различных видов отходов, включая остатки сортировки ТКО при совместном сборе, отходы изделий из древесины, отработанные шины и т.д. Технологически цементные заводы способны утилизировать и другие виды отходов производства и потребления, включая резину, полимеры, нефтесодержащие, строительные и другие отходы III-V классов опасности.

Технология утилизации отходов на цементных предприятиях признана и Министерством промышленности и торговли РФ, и «Российским экологическим оператором». Один цементный завод в среднем способен утилизировать от 80 000 тонн до 250 000 тонн разных видов отходов ежегодно. И такие заводы есть, практически, в каждом регионе страны.

За 5 лет работы завод в п. Ферзиково утилизировал 132 тысячи тонн сортированных отходов. Для того, чтобы понять много это или мало, представьте себе вереницу из 11 000 мусоровозов, направляющихся на полигон. Максимальный объем замещения природного газа

альтернативным топливом был отмечен в мае 2019 г. и составил около 15 %. В рамках суточных показателей объем замещения нередко доходил до 25 %. Рекордный объем подачи отходов составил 6100 т и был зафиксирован в июле 2019 г.

Завод ЛафаржХолсим в Калужской области является флагманским предприятием российской цементной индустрии по опыту утилизации отходов. Инвестиции в строительство одного из самых современных цементных заводов России составили 500 млн евро, в строительство цеха альтернативного топлива – 240 млн рублей. За 5 лет работы его посетили для обмена опытом сотни экологов, журналистов, чиновников и коллег с других заводов [17].

2. Электростанции. RDF-топливо сжигается в котлах для производства пара, который используется для выработки электроэнергии.

Электростанция Spittelau в Вене, Австрия. Эта электростанция сжигает отходы, в том числе RDF-топливо, для производства электроэнергии и тепла для города. Она оснащена современными системами очистки выбросов, которые обеспечивают соответствие строгим экологическим нормам. Станция является примером эффективной интеграции RDF-топлива в систему городского энергоснабжения.

3. Системы централизованного теплоснабжения (ТЭЦ). RDF-топливо используется для производства тепла и электроэнергии для отопления жилых и коммерческих зданий.

Система централизованного теплоснабжения города Копенгаген, Дания. В Копенгагене RDF-топливо используется для производства тепла и электроэнергии для отопления жилых и коммерческих зданий. Это позволяет сократить зависимость города от ископаемого топлива и снизить выбросы парниковых газов. Использование RDF-топлива является частью комплексной стратегии города по переходу к устойчивой энергетике.

4. Промышленные предприятия. Некоторые промышленные предприятия используют RDF-топливо для производства тепла и пара для

собственных нужд. Примерами могут быть предприятия, занимающиеся производством бумаги, текстиля или продуктов питания.

5. Газификация и пиролиз. RDF-топливо может быть переработано в синтез-газ (сингаз) или био-масло посредством газификации и пиролиза. Сингаз может быть использован для производства электроэнергии или других химических продуктов.

#### Выводы по первой главе

В ходе исследования исторического аспекта было установлено, что интерес к альтернативному топливу обусловлен в первую очередь необходимостью диверсификации энергетических ресурсов, снижения зависимости от традиционных углеводородов и смягчения негативного воздействия на окружающую среду. Первые попытки использования альтернативного топлива связаны с развитием сельского хозяйства и использованием биомассы, однако значительный импульс развитию данной отрасли придала необходимость поиска замены ископаемым видам топлива в условиях их истощения и роста цен.

Рассмотрение современных видов альтернативного топлива позволило выделить ключевые направления развития данной области: биодизель, этанол, водород, древесина и RDF-топливо. Каждое из этих направлений обладает своими преимуществами и недостатками, а также специфическими технологиями производства. В рамках данной работы особый акцент сделан на RDF-топливе, как на перспективном виде альтернативного топлива, получаемом из отходов, что соответствует современным тенденциям ресурсосбережения и экономики замкнутого цикла.

Изучение RDF-топлива было проведено с целью определения его основных понятий и классификации. Было установлено, что RDF-топливо представляет собой твердое вторичное топливо, получаемое из твердых коммунальных отходов (ТКО) путем механической обработки и

сепарации. Классификация RDF-топлива основывается на различных критериях, таких как морфологический состав, теплотворная способность и соответствие нормативным требованиям.

Внедрение RDF-топлива в производство представляет собой перспективное и многообещающее направление, способное оказать существенное влияние на различные отрасли экономики и экологическую ситуацию. Перспективы и возможности использования RDF-топлива обусловлены несколькими ключевыми факторами, которые необходимо учитывать при планировании и реализации соответствующих проектов.

Основной перспективой внедрения RDF-топлива является значительное сокращение объема отходов, направляемых на захоронение. Полигоны переполнены, занимают обширные территории и являются источником загрязнения почвы, воды и воздуха. Использование RDF-топлива позволяет перерабатывать неперерабатываемые твердые бытовые отходы, тем самым продлевая срок службы полигонов и уменьшая необходимость в создании новых. Это особенно актуально для густонаселенных регионов, где проблема нехватки земли стоит остро.

RDF-топливо представляет собой альтернативный источник энергии, который может частично заменить ископаемое топливо, такое как уголь, нефть и газ. Использование RDF-топлива в энергетике позволяет диверсифицировать источники энергии, повысить энергетическую безопасность и снизить зависимость от импорта ископаемого топлива. Это особенно важно в условиях нестабильности цен на энергоносители и растущего внимания к возобновляемым источникам энергии.

