

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»

На правах рукописи



РЫЖИКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОТОПЛИВА –
ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ОТХОДЫ БУМАГИ С
ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Павел Владимирович Луканин

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

Введение	4
1 Аналитический обзор	14
1.1 Крупнотоннажные синтетические полимеры в производства ламинированной бумаги	14
1.1.1 Анализ рынка крупнотоннажных синтетических полимеров РФ и мира	20
1.1.2 Сортировка крупнотоннажных синтетических полимеров, используемых в ЦБП	23
1.2 Полимерные твердые коммунальные отходы в окружающей среде	25
1.2.1 Негативные последствия накопления полимерных ТКО	26
1.2.2 Переработка полимерных ТКО	27
1.2.3 Жизненный цикл полимерных ТКО и его оценка	29
1.3 Углеродный след	30
1.3.1 Углеродный след, как индикатор воздействия на климатическую систему ..	30
1.3.2 Международные соглашения в сфере предотвращения климатических изменений и задачи РФ	31
1.4 Отходы целлюлозно-бумажной промышленности	33
1.4.1 Виды и общий объем отходов ЦБП	33
1.4.2 Потенциальные загрязнители из отходов ЦБК	35
1.4.3 Отходы производства упаковочного материала в целлюлозно-бумажной промышленности	35
2 Теоретический подход к решению проблемы	37
2.1 Древесные топливные брикеты	38
2.2 Совместное сжигание биотоплива и каменного угля	40

2.2.1 Станции, работающие на совместном сжигании угля и биотоплива	42
2.3 Топливный брикет, содержащий отходы ЦБП	45
2.4 Отбелка целлюлозы и её вредоносные компоненты для процесса сжигания ...	46
2.5 Предложенная технология по совместной утилизации твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги	47
2.6 Исходное сырье	48
2.7 Описание используемой энергоустановки.....	49
2.7.1 Описание котла БКЗ 75-39	50
2.8 Необходимые теплотехнические расчеты	54
2.9 Обоснование выбранного метода	57
3 Экспериментальная часть	59
3.1 Подготовка исходного сырья.....	60
3.2 Формирование топливного брикета	64
3.3 Результаты эксперимента по определению плотности и прочности брикета ...	66
3.4 Определение зольности топливного брикета	70
3.5 Определение теплотворной способности топлива	72
3.6 Анализ топок различных конструкций.....	76
3.7 Определение погрешности измерений.....	77
3.8 Определение взаимодействия древесины и синтетических полимеров	80
3.9 Экструдированность смеси	81
3.10 Технологическая схема процесса формирования брикета и подготовки к сжиганию.....	82
Заключение.....	85
Список сокращений	88
Список литературы	89
Приложение 1	100
Приложение 2	112
Приложение 3	113
Приложение 4	115
Приложение 5.....	117

Введение

Актуальность работы.

В России и мире активно идет обсуждение перехода к углеродной нейтральности, что означает сокращение до нуля выбросов углекислого газа в процессе производственной деятельности или их компенсацию за счет углеродно-отрицательных проектов. Процесс минимизации техногенного влияния на окружающую среду и переход на чистые технологии стал уже не трендом, а неизбежной реальностью. В России в июле 2020 года, был подписан Указ Президента о национальных целях развития России на период до 2030 года. Новый документ существенно усиливает значимость экологической повестки. В соответствии с ним в ближайшие десятилетия страна будет двигаться по «зеленому» направлению. В числе главных целей станет создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, снижение вдвое вредных выбросов в воздух, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Помимо этого, должны быть ликвидированы наиболее опасные объекты накопленного вреда природе и проведено экологическое оздоровление водных объектов [1].

В 2021 году правительство России утвердило Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Приняв долгосрочную стратегию декарбонизации, Россия заняла подобающее ей место в процессе достижения целей глобального характера по защите климата - озвучена цель по достижению углеродной нейтральности Россией к 2060 г. Ряд европейских стран ставят подобную задачу к 2050 г., а Китай – с определенными оговорками – к 2060 г.; таким образом Россия после данного решения вошла в клуб стран, которые окажут существенное влияние на климатические процессы в ближайшие десятилетия. Для реализации такой цели далеко не на последнем месте стоит переработка отходов производств с получением чистой энергии и минимизацией вредных выбросов, в том числе и двуокиси углерода [2].

Проблема переработки отходов производства ламинированной бумаги, содержащей синтетические полимеры, действительно является актуальной задачей в рамках перехода к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике.

Объем потребления бумаги и картона в мире - свыше 430 млн тонн, а объем потребления крупнотоннажных синтетических полимеров в мире - свыше 360 млн тонн. Основным сырьем для производства синтетических полимеров является нефть, мировая добыча которой составляет около 4, 5 млрд тонн в год (сернистых соединений в различных видах нефтей может быть более 10-ти процентов, хотя обычно этот показатель не превышает шести процентов). С учетом того, что лишь 8% от общей добычи нефти используется для производства синтетических полимеров, становится ясно, что большая часть нефти идет на сжигание, что приводит к значительным выбросам парниковых газов и других загрязняющих веществ [3-5].

Синтетические полимеры, в обиходе называемые пластиком - один из самых распространенных материалов, используемых в современной жизни. По данным ЮНЕП, около 30% от общего объема производства пластика уходит на упаковку, что подтверждает универсальность и функциональность пластиков в данной сфере. Использование пластика в строительстве и транспорте свидетельствует о его прочности, легкости и других полезных свойствах, что делает его незаменимым материалом в этих отраслях [5].

Однако доля переработанных пластиковых отходов остается крайне невысокой — менее 10% — что указывает на наличие серьезных проблем в области утилизации и переработки. Высокие затраты на переработку, а также недостаточная инфраструктура для сбора и переработки пластика способствуют накоплению пластиковых отходов и усугубляют экологические проблемы.

Мировое сообщество сталкивается с вызовами, связанными с утилизацией и сокращением использования одноразового пластика, что требует внедрения новых технологий, повышения осведомленности населения и создания эффективных систем переработки.

Прогнозы, согласно которым объем пластиковых отходов может превысить 340 млн тонн в год к 2045 году, подчеркивают необходимость принятия срочных мер для уменьшения производства и потребления пластика, а также для улучшения систем утилизации и переработки [5].

Степень разработанности темы исследования.

Тенденции к высокому уровню вторичной переработки бумаги и необходимость сокращения пластикового загрязнения тесно связаны с устойчивым развитием. Использование вторичного волокна в производстве бумаги, которое превышает использование первичного, свидетельствует о растущем внимании к экологическим аспектам. В цифрах это проявляется в таких значительных показателях, как 68% уровня вторичной переработки бумаги в США и 91,4% для гофрокартонной упаковки, что подчеркивает важность переработки для снижения отходов [4-5].

Создание биоразлагаемой упаковки представляется многообещающим направлением для снижения пластика в окружающей среде. Однако, как показывает анализ жизненного цикла, биоразлагаемые материалы могут быть эффективно использованы в качестве компонентов для производства биотоплива, что открывает новые горизонты для их применения.

Согласно отчету ФАО ООН, древесное топливо продолжает быть важным источником энергии для значительной части населения Земли, особенно в развивающихся странах. Это указывает на необходимость расчетного подхода в управлении лесными ресурсами и их устойчивом использовании. Прогнозы роста потребления древесного топлива могут варьироваться, но они подчеркивают значимость перехода к более устойчивым видам энергии, чтобы избежать чрезмерной зависимости от традиционных источников, что может обострить проблемы с вырубкой лесов и экологической устойчивостью [4-6].

В прогнозе указывается, что древесное топливо останется основным источником энергии для многих домохозяйств в странах с развивающейся экономикой до 2050 года, но многие сценарии предполагают, что темпы роста

потребления замедлятся. Мировое потребление топливной древесины из лесов в 2050 году может составить от 2,1 до 2,7 миллиарда кубометров по сравнению с 1,9 миллиарда кубометров в 2020 году, увеличившись на 11-42 процента.

Использование древесных пеллет и брикетов в качестве биотоплива второго поколения действительно стало значительным шагом в направлении устойчивого энергетического будущего [3-6]. Эти виды топлива не только более экологически чистые по сравнению с традиционными ископаемыми источниками, такими как уголь, но и способны существенно снизить выбросы углекислого газа, что особенно актуально в условиях глобальной проблемы изменения климата.

Совместное сжигание древесных пеллет с каменным углем может быть эффективно реализовано на угольных электростанциях. Это позволяет не только уменьшить выбросы серы и других загрязняющих веществ, но и снижает общий углеродный след, поскольку древесные пеллеты считаются углеродно-нейтральными: углерод, выделяющийся при их сжигании, поглощается растениями в процессе фотосинтеза.

Россия, будучи значимым игроком на рынке древесных пеллет, в 2020 году экспортировала 2,32 миллиона тонн пеллет, что составляет 6% от общего мирового объема, равного 46 миллионам тонн, согласно данным ФАО 2019 года. В первом полугодии 2021 года наблюдался рост производства топливных пеллет в России на 19%, а цены на эти гранулы увеличились на 17% [3-6].

Регион ЕЭК (Евразийская экономическая комиссия) является мировым центром как производства, так и потребления топливных древесных гранул, на долю которого приходится около 80% от глобального производства. В этом регионе также сосредоточено 90% мирового экспорта пеллет, что подчеркивает его доминирующее положение на рынке.

Создание древесных биотопливных брикетов в России представляет собой значительное достижение в области альтернативной энергетики. Такие брикеты (плотностью 1300-1320 кг/м³) обладают хорошими теплофизическими свойствами, что делает их эффективным источником энергии. Инновационная технология их

производства открывает новые возможности для использования биомассы и способствует снижению зависимости от ископаемых видов топлива [7-11].

Наличие пяти работающих производств древесных, древесноугольных и торрефицированных брикетов в России подтверждает растущий интерес к данному направлению. Кроме того, запуск аналогичного производства в Риге и организация выпуска линий малой серией подчеркивает высокий спрос на такие технологии, а также развитие международного сотрудничества в сфере возобновляемых источников энергии [8].

Комплексный подход к производству и использованию биотоплив третьего поколения, включая разработку новых технологий и оборудования, способствует улучшению экологической ситуации и поддержанию устойчивого развития в энергетическом секторе.