Сжигание RDF-топлива сопровождается меньшим выбросом парниковых газов, чем захоронение отходов на полигонах, где происходит выделение метана, мощного парникового газа. Кроме того, современные мусоросжигательные заводы с RDF-топливом оснащены системами очистки дымовых газов, которые позволяют значительно снизить выбросы вредных веществ в атмосферу. Таким образом, внедрение RDF-топлива

способствует улучшению экологической ситуации и снижению воздействия на климат.

Производство и использование RDF-топлива создают новые экономические возможности и рабочие места в сфере переработки отходов, энергетики и производства оборудования. Строительство и эксплуатация предприятий по производству RDF-топлива, мусоросжигательных заводов и котельных на RDF-топливе требуют квалифицированных специалистов, что способствует развитию экономики и повышению занятости населения.

Внедрение RDF-топлива стимулирует развитие технологий и инноваций в области переработки отходов, энергетики и очистки дымовых газов. Постоянно разрабатываются новые методы сортировки, измельчения, сушки и сжигания RDF-топлива, которые позволяют повысить эффективность, снизить затраты и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Использование RDF-топлива соответствует принципам циркулярной экономики, направленной на максимальное повторное использование ресурсов и минимизацию отходов. RDF-топливо позволяет замкнуть цикл использования материалов, превращая отходы в ценный ресурс, который может быть использован для производства энергии и других продуктов.

Внедрение RDF-топлива в производство обладает значительным потенциалом для решения проблем утилизации отходов, производства энергии и охраны окружающей среды. Правильная организация технологических процессов, соблюдение экологических норм и эффективное управление проектами позволят реализовать все преимущества RDF-топлива и создать устойчивую и экологически чистую энергетическую систему. Необходима поддержка со стороны государства, инвестиции в развитие технологий и инфраструктуры, а также активное участие населения для успешного внедрения RDF-топлива в производство.



## ГЛАВА 2. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСКОПАЕМЫХ И АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

### 2.1 Тенденция использования альтернативных источников энергии

Использование ископаемого и альтернативного топлива в производстве является ключевым аспектом современной промышленности. Ископаемые источники энергии, такие как уголь, нефть и природный газ, в современном мире широко распространены на предприятиях по всему миру из-за их исторической экономической эффективности, надежности, технологической зрелости и существующей инфраструктуры. Однако растущая обеспокоенность по поводу изменения климата, снижение стоимости возобновляемых источников энергии и ужесточение экологических норм способствуют постепенному снижению их использования и переходу к альтернативным источникам энергии.

На основе литературных источников [18; 27] был построен график процентного соотношения использования ископаемых и альтернативных видов топлива в производстве в период с 2000 г. по 2020 г. (рис. 1)

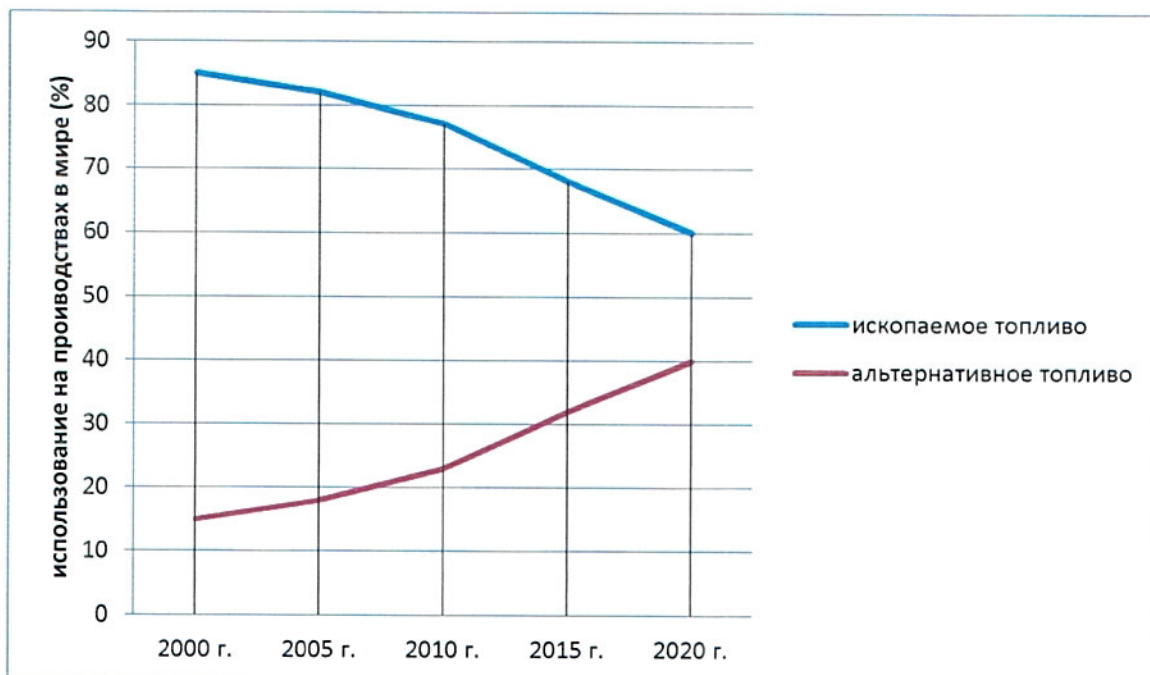


Рисунок 1 – процентное соотношение использования ископаемых и альтернативных видов топлива в производстве в период с 2000 г. по 2020 г.

За период с 2000 г. по 2020 г. использование ископаемого топлива на производствах в мире сократилось на 25 %. Использование альтернативного топлива в период с 2000 г. по 2020 г. на 25 %.

## 2.2 Сравнительный анализ видов альтернативного топлива по энергоемкости и количеству загрязняющих веществ

Энергоемкость топлива на производстве – это показатель, отражающий количество энергии, необходимое для производства единицы продукции или услуги. Отражает эффективность использования энергетических ресурсов. Низкая энергоемкость свидетельствует о более эффективном производстве и меньших затратах на энергию (Табл. 1).

Факторы, влияющие на энергоемкость топлива:

- использование современных, энергоэффективных технологий снижает потребление топлива;
- состояние оборудования – изношенное и устаревшее оборудование менее эффективно и требует больше топлива;
- качество топлива – топливо с низкой теплотворной способностью приводит к увеличению его расхода;
- уровень автоматизации – автоматизация позволяет оптимизировать процессы и снизить потери энергии;
- обученный персонал, способный правильно эксплуатировать оборудование и контролировать параметры процессов, способствует снижению энергоемкости;
- климатические условия – в холодном климате может потребоваться больше энергии на отопление производственных помещений, что увеличивает общую энергоемкость;
- тип производимой продукции – сложность производства и требуемые производственные процессы сильно влияют на энергопотребление.

Таблица 1 – Энергоемкость различных видов топлива [16]

Топливо	Выделяемая энергия (МДж/кг)	Примечания
Ископаемое топливо		
Природный газ	30–35	Зависит от чистоты газа
Нефть сырая	42–46	Зависит от сорта нефти
Уголь (каменный)	24–35	Варьируется в зависимости от типа угля (антрацит, битуминозный, бурый)
Альтернативное топливо		
Водород	120–142	Это удельная теплота сгорания водорода в жидком состоянии
Биодизель	38–42	Зависит от исходного растительного масла
Этанол	27–30	Зависит от способа производства и исходного сырья (зерно, сахарный тростник)
Древесина (сухая)	15–20	Зависит от породы дерева и влажности
RDF (Refuse-Derived Fuel)	10–20	Сильно варьируется в зависимости от состава отходов. Может быть выше, если RDF более высокого качества. RDF в основном состоит из горючей фракции ТКО, такой как пластик, бумага, картон, текстиль

Ископаемое топливо лидирует по удельной энергии. Нефть и природный газ имеют самую высокую удельную теплоту сгорания, за ними следует уголь. Это одна из причин, почему они долгое время были доминирующими источниками энергии.

Альтернативные источники более разнообразны: Альтернативные источники энергии показывают более широкий диапазон значений. Водород имеет огромный потенциал. Биодизель и этанол приближаются к ископаемому топливу, но их производство может быть связано с другими экологическими проблемами (например, использование земли). Древесина, хотя и является возобновляемым ресурсом, имеет значительно меньшую удельную энергию.

RDF-топливо – это способ утилизации отходов: RDF-топливо обладает наименьшей удельной энергией. Тем не менее, это способ

уменьшить объем отходов, отправляемых на свалки, и получить энергию. Качество RDF-топлива критически важно для эффективности и экологичности процесса.

Энергетическая плотность – не единственный фактор. Важно понимать, что удельная энергия – это только один из многих факторов, определяющих пригодность источника энергии. Необходимо учитывать экологические последствия, экономическую целесообразность, доступность и инфраструктуру.

Переход к более устойчивой энергетике требует комплексного подхода, сочетающего различные источники энергии, повышения энергоэффективности и развития технологий хранения энергии.

Выбросы загрязняющих веществ – это выпуск в окружающую среду различных веществ, которые могут негативно влиять на здоровье человека, экосистемы и качество воздуха, воды и почвы. Эти вещества могут быть в виде газов, твердых частиц или жидкостей.

Основные типы загрязняющих веществ и их влияние:

– диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ): раздражение дыхательных путей, обострение астмы, бронхита. Кислотные дожди (повреждение лесов, водоемов, зданий), загрязнение почвы;

– оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ): раздражение дыхательных путей, обострение астмы, формирование смога. Кислотные дожди, фотохимический смог, эвтрофикация (избыточное удобрение) водоемов;

– летучие органические соединения (ЛОС): раздражение глаз, носа и горла, головные боли, тошнота, канцерогенные эффекты. Участие в образовании смога;

– твердые частицы: проникновение в дыхательные пути, вызывая респираторные заболевания, сердечно-сосудистые заболевания, рак легких. Снижение видимости, изменение климата (поглощение и отражение солнечного света);

– тяжелые металлы: неврологические нарушения, поражение органов, рак. Загрязнение почвы, воды, накопление в пищевой цепи.

Выбросы углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) оказывают огромное и многогранное влияние на окружающую среду. Одним из основных направлений этого влияния Изменение климата (глобальное потепление):

– парниковый эффект –  $\text{CO}_2$  является одним из основных парниковых газов. Он задерживает тепло в атмосфере Земли, препятствуя его уходу в космос. Это приводит к повышению средней температуры на планете;

– повышение температуры – более высокие температуры приводят к таянию ледников и арктического льда, что в свою очередь, вызывает повышение уровня моря;

– экстремальные погодные явления – изменение климата усиливает экстремальные погодные явления, такие как засухи, наводнения, ураганы, лесные пожары и волны тепла.