Цель работы.

Целью работы является повышение эффективности использования твердого биотоплива с применением отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры. Совместное использование твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги реализуется в виде инновационных комбинированных брикетов 2-го поколения с дальнейшим сжиганием в котельной установке с низкотемпературной вихревой (НТВ) топкой Померанцева.

Основные задачи исследования:

1. Разработка научных основ повышения эффективности использования композитных брикетов на базе древесных опилок и отходов бумаги с полиолефиновым покрытием;
2. Определение влияния времени пропарки сырья на повышение влажности твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги при их различных соотношениях;
3. Определение влияния температуры формирования брикета и влажности

- сырья на прочность и плотность полученного брикета при трех композициях;
4. Экспериментальное определение низшей теплоты сгорания полученных комбинированных брикетов;
 5. Анализ основных расчетных параметров топочных камер различной конструкции в котлоагрегате при сжигании полученных комбинированных брикетов;
 6. Проведение сравнительного расчета количества вредных выбросов диоксида азота при сжигании полученных комбинированных брикетов в топочных устройствах различной конструкции;
 7. Определение величины экономического эффекта при переводе котлоагрегата с древесных топливных брикетов на полученные комбинированные брикеты из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги.

Научная новизна.

1. В рамках диссертационной работы впервые показана возможность создания топливных брикетов при совместной переработке твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры.

2. Была установлена возможность реализации, в процессе формирования брикетов, влагопластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров.

3. Выявлена зависимость влияния влажности исходного сырья и температуры формирования брикета на физико-механические свойства полученных брикетов при переходе из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В связи с нынешней экологической обстановкой по всему миру, в частности по загрязнению планеты отходами производств и вредными выбросами в атмосферу такими как: оксиды азота, серы и двуокиси углерода, можно высоко оценить теоретическую и практическую значимость данной диссертационной

работы. Основопологающим фактором являются законодательные документы [1-2], принятые в последние годы, согласно которым предприятия обязаны подстраиваться под новые экологические нормы и повестки. Решения, предложенные в работе, помогут целлюлозно-бумажным и упаковочным производствам избавиться от ныне не утилизируемых экологически-безопасным путем отходов, повысить теплотворную способность твердого биотоплива, понизить энергетические и экономические затраты на подготовку топлива, транспортировку и топливоснабжение, снизить загруженность полигонов, на которых происходит захоронение отходов и уменьшить концентрацию вредных выбросов в атмосферу, а также позволит использовать полученную тепловую энергию для собственных нужд промышленных предприятий.

Объекты исследования.

Твердые древесные отходы лиственницы (древесная мука) и отходы производства ламинированной бумаги, содержащие синтетический полимер - полиэтилен низкой плотности (высокого давления) марки 11503-070, в соотношении с бумагой 50/50%;

Топочные камеры различной конструкции в котельных агрегатах.

Методология и методы исследования.

Исследования проводились в стенах Высшей школы технологии и энергетики на кафедрах ПТЭ и ТЦКМ, в них входили следующие этапы:

- Измельчение исходных видов сырья выполнялось с помощью лабораторной дисковой мельницы;
- Ситовый анализ исходных материалов;
- Изучение термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины;
- Высушивание обоих видов сырья до одинаковой влажности выполнялось с помощью специального прибора;

- Изучение термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины;
- Определение низшей теплоты сгорания полученного брикета проводилось с помощью лабораторного калориметра;
- Определение химического состава и зольного остатка топлива;
- Проведение теплотехнических расчетов топочных камер различной конструкции согласно нормативному методу.

В дальнейшем проводились теплотехнические расчеты в выбранной энергетической установке по методикам, изложенным в учебных и методических пособиях СПбГУПТД.

К основным расчетам относятся:

- Материальный баланс процесса горения топлива;
- Тепловой баланс котлоагрегата;
- Тепловой расчет котлоагрегата;
- Аэродинамический расчет и выбор тягодутьевого оборудования;
- Расчет вредных выбросов в атмосферу в топках различной конструкции;
- Расчет экономического эффекта при переходе на полученный брикет.

Степень достоверности результатов.

Экспериментальные исследования по определению основных параметров и свойств полученного комбинированного брикета были проведены многократно по общепринятым методикам с использованием сертифицированных и поверенных приборов в СПбГУПТД.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технология производства инновационных комбинированных топливных брикетов из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги;
2. Результаты установленных зависимостей физико-механических свойств

полученных брикетов от влажности исходного сырья и температуры формирования;

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. БИОС-Форум 2020г.;
2. LightConf 2021, СПбГУПТД, 30.03.2021г.;
3. «Энергосбережение – гарантия будущего», ВШТЭ, 10.11.2021г.;
4. Pulp-For 2022, ВШТЭ, 15.11.2022г.;
5. VII Международная научно-техническая конференция имени профессора В.И. Комарова «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» - Архангельск, САФУ, 16.09.2023г.;
6. Pulp-For 2023, ВШТЭ, 14.11.2023г.;
7. Pulp-For 2024, ВШТЭ, 12.11.2024г.

Был получен акт об использовании отходов опытной выработки ламинированной бумаги для их применения при получении биотоплива на предприятии ООО «Проммонтажсервис НТ» от 05.05.2025. Также, была проведена промышленная выработка комбинированных брикетов и составлен акт апробации на предприятии ООО «ПРОМЕТЕЙ» от 28.05.2025 г.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора проявлялся в непосредственном участии во всех этапах работы: исследование влияния влажности исходного сырья и температуры формирования брикета на физико-механические свойства полученного брикета; анализ изменения релаксационных состояний исследуемых материалов при определенных условиях; определение теплотворной способности комбинированного брикета экспериментальным методом; проведение сравнительного анализа расчетных параметров топочных камер различной конструкции и выбор наиболее экологически эффективной конструкции для

сжигания полученного брикета; проведение теплотехнических расчетов в работе и анализ полученных результатов. Также, поиск и обработка полученной информации, подготовка публикаций и выступление на конференциях с докладами по теме работы.

Публикации.

По теме диссертационной работы было опубликовано 14 печатных работ, в том числе 2 статьи, входящие в перечень ВАК.

1 Аналитический обзор

1.1 Крупнотоннажные синтетические полимеры в отходах производства ламинированной бумаги

Крупнотоннажные полимеры являются основой для производства широкого спектра конкретных марок пластмасс со специальными характеристиками. Таких разновидностей насчитывается всего около 4000. Только ассортимент ПЭНП по данным каталога ОНПО «Пластполимер» составлял в 1996 г. более ста разновидностей, отличающихся деформационно-прочностными, теплофизическими, электрическими, реологическими и некоторыми другими технологическими и эксплуатационными характеристиками (литьевые, экструзионные, негорючие, прозрачные и так далее) [12].

Особенности отечественной отрасли пластмасс заключаются в следующем.

1. После глубокого, общего для РФ спада промышленного производства в 1990-е гг. выпуск полимерных материалов быстро восстанавливается с темпом прироста до 10 % в год [13- 18].

2. Мощности по производству большинства термопластов используются на 93–96 % (в Западной Европе – 85 %), что свидетельствует об острой необходимости строительства новых предприятий синтеза. Применительно к полистирольным пластикам эта задача уже успешно решается созданием высокоэффективных современных предприятий. Так, если в 2000 г. производство ПС составляло 131 тыс. т, то в 2004 г. оно возросло до 190 тыс. т. [13- 18].

3. В потреблении ряда марок термопластов значительное место занимает импортируемая продукция. Так, в 2004 году доля импорта составила для ПА почти 70 %, а для ПЭТФ – 88 % [13- 18].

4. В ассортименте производства пластмасс значительное место занимают термореактивные олигомеры и композиты на их основе. Около 20 % годового выпуска приходится на аминопласты, около 8 % – на фенопласты, порядка 1,5 % – на эпоксидные олигомеры [13- 18].

5. В России сформировалась отрасль производства пластмасс на закупаемом полимерном сырье. Соответствующими предприятиями особо востребованы

ПЭНП, ПЭВП, ПП, ПВХ и ПС, на основе которых выпускаются разнообразные наполненные смесевые и модифицированные композиты. Мощность новой отрасли исчисляется сотнями тысяч тонн в год [13- 18].

Производство пластмасс в последние годы действительно демонстрирует значительный рост, что обусловлено введением в эксплуатацию новых мощностей и модернизацией существующих. Важными событиями в этой сфере стали выход на проектные мощности таких заводов, как «Полиом», «Тобольск-Полимер» и «РусВинил», что позволило значительно увеличить объемы производства полимерной продукции в России в период 2015–2016 годов.

Параллельно с этим, реконструкция реакторного блока на «Ставролене» в 2018 году также способствовала повышению эффективности производства полиэтилена. Запуск в 2019 году завода «ЗапСибНефтехим», который стал крупнейшим в стране производством полиолефинов, стал знаковым событием для отрасли и укрепил позиции России на мировом рынке полимеров.

Таким образом, развитие технологий и строительство новых мощностей способствовали не только росту внутреннего производства, но и повышению конкурентоспособности российской химической продукции на международной арене.

Ниже приведены сводные таблицы 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 объемов производства различных видов синтетических полимеров [19].

Таблица 1 – Сводная таблица показателей развития российского рынка полимеров
этилена

	2017	2018	2019	I кв. 2019	I кв. 2020
Производственные показатели					
- объем производства, тыс. тонн	2046	2196	2357	569	824
- изменение объемов производства, в % к предыдущему году	5,3	7,4	7,3		44,7
Емкость внутреннего рынка					
- видимое потребление, тыс. тонн	2302	2534	2848	658	891
- изменение видимого потребления, %	5,1	10,1	12,4	-76,9	35,5
Конъюнктура рынка					
- изменение среднегодовых цен производителей на внутреннем рынке, %	-10	8,5	-3,6		-23,5
Уровень экспортного потенциала					
- объем экспорта, тыс. тонн	393	317	349	84	109
- изменение объемов экспорта, % год к году	28,3	-19,4	10,1	7,4	29,2
- доля экспорта в производстве, %	19,2	14,4	14,8	14,8	13,2
- доля в мировой торговле, %	0,7	0,5	0,5		
Обеспеченность потребности внутреннего рынка продукцией российского производства					
- объем импорта, тыс. тонн	650	655	840	172	176
- изменение объемов импорта, % год к году	17,2	0,8	28,2	9,0	2,0
- доля отечественной продукции в объеме видимого потребления, %	71,8	74,1	70,5	73,8	80,3

Таблица 1.1 – Сводная таблица показателей развития российского рынка
полимеров пропилена

	2017	2018	2019	I кв. 2019	I кв. 2020
Производственные показатели					
- объем производства, тыс. тонн	1449	1458	1750	364	497
- изменение объемов производства, в % к предыдущему году	0,6	0,6	20,0		36,5
Емкость внутреннего рынка					
- видимое потребление, тыс. тонн	1285	1351	1659	366	415
- изменение видимого потребления, %	-41,3	5,2	22,8	-77,9	13,5
Конъюнктура рынка					
- изменение среднегодовых цен производителей на внутреннем рынке, %	-4,2	13,7	1,5		-18,8
Уровень экспортного потенциала					
- объем экспорта, тыс. тонн	375	338	319	47	143
- изменение объемов экспорта, % год к году	5,3	-9,8	-5,6	-52,6	201,9
- доля экспорта в производстве, %	25,9	23,2	18,2	13,0	28,8
- доля в мировой торговле, %	1,2	1,1	1,0		
Обеспеченность потребности внутреннего рынка продукцией российского производства					
- объем импорта, тыс. тонн	211	232	229	49	61
- изменение объемов импорта, % год к году	6,6	10,1	-1,3	-0,2	24,4
- доля отечественной продукции в объеме видимого потребления, %	83,6	82,9	86,2	86,6	85,3

**Таблица 1.2 – Сводная таблица показателей развития российского рынка
полимеров винилхлорида**

	2017	2018	2019	I кв. 2019	I кв. 2020
Производственные показатели					
- объем производства, тыс. тонн	963	1020	1046	269	283
- изменение объемов производства, в % к предыдущему году	16,9	5,9	2,6		5,0
Емкость внутреннего рынка					
- видимое потребление, тыс. тонн	1021	976	1016	247	263
- изменение видимого потребления, %	-53,4	-4,4	4,1	-75,7	6,6
Конъюнктура рынка					
- изменение среднегодовых цен производителей на внутреннем рынке, %	-4,5	5,8	7,6		-3,3
Уровень экспортного потенциала					
- объем экспорта, тыс. тонн	140,2	191,1	248,8	55,8	58,7
- изменение объемов экспорта, % год к году	20,4	36,3	30,2	2,7	5,3
- доля экспорта в производстве, %	14,6	18,7	23,8	20,7	20,8
- доля в мировой торговле, %	0,9	1,2	1,6		
Обеспеченность потребности внутреннего рынка продукцией российского производства					
- объем импорта, тыс. тонн	199	147	219	33	39
- изменение объемов импорта, % год к году	-27,3	-25,7	48,2	-7,0	17,5
- доля отечественной продукции в объеме видимого потребления, %	80,6	84,9	78,5	86,5	85,2

**Таблица 1.3 – Сводная таблица показателей развития российского рынка
полимеров стирола**

	2017	2018	2019	I кв. 2019	I кв. 2020
Производственные показатели					
- объем производства, тыс. тонн	537	552	550	136	139
- изменение объемов производства, в % к предыдущему году	0,1	2,9	-0,3		1,8
Емкость внутреннего рынка					
- видимое потребление, тыс. тонн	541	546	553	134	135
- изменение видимого потребления, %	-75,3	0,8	1,3	-75,8	0,8
Конъюнктура рынка					
- изменение среднегодовых цен производителей на внутреннем рынке, %	-4,8	10,3	-13,2		-20,5
Уровень экспортного потенциала					
- объем экспорта, тыс. тонн	121	127	136	32	35
- изменение объемов экспорта, % год к году	-6,8	4,7	6,9	16,9	7,2
- доля экспорта в производстве, %	22,6	23,0	24,7	23,9	25,1
- доля в мировой торговле, %	1,0	1,0	1,0		
Обеспеченность потребности внутреннего рынка продукцией российского производства					
- объем импорта, тыс. тонн	127	126	121	138	30
- изменение объемов импорта, % год к году	-0,4	-4,3	14,4	30,0	3,3
- доля отечественной продукции в объеме видимого потребления, %	76,7	77,9	75,0	77,5	77,0

Таблица 1.4 – Сводная таблица показателей развития российского рынка полимеров полиэтилентерефталата

	2017	2018	2019
Производственные показатели			
- объем производства, тыс. тонн	540	550	570
- изменение объемов производства, в % к предыдущему году	1,1	1,9	3,5
Емкость внутреннего рынка			
- видимое потребление, тыс. тонн	646	659	763
- изменение видимого потребления, %	-4,1	1,9	15,8
Уровень экспортного потенциала			
- объем экспорта, тыс. тонн	33	66	12
- изменение объемов экспорта, % год к году	89,5	101,2	-82,3
- доля экспорта в производстве, %	6,0	11,9	2,0
- доля в мировой торговле, %	0,2	0,2	0,2
Обеспеченность потребности внутреннего рынка продукцией российского производства			
- объем импорта, тыс. тонн	139	175	205
- изменение объемов импорта, % год к году	-12,0	25,5	17,5
- доля отечественной продукции в объеме видимого потребления, %	78,5	73,5	73,1

По данным Федеральной службы таможенной статистики, в 2019 году экспорт России составил 424,6 миллиарда долларов США. Доля экспорта продукции химической промышленности увеличилась с 6,1% в 2018 году до 6,4% в 2019 году. В товарной структуре экспорта в страны дальнего зарубежья доля химической продукции также возросла с 5,2% до 5,4%, а в страны СНГ – с 12,8% до 13,3%.

В период с января по март 2020 года экспорт России составил 89,5 млрд долларов США, что на 15% ниже по сравнению с тем же периодом 2019 года. Доля экспорта продукции химической промышленности в общем объеме экспорта увеличилась с 5,8% в январе-марте 2019 года до 6,1% в аналогичном периоде 2020 года.

В товарной структуре экспорта в страны дальнего зарубежья доля химической продукции возросла с 4,9% до 5,0%, а в страны СНГ увеличилась с 12,6% до 14,4%. Однако, несмотря на увеличение доли, фактический стоимостный объем экспорта химических товаров снизился на 10,7%, а физический объем — на 3,6%.

Объемы экспорта удобрений снизились на 4,9%. В то же время положительной динамикой отмечился экспорт пластмассы и изделий из них,

который возрос на 32,0%, а также мыла и моющих средств, увеличившихся на 19,1% [19].

В РФ импорт составил 247 миллиарда долларов США в период 2019 года. Импорт продукции только в хим. Промышленности составила 19,6 %, обогнав предыдущий год на 1,3 %.

Объем импорта химической продукции увеличился на 9,6%, если соотносить с 2018 годом, а объем, в физическом выражении, возрос на 8,3%. Среди различных категорий химической продукции особенно заметен рост поставок: продукты в органической химии увеличились на 16,3%, пластмассовые изделия – на 11,8%, резина возросла на 6,8%.

Таким образом, в 2019 году наблюдается общее увеличение импорта химической продукции в Россию, что может свидетельствовать о растущем спросе на такие товары [19].

В первом квартале 2020 года Россия продолжала сталкиваться с изменениями в структуре импорта, который составил 54,0 млрд долларов США, что на 0,2% меньше по сравнению с аналогичным периодом 2019 года. Процентное соотношение продуктов химической промышленности в общем объеме импорта снизилось, что может указывать на перераспределение предпочтений на рынке или экономические изменения.

В частности, удельный вес химической продукции в общей товарной структуре импорта упал с 19,0% в январе-марте 2019 года до 17,6% в 2020 году. Это снижение также прослеживается в импорте из стран дальнего зарубежья и СНГ. Стоимостный объем импорта химической продукции сократился на 8,0%, в то время как физические объемы увеличились на 0,6%.

Среди отдельных категорий товаров в химической промышленности наиболее заметное снижение наблюдалось в фармацевтической продукции (на 46,8%), что может быть связано с конкурентными предложениями на внутреннем рынке или изменениями в потребительском спросе.

В то же время, некоторые сегменты, такие как удобрения и косметические средства, демонстрировали рост, что может свидетельствовать о повышенном

спросе на эти товары. Увеличение поставок пластмасс и моющих средств также указывает на изменяющиеся потребительские предпочтения и, возможно, на адаптацию рынка к новым условиям.

Такие данные показывают сложную динамику товарного импорта и могут затрагивать самые разные аспекты экономической политики, конъюнктуры и потребительского спроса в России [19].

Продукция химической промышленности действительно занимает важную позицию в российском экспорте, что подтверждается данными Федеральной таможенной службы (ФТС) России. В первом квартале 2020 года экспорт полимеров показал впечатляющий рост на 32% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года, что свидетельствует о развитии данного сегмента несмотря на сложности на мировом рынке [19].

Российский экспорт по-прежнему, как правило, состоит из продукции низкого передела, включая минеральные удобрения и синтетические каучуки. В то же время, импорт химической продукции гораздо разнообразнее и охватывает больше товаров с высокой добавленной стоимостью. Это демонстрирует дисбаланс между экспортом и импортом: Россия пока не может полностью обеспечить внутренний спрос на пластмассы и изделия из них.

Тем ни менее, в последние годы наметилась положительная тенденция в развитии отечественного производства. Запуск новых предприятий, ориентированных на импортозамещение, способствует укреплению позиций на внутреннем рынке. Это может снизить зависимость от иностранных поставок и улучшить торговый баланс в химической промышленности [19].

1.1.1 Анализ рынка крупнотоннажных синтетических полимеров РФ и мира

Исследование рынка полимеров этилена представляет собой важную и актуальную тему, учитывая растущую роль пластмасс в различных отраслях. Ниже рассматриваются виды полимеров этилена и их характеристики.

Полиэтилен (ПЭ)

Полиэтилен является одним из самых распространенных и потребляемых полимеров в мире. Он может быть классифицирован по различным признакам, включая метод получения и плотность.