В таблице 2 представлены основные выбросы загрязняющих веществ различных видов топлива и количество выбросов углекислого газа на 1 т сжигаемого топлива.

Таблица 2 – Основные выбросы при сгорании различных видов топлива

Наименование топлива	Химический состав	Основные выбросы	Количество выбросов $\text{CO}_2$ на 1 тонну топлива (тонны)
1	2	3	4
Ископаемое топливо			
Природный газ (метан)	$\text{CH}_4$	Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), угарный газ (CO), метан ( $\text{CH}_4$ )	2,75
Нефть сырая	$\text{C}_8\text{H}_{18}$ ; $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ ; $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	$\text{CO}_2$ , оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), угарный газ (CO), летучие органические соединения (ЛОС)	3,0–3,2
Уголь (каменный)	Углерод (C) 75–92 %. Водород (H) 2,5–5,7 %. Кислород (O) 1,5–15 %. Азот (N) 1–3 %	Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), твердые частицы, ртуть	2,86

1	2	3	4
Альтернативное топливо			
Водород	H <sub>2</sub>	Вода (H <sub>2</sub> O), NO <sub>x</sub>	0
Биодизель	Метилловые эфиры. Этиловые эфиры. Жирные кислоты.	Оксиды углеродов (CO; CO <sub>2</sub> ), твердые частицы, оксиды азота (NO <sub>x</sub> ), альдегиды и кетоны	2,6–2,9
Этанол	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub>	1,9–2
Древесина (сухая)	Углерод (C): 49–50 %. Кислород (O) 43–44 %. Водород (H): 6 %. Азот (N): 0,1–0,3 %	Оксиды углеродов (CO; CO <sub>2</sub> ), NO <sub>x</sub> , оксиды серы (SO <sub>x</sub> ), твёрдые частицы	1,5–1,9
RDF (Refuse-Derived Fuel)	Бумага; картон; дерево; текстиль, кожа и резина; ПЭТ; пластик (ПНД, ПВД); тетра-пак	Твердые частицы, NO <sub>x</sub> , оксиды серы (SO <sub>x</sub> ), CO, CO <sub>2</sub> , хлороводород (HCl), фтористый водород (HF), тяжелые металлы	0,5–1,5

Ископаемое топливо лидирует по выделению углекислого газа при сгорании 1 т топлива. Наибольшее значение имеет сырая нефть. Среди альтернативных источников энергии наибольшее количество выбросов CO<sub>2</sub> имеет биодизель.

Наименьшее количество выделяемого CO<sub>2</sub> при сгорании 1 т топлива имеет RDF-топливо. А водород вообще не выделяет углекислый газ при сгорании.

Достоинства и недостатки каждого вида топлива:

1. Ископаемое Топливо:

Природный Газ (Метан).

Достоинства: высокая удельная энергоёмкость, относительно чистое горение по сравнению с другими ископаемыми видами топлива (меньше SO<sub>2</sub> и твердых частиц).

Недостатки: выбросы CO<sub>2</sub> (парниковый газ), утечки метана (более сильный парниковый газ, чем CO<sub>2</sub>, выбросы NO<sub>x</sub>).

Нефть Сырая.

Достоинства: высокая удельная энергоемкость, широкая доступность и развитая инфраструктура.

Недостатки: высокие выбросы  $\text{CO}_2$ , выбросы  $\text{SO}_x$  (кислотные дожди),  $\text{NO}_x$ , твердых частиц, ЛОС, тяжелых металлов.

Уголь (Каменный).

Достоинства: относительно низкая стоимость, большие запасы.

Недостатки: самое грязное ископаемое топливо, высокие выбросы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , твердых частиц, тяжелых металлов (особенно ртути), полициклических ароматических углеводородов (ПАУ).

## 2. Альтернативное Топливо.

Водород.

Достоинства: очень высокая удельная энергоемкость, при сжигании образуется только вода (если используется чистый водород).

Недостатки: производство водорода может быть энергоемким и приводить к выбросам  $\text{CO}_2$  (если используется ископаемое топливо для производства), выбросы  $\text{NO}_x$  при сжигании с воздухом, трудности с хранением и транспортировкой.

Биодизель.

Достоинства: считается углеродно-нейтральным, снижение выбросов  $\text{SO}_x$  и твердых частиц по сравнению с обычным дизельным топливом.

Недостатки: выбросы  $\text{CO}_2$  (хотя и углеродно-нейтральные),  $\text{NO}_x$ , альдегидов, необходимость землепользования для выращивания сырья, может быть менее энергоемким, чем обычное дизельное топливо.

Этанол.

Достоинства: считается углеродно-нейтральным.

Недостатки: выбросы  $\text{CO}_2$  (хотя и углеродно-нейтральные),  $\text{NO}_x$ , альдегидов, необходимость землепользования для выращивания сырья, может быть менее энергоемким, чем бензин.

Древесина (сухая).

Достоинства: возобновляемый ресурс, считается углеродно-нейтральным при устойчивом управлении лесами.