Полиэтилен высокого давления (ПВД, LDPE)

- **Плотность:** до 0.94 г/см^3
- **Характеристики:** обладает высокой гибкостью и прозрачностью. Имеет хорошую электрическую изоляцию и химическую стойкость. Обычно используется в упаковочных материалах и пленках.

Полиэтилен низкого давления (ПНД, HDPE)

- **Плотность:** более 0.94 г/см^3
- **Характеристики:** обладает высокой прочностью и жесткостью. Это делает его идеальным для изготовления бутылок, контейнеров, труб и других изделий, требующих высокой механической прочности.

Линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭ, LLDPE)

- **Плотность:** также до 0.94 г/см^3
- **Характеристики:** имеет лучшие механические свойства по сравнению с ПВД благодаря линейной структуре. Используется в производстве пленок, упаковок и гибких контейнеров.

Модификации полиэтилена

Существуют различные модификации полиэтилена, расширяющие его функциональность:

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ, UHMWPE)

- **Характеристики:** обладает высокой прочностью, стойкостью к износу и химической устойчивостью. Используется в медицинских имплантатах, защитном оборудовании и инструментах для тяжелых условий эксплуатации.

Сверхнизкомолекулярный полиэтилен (ULDPE)

- **Характеристики:** имеет очень низкую плотность, обеспечивает отличные характеристики гибкости и прочности, применяется в упаковочных материалах.

Металлоценовой линейный полиэтилен (мцЛПЭ, mLLDPE)

- **Характеристики:** обеспечивает уникальные механические свойства и улучшенную прозрачность. Используется в высококачественной упаковке.

Специализированные и функционализированные сополимеры этилена

К этой группе относятся различные сополимеры, которые придают полиэтилену новые свойства.

Сополимеры этилена с винилацетатом (ЭВА, EVA)

- **Характеристики:** обладают хорошей эластичностью и адгезией. Используются в обувной промышленности и для производства пленок.

Сополимеры этилена с этилакрилатом (ЭЭА, EAA)

- **Характеристики:** обладают отличными адгезионными свойствами и используются в клеевых составах и упаковочных материалах.

Сополимеры этилена с акриловой кислотой (ЭАК)

- **Характеристики:** используются в качестве эмульгаторов и стабилизаторов в различных продуктах.

Хлорированные полиэтилены (ХПЭ, CPE)

- **Характеристики:** обладают хорошей устойчивостью к воздействию химикатов и климатическим условиям. Используются в производстве кровельных материалов и труб.

Полимеры пропилена (ПП):

- **Гомополимеры (ПП-гомо, PP-H):** получают только из пропилена, устойчивы к воздействию химикатов и имеют хорошую механическую прочность.
- **Блок-сополимеры пропилена с этиленом (ПП-блок, PP-B):** состоят из блоков пропилена и этилена, что придает им гибкость и улучшает ударопрочные свойства.
- **Статистические сополимеры пропилена (ПП-рандом, PP-R):** содержат случайные блоки пропилена и этилена, что делает их более гибкими и ударопрочными, чем гомополимеры.

- **Полиизобутилен:** Полимеризуется из изобутилена, обладая отличными барьерными свойствами и эластичностью.

Полимеры винилхлорида (ПВХ):

- **Суспензионный ПВХ (ПВХ-С):** Основная форма, используется для производства жестких изделий.
- **Эмульсионный ПВХ (ПВХ-Э):** используется для производств мягких пластикатов и пленок.

Полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ):

- **Высоковязкий ПЭТ-гранулят:** используется для производства бутылок и преформ.
- **Пленочный ПЭТ:** применяется для изготовления упаковочных пленок.
- **Волоконный ПЭТ:** применяется для производства текстильных волокон и нитей, обладая высокой прочностью и долговечностью.

Эти полимеры находят широкое применение в различных отраслях, включая упаковку, строительство, автомобилестроение и текстиль [19].

1.1.2 Сортировка крупнотоннажных синтетических полимеров, используемых в ЦБП

Для эффективного отделения полимеров от загрязнений и нежелательных материалов, а также для достижения однородности отходов, действительно применяются различные технологии. Рассмотрим подробнее представленные методы и некоторые дополнительные аспекты:

1. **Магнитная сепарация:** Этот метод направлен на извлечение железосодержащих материалов. Он эффективно используется для удаления металлических загрязнений из потока отходов, что обеспечивает защиту оборудования и улучшает качество конечного продукта.
2. **Электростатический метод:** используется для отделения цветных металлов, включая алюминий. При этом применяется различие в электрических свойствах материалов, что позволяет выделять их с высокой степенью чистоты.

3. **Воздушная сепарация:** С помощью циклонных паросепараторов осуществляется разделение материалов на основе их плотности и массы.

4. **Флотация:** Процесс основан на различном удельном весе полимеров и отходов. В гидроциклонах происходит поднятие легких фракций на поверхность, благодаря созданию пузырьков с воздухом.

Данные технологии обычно применяются совместно, что повышает эффективность переработки отходов и понижает негативное воздействие на окружающую среду [20-21].

Гидроциклоны:

Во-первых, скорость потока в гидроциклонной системе значительно выше, что позволяет обрабатывать большие объемы материала и достигать более высокой производительности. Это особенно важно при переработке промышленных отходов или в процессе рециклинга, где необходимо быстро и эффективно разделять различные компоненты.

Во-вторых, как упоминалось, загрязнение полимеров в процессе работы гидроциклона является незначительной проблемой. Это связано с тем, что центробежные силы более эффективно разделяют компоненты по физическим свойствам, что позволяет получить более чистые фракции полимеров.

При работе с n -компонентной смесью, как отмечено, требуется $(n - 1)$ этапов разделения. Это означает, что для отделения, например, трех полимеров (ПС, ПЭТ, ПВХ) потребуется два этапа, каждый из которых будет включать отдельные гидроциклоны, настроенные на различные параметры разделения.

Гидроциклоны также могут быть использованы для отделения полиолефинов от твердых бытовых отходов, а также для разделения ПЭТ от ПЭ, ПП и бумаги, что делает их универсальным инструментом в области переработки и рециклинга [20-21].

Система разделения полимерной пленки и тары по цвету, использующая фотоэлектрические датчики, представляет собой эффективный механизм для сортировки пластиковых отходов. Упомянутые классы позволяют разделять материалы на основе их химического состава и цвета, что важно для дальнейшей

переработки:

- Класс 1 – ПЭВП и ПП;
- Класс 2 – ПЭТ и ПВХ;
- Класс 3 – ПЭВП различного цвета.

Системы сортировки пластмасс, использующих околокритические жидкости представлены на рисунке 1.

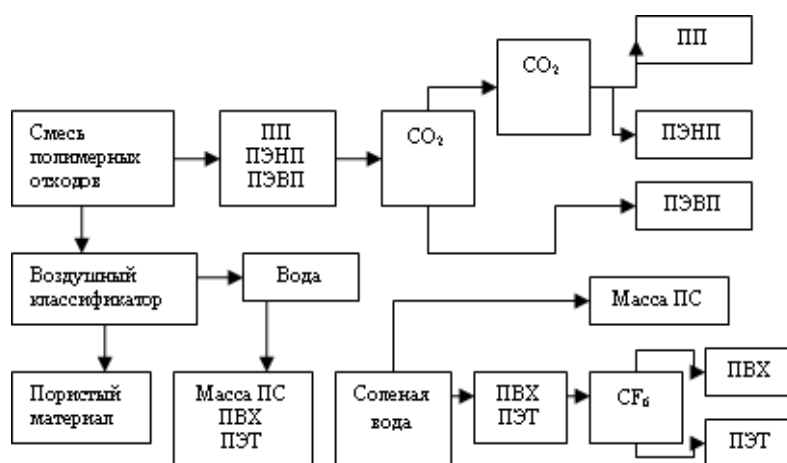


Рис. 1 - Обзор предложенных систем сортировки пластмасс, использующих околокритические жидкости

1.2 Полимерные твердые коммунальные отходы в окружающей среде

Полимерные твердые коммунальные отходы, такие как пластиковые изделия и упаковка, представляют собой серьезную проблему для экологии. Их разложение может занимать сотни лет, и накопление таких отходов приводит к множеству негативных последствий:

1. **Блокировка дренажных систем** – пластиковые отходы могут застревать в трубах и каналах, что приводит к наводнениям и другим проблемам с отводом воды.
2. **Выброс токсичных газов** – при разложении полимеров или их сжигании могут образовываться токсичные вещества, которые негативно сказываются на качестве воздуха.
3. **Умерщвление водной биоты** – пластиковые отходы в водоемах могут

причинять вред морским животным, которые их путают с пищей, или запутываются в них, что может привести к травмам или смерти.

4. Влияние на здоровье людей – присутствие микропластика в окружающей среде и его возможность проникать в пищевую цепочку вызывает беспокойство из-за потенциального воздействия на здоровье человека [22-25].

Проблема переработки полимерных твердых коммунальных отходов стала одной из наиболее актуальных экологических задач современности. С начала 70-х годов XX века обнаруженные скопления пластиковых отходов в океане, известные как «пластиковые острова», обращают на себя внимание ученых и общественности [26-33].

1.2.1 Негативные последствия накопления полимерных ТКО

Фотодеградация полимеров в водной среде приводит к образованию микропластиков [22], которые могут попадать в пищевые цепи различных организмов, включая рыбу, морских млекопитающих и водоплавающих птиц. Этот процесс особенно заметен в поверхностной пленке воды, где полимеры подвергаются воздействию солнечного света, ультрафиолетового излучения и других факторов. Помимо фотодеградации, полимеры также могут распадаться в результате механических и химических процессов, что приводит к образованию всё более мелких частиц. Эти микропластики представляют собой серьёзную экологическую проблему, поскольку они не только загрязняют окружающую среду, но и могут накапливаться в организмах, вызывая различные последствия для здоровья животных и, следовательно, для экосистем в целом и человека.

Микропластики представляют собой серьёзную угрозу для водной экосистемы и здоровья живых организмов. Они не только физически загрязняют среды обитания, но и способствуют накоплению и распространению токсичных веществ [34-35]. При взаимодействии с органическими загрязнителями, такими как полихлорированные дибензодиоксиды, ДДТ и полициклические ароматические углеводороды, микропластики могут действовать как переносчики, увеличивая биодоступность этих опасных соединений для водных обитателей. Совокупное

воздействие этих токсичных веществ на живые организмы может вызывать различные проблемы, начиная от острых токсических реакций и заканчивая долгосрочными последствиями, такими как гормональные нарушения, нарушения репродуктивной системы, а также увеличивающийся риск развития различных заболеваний [36].

Современные методы очистки океанов от пластика все еще находятся на стадии разработки и применения в ограниченных масштабах [37].

1.2.2 Переработка полимерных ТКО

Для эффективной переработки полимерных ТКО, необходимо уделить отдельное внимание сортировке [36].

Хорошо организованная система сбора и сортировки полимерных твердых коммунальных отходов способствует замедлению деградации окружающей среды и уменьшению потребности в первичном сырье, таком как нефть. Рециклирование полимеров позволяет использовать уже существующие материалы для производства новой продукции, тем самым снижая объемы отходов и экономя ресурсы [38, 39]. Это не только помогает сохранить природные ресурсы, но и снижает углеродный след, связанный с производством новых пластиковых изделий. Кроме того, переход на замкнутый цикл переработки полимеров может стимулировать развитие новых технологий и улучшение экономических показателей в промышленности. Около 4% уменьшения не возобновляемых ресурсов, таких как нефть и газ, можно достичь при оптимизации производства первичных полимеров, также, 3–4% можно сэкономить на энергии, необходимой для этого процесса. Это подчеркивает важность внедрения более эффективных технологий и ресурсов с точки зрения устойчивого развития и минимизации воздействия на окружающую среду [40].

Производство новых полимерных изделий из твердых коммунальных отходов включает в себя как физические, так и химические процессы переработки. Физические методы, такие как плавление, позволяют вторично использовать

материалы, сохраняя их молекулярную структуру. Этот подход значительно распространён в странах Европейского Союза, где внедрены эффективные системы сбора и переработки отходов [41-42].

Переработка полимерных твердых коммунальных отходов (ТКО) в энергию с использованием термических методов становится все более актуальной и востребованной практикой в управлении отходами. Основная проблема, связанная с выбросом токсичных веществ при такой переработке, решается благодаря развитию технологий и повышению их безопасности. Это позволяет использовать термические методы без значительного вреда для окружающей среды и здоровья человека

Например, в Японии в 2005 г. «был пересмотрен Закон об утилизации отходов, в котором было сказано, что образование полимерных отходов должно быть сокращено, а образующиеся полимерные отходы не должны попадать на свалку, так как они пригодны для получения тепла» [41]. «После этого в 2006 г. была принята поправка к Закону об утилизации тары и упаковки, включающая, при определенных ограничениях, возможность их использования в качестве полноценного топлива — “Refuse Derived Fuel” (**RDF**) и других форм полимерных твердых коммунальных отходов, пригодных для термической обработки, как признанного метода переработки в дополнение к иным способам» [38]. «С тех пор переработка полимеров с помощью термических методов существенно возросла, учитывая особенно тот факт, что ПЭ, ПП и ПС имеют высокий энергетический потенциал, делая их ценным топливом» [37]. «Кроме того, среди производителей целлюлозы появился спрос на бумажное и полимерное топливо — “Refuse Paper & Plastic Fuel” (**RPF**) в качестве альтернативы обычному» [37, 38].

«RDF-топливо изготавливают из ТКО после их измельчения и обработки для сепарации элементов, которые невозможно сжечь, как например стекло или металлы. В итоге, получается топливо, которое целесообразно использовать в котельных установках и на ином энергетическом оборудовании с целью получения тепловой энергии» [36].

RPF-топливо, изготавливают преимущественно из отходов бумаги и полимеров, что делает его более специализированным продуктом. Такой подход позволяет минимизировать количество отходов, отправляемых на свалки, и способствует утилизации вторичных материалов, что имеет положительное влияние на экологию [36].

RPF, как правило, состоит из переработанных отходов, в отличие от RDF, который может включать в себя биомассу и природные материалы. Это может повлиять на тепловые характеристики материалов во время их хранения и транспортировки.

Тем не менее, важно отметить, что, хотя RPF не выделяет тепло в процессе хранения, факторы, как трение и сжатие во время транспортировки, могут приводить к нагреву, что действительно повышает риск возгорания или даже взрыва. Особенно это актуально при неправильном обращении с топливом или отсутствием необходимых мер безопасности.

Для минимизации рисков важно следить за условиями хранения и перевозки RPF, обеспечивать адекватную вентиляцию и контролировать температуру. Также следует учитывать возможность механических повреждений и трения, которые могут возникнуть в процессе транспортировки [43-44].

1.2.3 Жизненный цикл полимерных ТКО и его оценка

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) является полезным инструментом для анализа энергетических затрат и экологического воздействия различных методов переработки полимерных твердых коммунальных отходов (ТКО). Этот подход позволяет оценить последствия на всех этапах: от добычи сырья и производства до использования и утилизации. Жизненный цикл полимерных ТКО показан на рисунке 1.1.

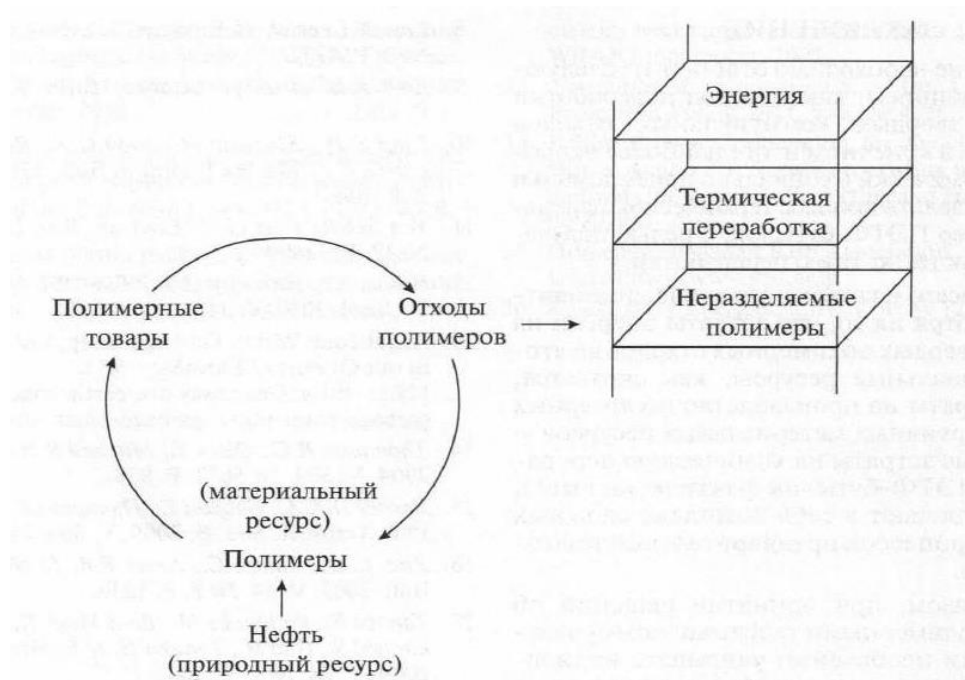


Рис. 1.1 - жизненный цикл полимерных ТКО

Таблица 1.5 - Сравнение энергетических затрат, необходимых для переработки отходов ПЭТФ различными методами (по Yamashita M., Matsumoto S., 2014)

Метод переработки/вид манипуляции	Количество энергии, кДж/т
Сбор отходов	196 635
Термическая переработка	327 034
Производство RDF	1 594 041
Производство ПЭТФ-хлопьев	5 766 115
Производство вторичных материальных ресурсов, пригодных для изготовления бутылок методом химической деградации	30 593 359

1.3 Углеродный след

1.3.1 Углеродный след как индикатор воздействия на климатическую систему

Анализ углеродного следа позволяет выделить основные источники выбросов парниковых газов, что помогает в разработке стратегий снижения воздействия на климат. Углеродный след можно классифицировать по

различным критериям, среди которых:

1. По этапам жизненного цикла:

Прямые выбросы: возникают непосредственно в результате деятельности организации, например, при сжигании топлива на собственных предприятиях;

Косвенные выбросы от потребления энергии: связаны с производством электроэнергии, которую потребляет организация;

Другие косвенные выбросы: включают все остальные выбросы, связанные с деятельностью компании, такие как выбросы в ходе цепочки поставок, при утилизации продукции и т.д.

2. По секторам экономики:

Энергетический сектор (выбросы от сжигания ископаемого топлива);

Транспорт (выбросы от автомобилей, авиации и т.д.);

Промышленность (выбросы от производственных процессов);

Сельское хозяйство (метан от животных, выбросы от использования удобрений и т.д.);

Отходы (сбор и утилизация мусора).

3. По регионам:

Глобальный уровень: суммарный углеродный след по всему миру;

Национальный уровень: углеродный след конкретной страны;

Местный уровень: углеродный след отдельных городов или регионов.

Для эффективного снижения углеродного следа важно проводить детальный анализ всех этих аспектов, что позволит выявить наиболее значимые источники выбросов и разработать целенаправленные меры по их сокращению [45].

1.3.2 Международные соглашения в сфере предотвращения климатических изменений и задачи РФ

В настоящее время вопрос изменений климата активно обсуждается экспертами, учеными и политиками, и требует значительных усилий со стороны различных государств. Один из признанных подходов к его решению

— это сценарий низкоуглеродного экономического развития, который входит в рамки устойчивого развития. Этот подход предполагает возможность значительного замедления процесса глобального повышения температуры на поверхности Земли и ее постепенное возвращение к уровням, характерным для доиндустриальной эпохи. [45].

Считается, что для достижения намеченной цели к 2050 году необходимо сократить глобальные выбросы CO₂ вдвое по сравнению с уровнем 1990 года, что позволит снизить их концентрацию в атмосфере до 450 ppm. Для выполнения этих задач необходимо полное внедрение низкоуглеродных технологий в энергетических секторах, включая разработку новых методов улавливания и хранения углерода, использование возобновляемых источников энергии, развитие атомной энергетики, а также уменьшение энергопотребления при производстве и потреблении товаров [45].