Недостатки: низкая удельная энергоемкость, высокие выбросы твердых частиц, CO, NO<sub>x</sub>, ЛОС, ПАУ.

RDF-Топливо.

Достоинства: утилизация отходов, снижение объема отходов на свалках, производство энергии.

Недостатки: низкая удельная энергоемкость, выбросы широкого спектра токсичных веществ (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, твердые частицы, CO, HCl, диоксины, фураны, тяжелые металлы), необходимы специализированные установки с эффективными системами очистки.

2.3 Расчет эффективности замены ископаемого топлива на альтернативное на основе энергоемкости и количества выбросов в атмосферу

Грузовой транспорт.

Грузовому транспорту требуется 1,5–3 МДж/кг энергоемкости для прохождения расстояния в 100 км. Данный вид транспорта работает на дизельном топливе (нефти), энергоемкость которого 43 МДж/кг. Необходимый объем топлива для грузового транспорта на 100 км пути: 35 л. (0,03 т) топлива.

Альтернативой дизельного топлива (нефти) для грузового транспорта может являться биодизель, энергоемкость которого равна 38 МДж/кг, что на 12 % меньше, чем у нефти.

$$\frac{43 \text{ МДж/кг} - 38 \text{ МДж/кг}}{43 \text{ МДж/кг}} \times 100 \% = 12 \%$$

Следовательно, расход биотоплива будет на 12 % больше.

$$\frac{35 \text{ л.}}{100 \%} \times 12 \% + 35 \text{ л.} = 39,2 \text{ л.}$$



39,2 л (0,033 т) биодизеля необходимо для прохождения расстояния в 100 км у грузового автомобиля.

Известно, что при сгорании 1 т нефти, в атмосферу выбрасывается 3 т углекислого газа (CO<sub>2</sub>), а при сгорании 1 т биодизеля в атмосферу выбрасывается 2,6 т углекислого газа.

При переводе грузового транспорта с дизельного топлива на биодизель, в атмосферу будет поступать на 13 % меньше углекислого газа.

$$\frac{3 \text{ т} - 2,6 \text{ т}}{3 \text{ т} \div 100 \%} = 13 \%$$

Зная, что для прохождения расстояния в 100 км грузовому транспорту необходимо 0,03 т дизельного топлива, а при сгорании 1 т дизельного топлива (нефти) образуется 3 т углекислого газа, мы можем найти объем выбросов углекислого газа при прохождении расстояния в 100 км у грузового транспорта дизельном топливе (нефти).

0,09 т выбросов углекислого газа образуется при прохождении расстояния в 100 км у грузового транспорта.

$$3 \text{ т} \times 0,03 \text{ т} = 0,09 \text{ т.}$$

Зная, что для прохождения расстояния в 100 км грузовому транспорту необходимо 0,033 т биодизеля, а при сгорании 1 т биодизельного топлива образуется 2,6 т углекислого газа, мы можем найти объем выбросов углекислого газа при прохождении расстояния в 100 км у грузового транспорта.

0,08 т выбросов углекислого газа образуется при прохождении расстояния в 100 км у грузового транспорта на биодизельном топливе.

$$2,6 \text{ т} \times 0,033 \text{ т} = 0,08 \text{ т.}$$

На 10 % меньше выбросов углекислого газа будет образовываться, при прохождении расстояния в 100 км у грузового транспорта, работающего на биотопливе, чем на дизельном топливе (нефти) (рис. 2).

$$\frac{0,033 \text{ т} - 0,03 \text{ т}}{0,03 \text{ т} \div 100 \%} = 10 \%$$

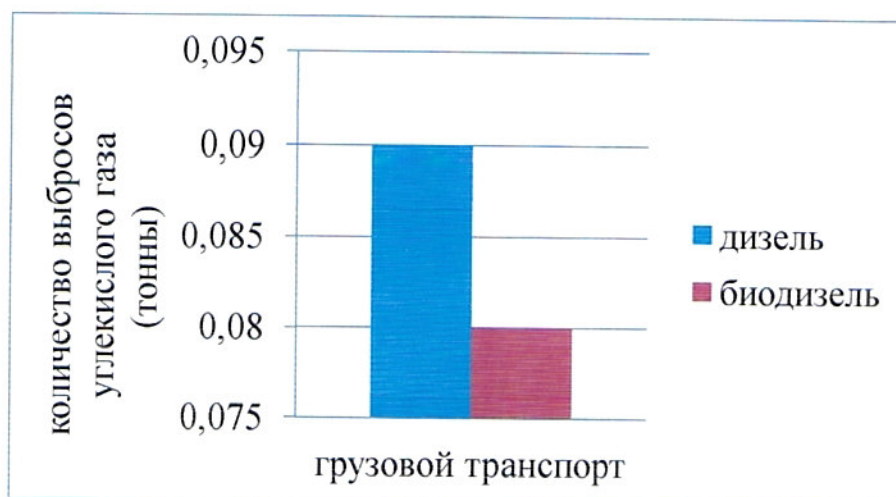


Рисунок 2 – количество выбросов углекислого газа при работе грузового транспорта на дизели и биодизели  
Производство стали.

Потребляемая энергоёмкость производства стали 15–25 МДж/кг. Большинство предприятий работает на каменном угле, энергоёмкость которого в среднем равна 27 МДж/кг. Необходимый объём каменного угля для производства 1 т стали составляет 0,5 т.

Альтернативой каменного угля при производстве стали может являться биодизель, энергоёмкость которого в среднем составляет 38 МДж/кг, что на 40 % больше, чем у каменного угля.

$$\frac{38 \text{ МДж/кг} - 27 \text{ МДж/кг}}{27 \text{ МДж/кг}} \div 100 \% = 40 \%$$

Следовательно, расход биотоплива будет на 40 % меньше.

0,3 т биотоплива необходимо для производства одной тонны стали.

$$\frac{0,5 \text{ т}}{100 \%} \times (100 \% - 40 \%) = 0,3 \text{ т.}$$

Известно, что при сгорании 1 т каменного угля, в атмосферу выбрасывается 2,86 т углекислого газа (CO<sub>2</sub>), а при сгорании 1 т биодизеля в атмосферу выбрасывается 2,6 т углекислого газа. При переводе производства стали с каменного угля на биодизель, в атмосферу будет поступать на 9 % меньше углекислого газа.

$$\frac{2,86 \text{ т} - 2,6 \text{ т}}{2,86 \text{ т}} \div 100 \% = 9 \%$$

Зная, что для производства 1 т стали необходимо 0,5 т каменного угля, а при сгорании 1 т каменного угля образуется 2,86 т углекислого газа, мы можем найти объем выбросов углекислого газа при производстве 1 т стали.

$$2,86 \text{ т} \times 0,5 \text{ т} = 1,43 \text{ т}.$$

1,43 т выбросов углекислого газа образуется при производстве 1 т стали на каменном угле.

Зная, что для производства 1 т стали необходимо 0,3 т биодизеля, а при сгорании 1 т биодизеля образуется 2,6 т углекислого газа, мы можем найти объем выбросов углекислого газа при производстве 1 т стали.

$$2,6 \text{ т} \times 0,3 \text{ т} = 0,78 \text{ т}.$$

0,78 т выбросов углекислого газа образуется при производстве 1 т стали на биотопливе.

$$\frac{1,43 \text{ т} - 0,78 \text{ т}}{1,43 \text{ т} \div 100 \%} = 45 \%$$

На 45 % меньше выбросов углекислого газа будет образовываться, при производстве 1 т стали на биотопливе, чем на каменном угле (рис. 3).

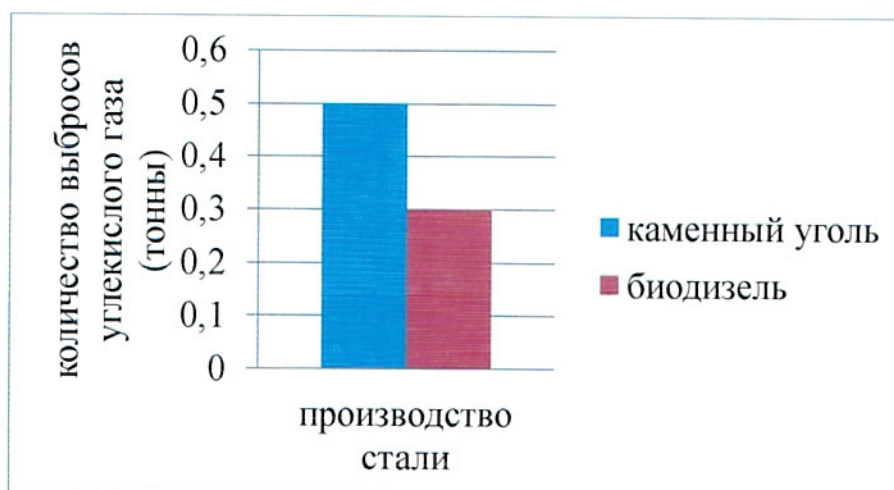


Рисунок 3 – количество выбросов углекислого газа при производстве стали на каменном угле и биодизели

Производство цемента.

Потребляемая энергоёмкость производства цемента 2,5–5 МДж/кг. Большинство предприятий в качестве топлива использует природный газ,

энергоёмкость которого в 33 МДж/кг. Необходимый объём природного газа для производства 1 т цемента составляет 0,07 т.

Альтернативой природного газа при производстве цемента является RDF-топливо, энергоёмкость которого в среднем составляет 10 МДж/кг, что на 70 % меньше, чем у природного газа.

$$\frac{33 \text{ МДж/кг} - 10 \text{ МДж/кг}}{33 \text{ МДж/кг} \div 100 \%} = 70 \%$$

Следовательно, расход RDF-топливо будет на 70 % больше.

0,12 тонн RDF-топлива необходимо для производства одной тонны цемента.

$$\frac{0,07 \text{ т}}{100 \%} \times (100 \% + 70 \%) = 0,12 \text{ т}$$

Известно, что при сгорании 1 т природного газа, в атмосферу выбрасывается 2,75 т углекислого газа (CO<sub>2</sub>), а при сгорании 1 т RDF-топлива в атмосферу выбрасывается 0,5 т углекислого газа.

$$\frac{2,75 \text{ т} - 0,5 \text{ т}}{2,75 \text{ т} \div 100 \%} = 81 \%$$

При переводе производства цемента с природного газа на RDF-топливо, в атмосферу будет поступать на 81 % меньше углекислого газа.