Глобальное климатическое соглашение, принятое в декабре 2015 года в Париже, заменило Киотский протокол и продолжает работу над целями низкоуглеродного экономического развития. Его основная цель — ограничение роста средней температуры до 2°C, с возможностью снижения этого порога до 1,5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем. Участники соглашения добровольно берут на себя обязательства по сокращению выбросов парниковых газов до 2030 года, при этом отказ от ископаемых видов топлива не является обязательным. В течение указанного периода страны, ратифицировавшие соглашение, сами решают, какие меры предпринять для снижения углеродных выбросов и адаптации к климатическим изменениям, вне зависимости от уровня их экономического развития [45].

Россия также участвует в данном соглашении и ориентирует свои усилия на развитие системы государственного регулирования для снижения парниковых выбросов. Ключевую роль в этом процессе играет учет и мониторинг объемов этих выбросов со стороны организаций. Наша страна утвердила концепцию создания системы мониторинга отчетности и проверки объемов выбросов парниковых газов. Эта система направлена не только на

сокращение выбросов, но и на повышение энергетической эффективности производства. На первоначальном этапе реализации данного механизма планируется осуществление в субъектах Федерации мероприятий по разработке методической и нормативно-правовой базы для инвентаризации предприятий-источников, которые выбрасывают не менее 150 тысяч тонн CO₂-эквивалента в год. В дальнейшем будет введена обязательная углеродная отчетность для предприятий с объемом выбросов свыше пятидесяти тысяч тонн. Также это правило коснется транспортных компаний, осуществляющих авиаперевозки, а также морских, речных и железнодорожных перевозок. Этот подход позволяет максимально эффективно использовать потенциал сокращения парниковых выбросов в регионах, обладающих экологическими ресурсами, способными поглощать вредные выбросы [45].

Тем не менее, с целью уменьшения выбросов парниковых газов Россия не собирается ограничивать потребление углеводородного топлива и планирует сохранить текущую структуру производства. Ожидается, что решение проблемы будет достигнуто благодаря более эффективным технологиям эксплуатации угля и метана, а также привлечению дополнительных ресурсов экосистем, которые используют газообразные углеводороды [45].

1.4 Отходы целлюлозно-бумажной промышленности

1.4.1 Виды и общий объем отходов ЦБП

Согласно данным глобального отраслевого анализа, целлюлозно-бумажная промышленность генерирует порядка 17% от общего объема мировых отходов. Предприятия данного сектора оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду, выражающееся в загрязнении атмосферного воздуха, водных ресурсов и почв. При этом на долю макулатурных отходов и утилизированной картонной продукции приходится приблизительно 26% твердых коммунальных отходов, направляемых на полигонное захоронение. Результаты компаративного

анализа отходообразования в рамках конкретной транснациональной корпорации продемонстрировали существенный вклад целлюлозно-бумажного производства в совокупный объем твердых отходов, что актуализирует необходимость разработки специализированной платформы для реализации стратегических экологических инициатив [46-54].

Технологический процесс целлюлозно-бумажных предприятий характеризуется образованием гетерогенных твердых отходов и шламов на различных производственных стадиях. Первичное отходообразование происходит в ходе лесозаготовительных работ, с последующей генерацией отходов на этапах целлюлозного производства и бумагообработки. Кроме того, значительное количество различных типов отходов возникает в процессе химической рекуперации, очистки сточных вод и производственных методов, которые включают переработку бумаги. В числе факторов, влияющих на виды и объемы создаваемых отходов в целлюлозно-бумажной отрасли, выделяются тип производственного процесса и используемые технологии очистки сточных вод. К отходам целлюлозно-бумажного комбината относятся остатки древесины и коры, частицы песка, черный щелок и осадки сточных вод [53-61]. Неорганические шламы извлекаются на станции химической регенерации и в основном состоят из известково-кальцитового шлама, шлаковой крупы и остатков зеленого щелока [62-64].

В зависимости от производственной мощности и технологии варки целлюлозы на целлюлозно-бумажных предприятиях ежегодно образуется значительное количество летучей золы. Согласно отчету, подготовленному в Финляндии, ежегодный объем выбрасываемой золы составляет 240 000 тонн. В качестве примера, в Канаде на ЦБК образуется 1 млн. тонн в год отходов из биомассы. В общем и целом, отходы ЦБК отрицательно влияют на экологию и несут угрозы для здоровья людей и окружающей среды. Наибольшее воздействие на окружающую среду оказывает процесс варки и отбелики целлюлозной массы [57-60].

Одним из основных отходов на ЦБК является черный щелок. Помимо щелока, также образуются отходы: опилок, шлама, макулатуры и золы [65-69].

1.4.2 Потенциальные загрязнители из отходов ЦБК

В целлюлозно-бумажной промышленности образуются разнообразные сложные органические и неорганические отходы. В атмосферный воздух в процессе производственного цикла происходит выброс вредных оксидов азота и сернистых соединений. Также, техническая вода (сточные воды) содержит хлористые соединения. Отходы на предприятиях могут быть как в газообразном виде, так в жидком и твердом. Основные виды вредных веществ: сероводород, сульфид натрия, сера, диоксид хлора, медь, железо, медь. Данные виды отходов являются крайне токсичными и оказывают негативное влияние на здоровье и качество жизни людей [70-73]. Помимо этого, выбросы наносят вред водным объектам и растительности [70-74].

1.4.3 Отходы производства упаковочного материала в целлюлозно-бумажной промышленности

Вторичная переработка бумаги по определению наиболее эффективный способ уменьшить негативное воздействие использования бумаги на окружающую среду. Для промышленности переработанные волокна являются незаменимым источником сырья, поддерживая эффективность использования ресурсов в отрасли.

Бумага и картон — это устойчивый, возобновляемый и экологически безопасный материал для упаковки, поскольку бумага и картон пригодны для вторичной переработки. На практике пригодность упаковочной продукции для вторичной переработки будет определяться составом и дизайном (покрытием), а также способом их сбора, сортировки и представления на переработку. Гофрированные изделия легко поддаются вторичной переработке.

Бумага и картон - самый перерабатываемый упаковочный материал. Более 80% бумажной и картонной упаковки утилизируется для вторичной переработки.

Бумага для вторичной переработки собирается главным образом для использования в производственных процессах и используется в качестве альтернативы первичным материалам, например древесной массе. По мере развития общества для него находят различные применения, которые иногда требуют изменений в их функциональности. Это делается, чтобы увеличить срок службы изделия за счет создания барьеров для влаги или газа.

Это часто достигается путем объединения волокнистой подложки с другим материалом, оснащенным композитной многослойной ламинацией, обеспечивающей такие свойства, как водонепроницаемость или газовый барьер. Эти изменения могут создать проблемы для переработки, а в некоторых случаях могут увеличить затраты на переработку и удаление отходов. В некоторых случаях они также могут привести к повреждению технологического оборудования или снижению качества готовой продукции [75].

В основе деятельности НПАО «Светогорский ЦБК» — производство и продажа офисной и офсетной бумаги, химико-термомеханической массы, а также картона для упаковки пищевых продуктов. Упаковка часто необходима для предотвращения отходов. Одним из видов упаковочного материала является упаковочная бумага с покрытием. Бумага с покрытием из полиэтилена, полипропилена, сополимера, микровоска либо композицией на основе латексов синтетического каучука для упаковывания пищевых продуктов на автоматах, мороженого, продукции медицинской, фармацевтической и парфюмерно-косметической промышленности.

Важно, чтобы упаковка не превращалась в отходы. А также нужна гарантия, что упаковка станет частью экономики замкнутого цикла, ее дизайн должен быть полностью многоразовым, пригодным для вторичной переработки или компостирования. Так, в процессе переработки упаковочного материала в виде упаковочной бумаги с покрытием остается большое количество обрезков, которые требуют переработки [76].

2 Теоретический подход к решению проблемы

В настоящее время в России и во всем мире существует серьезная проблема с утилизацией промышленных отходов. На целлюлозно-бумажных предприятиях накапливается значительное количество твердых отходов, а переработка смешанных бумажных отходов, которые также содержат синтетические полимеры, иногда приводит к образованию не утилизируемых остатков в системах очистки сточных вод. Одним из самых распространенных типов таких сложных отходов являются упаковочные материалы типа Тетра-Пак [77], которая может быть отнесена к целлюлозным композиционным материалам (ЦКМ). На конец 2018 года мировой объем производства многослойной упаковки для жидких пищевых продуктов превысил 200 миллиардов штук (примерно 40 миллионов тонн). Однако лишь около 25% от общего объема упаковки было переработано. Это связано с отсутствием полностью экологически безопасных и экономически жизнеспособных технологий для комплексной утилизации отходов таких многослойных бумажных ламинированных материалов [77 – 79].

В России каждый год образуется свыше 280 тыс. тонн упаковочных отходов типа Тетра-пак, из которых, например, в 2017 году было переработано лишь 5 тыс. тонн, что составляет всего 3%. В том же году Гринпис инициировал мировой экологический тренд на уменьшение производства и потребления полиэтилена. Таким образом, повторное использование и переработка упаковки являются ключевыми тенденциями, которые продолжают развиваться в обозримом будущем [78 – 80].

Кроме отходов, связанных с предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности, имеется большое количество древесных отходов, возникающих в процессе деревообработки (таких как кора и опилки), которые требуют утилизации с целью получения полезной тепловой энергии. Для совместной переработки твердых древесных отходов и отходов производства ламинированного упаковочного картона, содержащего синтетические полимеры, необходимо рассмотреть все возможные технологии для выполнения данной цели.

2.1 Древесные топливные брикеты

В отличие от традиционного сжигания дров, брикеты и пеллеты обладают явными преимуществами, включая более высокую теплоту сгорания [81], что видно из представленной ниже таблицы 2.