Зная, что для производства 1 т цемента необходимо 0,07 т природного газа, а при сгорании одной тонны природного газа образуется 2,75 т углекислого газа, мы можем найти объём выбросов углекислого газа при производстве 1 т цемента.

$$2,75 \text{ т} \times 0,07 \text{ т} = 0,2 \text{ т}$$

0,2 т выбросов углекислого газа образуется при производстве 1 т цемента на природном газе.

Зная, что для производства 1 т цемента необходимо 0,12 т RDF-топливо, а при сгорании 1 т RDF-топлива образуется 0,5 т углекислого газа, мы можем найти объём выбросов углекислого газа при производстве 1 т цемента.

$$0,5 \text{ т} \times 0,12 \text{ т} = 0,06 \text{ т.}$$

0,06 т выбросов углекислого газа образуется при производстве 1 т цемента на RDF-топливе.

$$\frac{0,2 \text{ т} - 0,06 \text{ т}}{0,2 \text{ т}} = 70 \%$$

На 70 % меньше выбросов углекислого газа будет образовываться, при производстве 1 т стали на RDF-топливе, чем на природном газе (рис. 4).

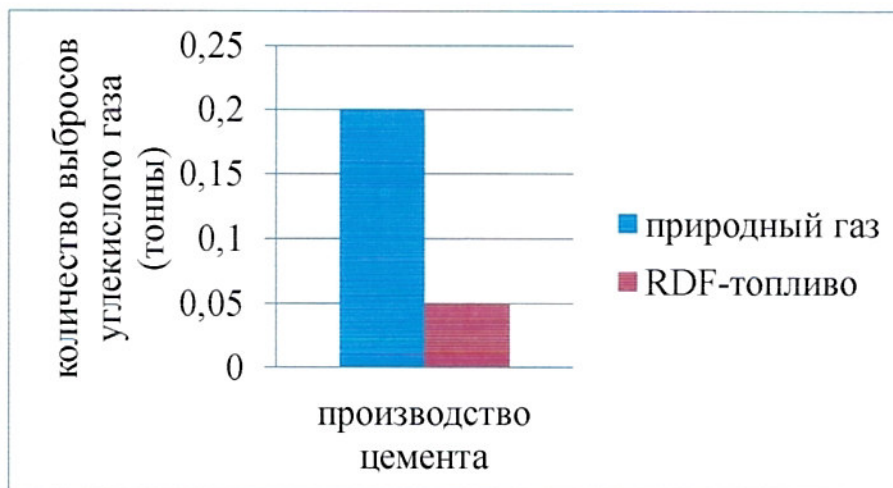


Рисунок 4 – количество выбросов углекислого газа при производстве цемента на природном газе и RDF-топливе

По результатам расчетов эффективности замены ископаемого топлива на альтернативное, была составлена таблица сокращения выбросов углекислого газа (табл. 3).

Таблица 3 – Сокращение выбросов углекислого газа

Потребитель топлива	Потребляемая энергоемкость (МДж/кг)	Используемое топливо			Альтернативное топливо			Сокращение выбросов углекислого газа
		Энергоемкость топлива (МДж/кг)	Необходимый объем (тонны)	Количество выбросов (тонны)	Энергоемкость топлива (МДж/кг)	Необходимый объем (тонны)	Количество выбросов (тонны)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грузовой транспорт (на 100 км хода)	1,5–3	Нефть (дизель)			Биодизель			10 %
		43	0,03	0,09	~38	0,033	0,08	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Производство стали (на одну тонну продукции)	15–25	Каменный уголь			Биодизель			45 %
		25-30	0,5	0,5	~38	0,3	0,3	
Производство цемента (на одну тонну продукции)	2,5–5	Природный газ			RDF-топливо			70 %
		33	0,07	0,2	~10	0,12	0,06	

### Выводы по второй главе

Энергоемкость и экологичность обратно пропорциональны. Как правило, топливо с более высокой удельной энергоемкостью (МДж/кг) оказывает большее негативное воздействие на окружающую среду (больше выбросов CO<sub>2</sub> и токсичных веществ).

Альтернативные виды топлива имеют меньшее негативное воздействие, но не идеальны: Они выделяют меньше CO<sub>2</sub>, но могут быть связаны с другими экологическими проблемами (землепользование, выбросы NO<sub>x</sub>, альдегидов, твердых частиц и т.д.).

В результате было выявлено, что при переходе грузового транспорта с дизельного топлива на биодизель, выбросы углекислого газа сократятся на 10 %. На производстве стали используется каменный уголь, альтернативным топливом которого может использоваться биодизель. При переходе с ископаемого топлива на альтернативное, выбросы углекислого газа сократятся на 45 %. При переходе производства цемента с использования природного газа на RDF-топливо. Выбросы углекислого газа сократятся на 70 %

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование, посвященное перспективам и возможностям введения альтернативного топлива в производство, позволило комплексно проанализировать текущую ситуацию и выявить ключевые тенденции в этой области.

1. На современном этапе развития энергетики наблюдается устойчивый рост использования альтернативного топлива, обусловленный стремлением снизить зависимость от ископаемого топлива, сократить выбросы парниковых газов.

2. Основными достоинствами Альтернативных видов топлива являются: возобновляемость, возможность использования отходов производств и снижение выбросов токсичных веществ. Недостатками альтернативного топлива являются необходимость организации специального производства и повышение производительности газоочистных установок.