Таблица 2 - Теплотехнические характеристики различных видов топлива

Вид топлива	Теплота сгорания (МДж)	Плотность (кг/м ³)	Удельный вес (кг/д)	Влажность, %	Энергетическая плотность (ГДж/м ³)
Каменный уголь	15-25	1300-1500	1,3-1,5	1-12	-
Бурый уголь	14-22	1200-1500	1,2-1,5	30-40	-
Дрова (берёза)	10	650	0,65	12	9,8
Пеллеты древесные	18,4	650 - 1000	0,65-1	8-12	12-18
Древесная щепа	10	290	0,29	50-60	2,9
Брикет из опилок лиственницы	18-19	1300	1,3	2-4	26,0
Торфобрикеты	14,9	400-650	0,4-0,65	1-18	-
Природный газ	35-38 МДж/м ³	0,68-0,85	0,0068-0,0085	-	-
Древесноугольный брикет	34,3	798	0,798	1,8	27,4
Костра конопли	18,0-18,5	113-170	0,113-0,170	4-5	2,0-3,2

Преимущества древесных топливных брикетов по сравнению с другими видами твёрдого топлива [82]:

1. Теплотворная способность брикетов составляет 18-19 МДж/кг, что превышает показатели дров и сопоставимо с пеллетами и некоторыми углями.
2. В отличие от дров, брикеты не требуют предварительного высушивания.
3. Брикеты при горении выделяют минимальное количество дыма и не «стреляют» или искрят.

4. Долговременное горение брикетов позволяет значительно реже загружать их в топку.

5. Брикеты из древесины позволяют поддерживать статичную температуру в окислительных процессах.

6. Древесные брикеты имеют крайне низкую зольность, как правило, она составляет от 0,5 до 1%.

7. Брикеты занимают меньше места при хранении и транспортировке: тонна брикетов (примерно 1 м³) эквивалентна 3–4 м³ дров, что значительно снижает расходы на перевозку и хранение.

8. Удобная упаковка (чаще всего по 10 кг) позволяет легко загружать и хранить брикеты вручную в гараже, подвале, кладовке или на балконе.

9. Стоимость брикетов ниже, чем стоимость пеллет, поскольку требования к сырью для их производства менее строгие, а оборудование для брикетирования обходится дешевле, что снижает общую себестоимость.

10. Котлы и камины для брикетов просты в обслуживании и не требуют специальных условий для хранения и автоматической подачи топлива, что делает их более доступными в сравнении с пеллетными печами.

11. Брикеты могут использоваться в обычных печах любого типа и могут заменить другие виды твёрдого топлива (уголь, дрова) без необходимости модернизации оборудования; при этом их всегда можно заменить на дрова, что невозможно для пеллет. Поэтому производители пеллетных котлов стали предлагать комбинированные модели, работающие как на пеллетах, так и на дровах и брикетах.

12. При сгорании топливных брикетов выбросы углекислотного газа в атмосферу минимальны.

13. Брикеты могут долго храниться без ухудшения их качества и негативного влияния на окружающую среду, а также повышают безопасность труда обслуживающего персонала котельных.

Древесные топливные брикеты являются экологически чистым продуктом, изготовленным без использования химических добавок и клеящих веществ, только

из натуральных древесных отходов, которые не подвергались химической обработке. Лигнин, содержащийся в древесине, служит связующим материалом. Брикеты удобнее для подачи в топочную камеру по сравнению с дровами и углем. Они быстро разгораются, горят долго и равномерно. Плотность брикетов в среднем в два раза выше плотности древесины, что позволяет экономить пространство, и они идеально подходят как для бытового, так и для промышленного использования. Этот продукт удобен и чист, способствует экономии места для хранения и позволяет держать необходимый запас топлива прямо в котельной. При сжигании брикеты не наносят вреда окружающей среде и воздухозабирающим помещением. Они практически не выделяют дыма, копоти, угарного газа и других вредных веществ, в отличие от дров и угля [82].

2.2 Совместное сжигание биотоплива и каменного угля

Существует два основных подхода к использованию промышленных пеллет для выработки энергии. Первый заключается в полном переходе тепловых электростанций (ТЭС) на пеллеты в качестве топлива, что называется моносжиганием. Второй – это смешанное использование пеллет в качестве дополнительного топлива наряду с основным.

Малые и средние ТЭС чаще всего работают исключительно на пеллетах или другой биомассе. В то же время на крупных ТЭС пеллеты сжигаются совместно с углем и другими видами топлива, что называется совместным сжиганием (Co-Firing). Этот подход позволяет снизить выбросы углекислого газа, серы и оксидов азота за счет замены части угля на биомассу. Кроме того, возможность легко вернуться к чистому углю делает эту технологию менее рискованной для владельцев станций. В последнее время крупные ТЭС все чаще начинают добавлять древесные пеллеты для сжигания наряду с углем [83].

Существует несколько различных методов совместного сжигания биомассы, включая древесные топливные гранулы (пеллеты). Эти методы можно классифицировать на три категории: прямое, не прямое и параллельное сжигание. Прямое сжигание подразумевает одновременную подготовку, измельчение и

подачу угля и биомассы в котел. Непрямое сжигание включает в себя отдельные этапы подготовки и измельчения биомассы. Параллельное сжигание происходит в отдельном котле. Метод газификации заключается в первичной газификации биомассы, после чего генераторный газ подается в котел; этот способ подходит для влажного сырья, такого как древесная щепа [83]. Схема электростанции с комбинированным сжиганием угля и биотоплива представлена на рисунке 2.

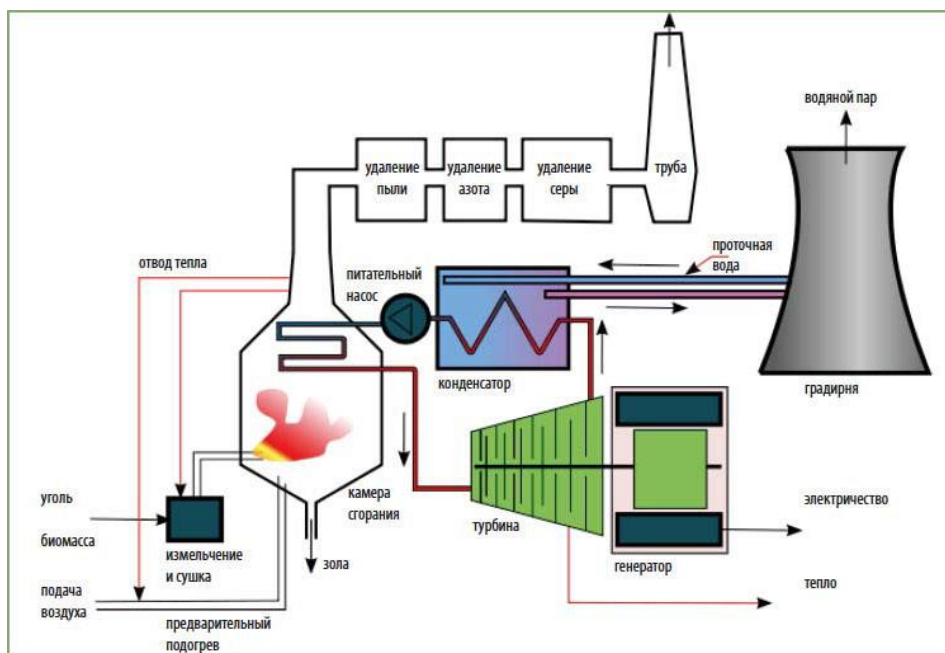


Рис. 2 - Схема электростанции с совместным сжиганием угля и биотоплива

Схема подачи биомассы и угля на ТЭС представлена ниже на рисунке 2.1.

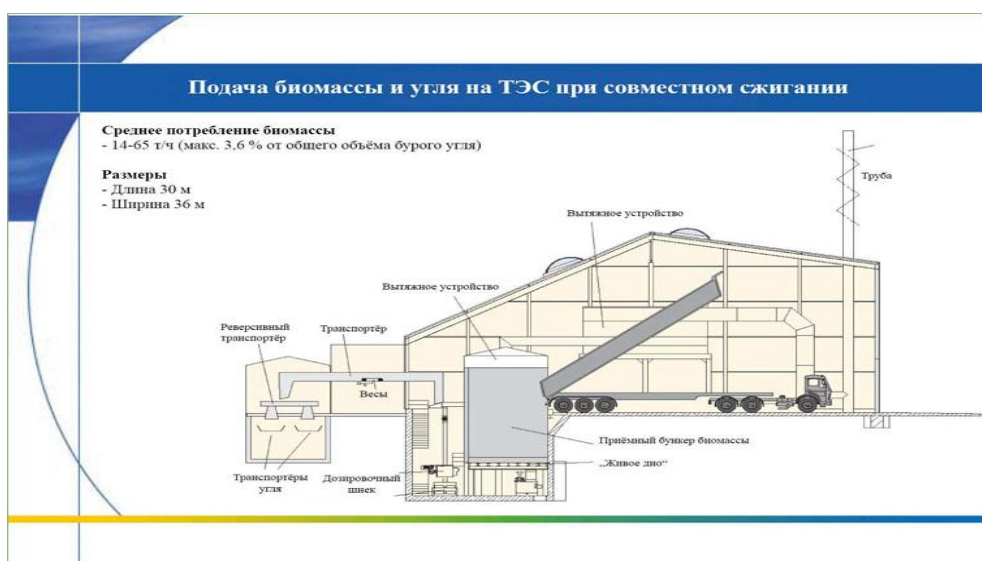


Рис. 2.1 - Схема подачи биомассы и угля на ТЭС

2.2.1 Станции, работающие на совместном сжигании угля и биотоплива

Avedore Power Station

Станция расположена в пригороде Копенгагена, столицы Дании. Оператор Dong Energy управляет ТЭЦ Avedore, на которой установлены два реакторных блока. Эти блоки обеспечивают теплом около 200 тысяч домохозяйств и генерируют 1,4 миллиона кВт·ч электроэнергии. Для работы станции используются как каменный уголь, так и биомасса. Уголь поступает морскими судами с грузоподъемностью до 5 тысяч тонн на терминал выгрузки, аналогично поступают и пеллеты. Для разгрузки имеется кран с грейферным захватом и пневматический кран. Затем уголь транспортируется по конвейеру на открытую площадку, а пеллеты отправляются в хранилища. В станции функционируют два энергоблока. Первый, блок №1, предназначен для сжигания угля, но запланирована его модернизация для работы на биомассе. Второй блок, блок №2, уже использует биомассу. ТЭЦ Avedore 2 начала свою работу в 2001 году и оборудована котлом компании BWE (BURMEISTER & WAIN ENERGY A/S). Этот котел имеет возможность использовать газ, нефть и биотопливо, включая солому и пеллеты. В год блок потребляет около 400 тысяч тонн пеллет, а также сжигает около 130 тонн угля в час с теплоотдачей 7000 ккал/кг. При полном переходе на биомассу можно достичь примерно 70% мощности котла, которую можно было бы получить при сжигании угля. Avedore 2 использует два котла: один работает на соломе, а другой на газе, нефти и пеллетах. Получаемый пар приводит в действие совокупную турбину. Кроме того, для покрытия пикового спроса на электроэнергию предусмотрена дополнительная газовая турбина, тепло от которой используется для подогрева воды в остальных двух котлах. Блок, работающий на соломе, вырабатывает 40 МВт электроэнергии и 50 МВт тепловой энергии [83].