3. В России использование альтернативного топлива на производствах находится на стадии развития, примерно 1–2 %. Однако, можно обозначить, что некоторые цементные заводы начали полностью переходить на RDF-топливо, а металлургические используют данный вид топлива как дополнительный источник и число таких производств постоянно растет. В ходе работы было выявлено, что при переходе на альтернативное топливо количество выбросов углекислого газа сократится от 10 % до 70 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов Д. В. Альтернативные виды топлива: современное состояние и перспективы развития / Д. В. Абрамов, Е. А. Полякова. – Москва : Теплоэнергетика, 2021. – 184 с.
2. Белов П. С. Биотопливо: производство, применение, экономика / П. С. Белов, А. И. Петров. – Санкт-Петербург : Профессия, 2020. – 320 с.
3. Бернадинер И. М. Использование RDF и отработавших автомобильных покрышек в цементной печи / И. М. Бернадинер, Е. Ю. Александрова // Отраслевой портал Отходы.ру : [сайт]. – URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=447> (дата обращения: 19.05.2025).
4. Васильев В. А. Энергетика будущего: водородное топливо / В. А. Васильев, Г. П. Иванов. – Москва : Энергия, 2019. – 240 с.
5. Зайцев В. М. Производство и применение биогаза / В. М. Зайцев, П. П. Иванов. – Москва : Энергия, 2016. – 192 с.
6. Григорьев Б. А. Альтернативные источники энергии / Б. А. Григорьев, В. М. Клименко. – Москва : Изд-во МЭИ, 2018. – 384 с.
7. Дмитриев А. Н. Перспективы использования альтернативных видов топлива в промышленности / А. Н. Дмитриев // Вестник машиностроения. – 2022. – № 5. – С. 25–29.
8. Зайцев В. М. Экономическая эффективность внедрения альтернативных видов топлива / В. М. Зайцев // Экономика и управление. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
9. Капустин В. М. Альтернативные топлива и перспективы их применения / В. М. Капустин, И. С. Гулый. – Москва : Нефть и газ, 2015. – 312 с.
10. Кириллов Н. П. Экологические аспекты использования альтернативных видов топлива / Н. П. Кириллов // Экология производства. – 2021. – № 10. – С. 15–20.



11. Козлов А. В. Анализ мирового рынка альтернативного топлива / А. В. Козлов // Маркетинг и менеджмент инноваций. – 2022. – № 2. – С. 78–85.
12. Кузнецов П. А. Современные технологии производства синтетического топлива / П. А. Кузнецов. – Москва : Химия, 2020. – 208 с.
13. Морозов И. Д. Технологии переработки отходов в альтернативное топливо / И. Д. Морозов. – Санкт-Петербург : Наука и Технологии, 2021. – 256 с.
14. Петров А. А. Водородная энергетика: проблемы и решения / А. А. Петров, В. С. Сидоров. – Москва : Инфра-Инженерия, 2022. – 304 с.
15. Пять лет на альтернативном топливе // Цементум : [сайт]. – URL: <https://cementum.ru/press-center/publications/2020/pyat-let-na-alternativnom-toplive/> (дата обращения: 02.06.2025).
16. Смирнов Д. Е. Инновационные решения в области альтернативной энергетики / Д. Е. Смирнов // Инновации. – 2021. – № 4. – С. 55–62.
17. Таблица теплотворности // Автоматик–Лес : [сайт]. – URL: <https://www.automaticles.ru/stati/tablica-teplotvornosti> (дата обращения: 19.05.2025).
18. Технологии производства биотоплива второго поколения: монография / под ред. В. П. Иванова. – Москва : Лань, 2020. – 400 с.
19. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Об охране окружающей среды» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) // Консультант-плюс : [сайт]. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/). (дата обращения 02.06.2025).
20. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Об отходах производства и потребления» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) // Консультант Плюс : [сайт]. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/). (дата обращения: 19.05.2025).
21. Федоров Г. И. Энергоэффективность и альтернативные источники энергии / Г. И. Федоров. – Москва : Академия, 2019. – 352 с.

22. Чернов С. А. Альтернативные виды топлива и их влияние на окружающую среду / С. А. Чернов // Безопасность жизнедеятельности. – 2021. – № 7. – С. 40–45.

23. Шайхутдинова Г. Р. Имплементация международных обязательств в сфере сохранения биологического разнообразия (на примере Российской Федерации и Республики Ирак) / Г. Р. Шайхутдинова, С. Х. Джабер // Ученые записки казанского университета. Серия гуманитарные науки. – 2019. – Т. 161. – №. 1. – С. 92–101.

24. Шилкина С. В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России / С. В. Шилкина // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2020. – № 1 : [сайт]. – URL: <https://resources.today/PDF/05ECÜR120.pdf> (дата обращения: 21.05.2025).

25. Alter H. The history of refuse-derived fuels / H. Alter // Resources and Conservation. – 1987. – Vol. 15–4. – Pp. 251–275.

26. Biofuel consumption worldwide from 2000 to 2023, with a forecast until 2030 // statista : [сайт]. – URL: <https://www.statista.com/statistics/243942/worldwide-consumption-of-biofuels/> (дата обращения: 15.05.2025).

27. IEA (International Energy Agency) // Biofuels : [сайт]. – URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/biofuels> (дата обращения: 15.05.2025).

28. Eurostat. Renewable energy // statistics : [сайт]. – URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics) (дата обращения: 15.05.2025).