Drax Power Station

Электростанция Drax – это вторая по величине угольная электростанция в Европе после польской Belchatow. Она производит 24 ТВт·ч электроэнергии, с годовой эмиссией CO₂, достигающей 22,8 миллиона тонн, и выпуском золы в 1,5

миллиона тонн ежегодно. Максимальное потребление угля составляет 36 тысяч тонн в день, что примерно равно 9 миллионам тонн в год. Уголь добывается как в Великобритании, так и за границей, в основном из Австралии, Колумбии, Польши, России и Южной Африки. Импортируется уголь морским транспортом и доставляется к электростанции по железной дороге. На станции используется специальная карусельная разгрузка, позволяющая не останавливать составы. Уголь загружается в один из 30 бункеров, каждый из которых вмещает по 1 тысяче тонн. Эти бункеры кормят две из 60 углеизмельчительных дробилок, каждая из которых может перерабатывать до 36 тонн угля в час в пылеобразное состояние. Также на станции установлены шесть котлов Babcock, в которые пылеобразный уголь поступает от десяти дробилок и разжигается с помощью пропана. Каждый из шести котлов вырабатывает пар для турбин. Установленная мощность каждого блока составляет 660 МВт, а общая мощность шести блоков – 3960 МВт. В резерве имеются шесть газовых турбин по 75 МВт, три из которых в последнее время не используются [83].

Совместное сжигание на ТЭЦ было впервые реализовано летом 2004 года, и это событие ознаменовало собой запуск первой ТЭЦ в Великобритании, использующей древесную биомассу в виде щепы из местной ивы (14 тыс. тонн). В настоящее время станция ставит цель увеличить долю биомассы до 12,5% от общего объема топлива. В настоящий момент она сжигает разнообразные виды твердой биомассы, в основном древесные гранулы, гранулы из подсолнечной лузги, оливковые косточки, арахисовую шелуху и другие материалы. Большая часть биомассы поступает из-за границы морским транспортом [83].

На станции используется подача биомассы напрямую в котел без предварительного измельчения, минуя угольные дробилки. Кроме биомассы для совместного сжигания применяется и ПЕТСОКЕ – петрококк. Испытания проводились в период с 2005 по 2007 год, в ходе которых в один из котлов подавалось 85% каменного угля и 15% петрококка. Это позволило снизить себестоимость выработки электроэнергии и уменьшить выбросы.

Что касается выбросов, Drax Group является крупнейшим источником CO₂ в Великобритании с объемом выбросов 22,16 миллиона тонн, а также предполагаемой самой высокой эмиссией оксидов азота (NO_x) в ЕС. Для снижения выбросов был заключен контракт с концерном Siemens на модернизацию паровых турбин станции в течение четырех лет [83].

Amercentrale Power Station

Amercentrale (Электростанция Amer, принадлежащая компании Essent) – это тепловая электростанция, принадлежащая голландскому энергетическому концерну Essent. На ТЭЦ используется технология совместного сжигания угля и биомассы, преимущественно древесных пеллет. Она включает два блока, которые в сумме вырабатывают 1245 МВт электроэнергии и 600 МВт тепловой энергии. ТЭЦ играет важную роль в обеспечении южных Нидерландов как электричеством, так и теплом для отопления жилых и производственных объектов, включая теплицы. В настоящее время предусмотрено строительство дополнительного блока мощностью 800 МВт, также для совместного сжигания угля и биомассы [83].

На сегодняшний день электростанция Amercentrale является лидером в Европе по использованию биомассы. В её процессе сжигается в среднем 35% биомассы и 65% угля. В планы входит увеличение доли биомассы до 50%, а в перспективе – до 95%, оставляя лишь 5% на нужды растопки.

Древесные топливные гранулы (пеллеты) для этой ТЭЦ поставляет крупнейший в мире завод, построенный компанией RWE — одним из совладельцев Essent — в американском городе Уэйкросс, штат Джорджия (инвестиции составили 120 миллионов евро). Годовая мощность этого завода достигает 750 тысяч тонн пеллет. ТЭЦ ежегодно использует 1 миллион тонн биомассы. Essent тщательно следит за происхождением биомассы, применяя специальный стандарт Зеленый Золотой для закупки твердой биомассы (включая древесные пеллеты и косточки оливы). Зеленый Золотой Лейбл представляет собой независимый знак качества. Требования Золотого стандарта должны проверяться организациями, аккредитованными по стандартам ООН в области экологии и климатических

изменений. К 2011 году 75% потребляемой биомассы соответствовало Зеленому Золотому стандарту. Для сравнения, в 2006 году этот показатель составлял всего 33%, в 2007 — 48%, в 2008 — 68%, а в 2009 — 73% [83].

2.3 Топливный брикет, содержащий отходы ЦБП

Если с утилизацией древесных отходов дело обстоит достаточно просто, то с переработкой смешанных отходов целлюлозно-бумажной промышленности ситуация значительно сложнее. Пользование вторичным волокном на мировом уровне уже давно превзошло использование первичного волокна, что наблюдается в таких странах, как Китай, Япония и в ряде государств Западной Европы. Имеющиеся на ЦБК отходы производства, содержат в своем составе элементы опасные для здоровья людей и окружающей среды. Поэтому для их обработки часто прибегают к захоронению на полигонах, что, безусловно, негативно сказывается на экологии, так как такие отходы, как правило, не поддаются биоразложению.

Для производства целлюлозно-бумажных материалов обычно используются многотоннажные полимеры, такие как полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП) и полиэтилентерефталат (ПЭТ или ПЭТФ). Их сжигание в брикетах, например, не вызывает серьезных проблем. Однако в некоторых случаях также присутствует поливинилхлорид (используемый в виниловых обоях, обложках тетрадей и т.д.), сжигание которого при высоких температурах может привести к образованию токсичных соединений, таких как диоксины и фураны. [84].

Диоксин считается одним из самых опасных ядов, известных человечеству. Это один из самых мощных антропогенных токсинов, который отличается высокой устойчивостью, долго остается в окружающей среде и живых организмах, а также передается по пищевым цепям, оказывая продолжительное воздействие на живые организмы. Даже в дозах, значительно меньших, чем те, которые могут вызвать острое отравление (для человека минимальная токсичная доза составляет 0,5–1 мкг/кг), диоксин может преобразовывать ряд синтетических и природных веществ в опасные яды для организма [84-86].

Изучение природы диоксинов находится на стадии развития. Эти вещества формируются при высоких температурах (от 600 до 1200 °С) из углеводородов в присутствии галогенов, и процесс их образования обратим. В настоящее время исследованы лишь хлористые диоксины, которые, например, можно найти в поливинилхлориде. Это приводит к усложнению процесса утилизации отходов целлюлозно-бумажного производства, так как хлорсодержащие компоненты часто встречаются в процессах отбеливания целлюлозы с использованием хлора и в переработке макулатуры [84 – 86].

Исходя из вышесказанного, следует учесть наличие поливинилхлорида в составе исходного сырья при производстве комбинированного брикета. В малых концентрациях ПВХ не вызывает трудностей с утилизацией.

2.4 Отбеливание целлюлозы и её вредоносные компоненты для процесса сжигания

Кислородно-щелочная обработка

В настоящее время является делигнифицирующей ступенью отбеливания для технологии ECF и TCF. Метод КЩО предложен в 1955 году В.М. Никитиным и Г.Л. Акимом и основан на окислении лигнина кислородом в щелочной среде. При этом возможно удаление из целлюлозы до 95% лигнина, однако такая глубокая делигнификация приводит к значительной деструкции целлюлозы. Поэтому на практике ограничивают степень делигнификации до 50...70%, а для уменьшения разрушения углеводного комплекса вводят стабилизаторы (соединения магния). КЩО обеспечивает следующие преимущества по сравнению с традиционной отбеливкой: уменьшение химических потерь, снижение общего расхода хлора на отбеливание, более глубокое удаление смолистых веществ, отбеливание костры, возможность использования отработанных растворов в системе регенерации, снижение объема и токсичности сточных вод, экономическую эффективность [87].

Отбелка ECF и TCF

Современная отбелка ECF хвойной целлюлозы (без применения кислородно-щелочной делигнификации) обычно проводится в пять ступеней: Д0-(ЩОП)-Д-(ЩП)-Д, где: Д0 – делигнифицирующая ступень отбелки диоксидом хлора; ЩОП – щелочение с кислородом и пероксидом водорода; Щ – щелочение; ЩП – щелочение с пероксидом водорода; Д – отбелка диоксидом хлора. В случае применения кислородно-щелочной делигнификации после варки (перед отбелкой) схема отбелки сокращается на одну ступень: Д-ЩОПД-Д. Расходы химикатов на отбелку без КЩО составляют: диоксид хлора (в ед. активного хлора) – 86 кг/т, H_2O_2 – 7 кг/т, NaOH – 25 кг/т. Введение кислородно-щелочной обработки значительно сокращает расход реагентов: ClO_2 (в ед. активного хлора) – 39 кг/т, H_2O_2 – 3 кг/т, NaOH – 15,5 кг/т. Для отбелки сульфатной лиственной целлюлозы применяются те же схемы, что и для хвойной. Однако расходы реагентов ниже, а зачастую сокращается число ступеней отбелки. Для примера – отбелка лиственной целлюлозы на Светогорском ЦБК проводится по схеме: Д-ЩОП-Д. Расходы: ClO_2 – 12...18 кг/т, H_2O_2 – 3 кг/т, NaOH (на щелочение) – 14 кг/т. Перед отбелкой проводится кислородно-щелочная обработка. Отбелка TCF не получила большого распространения. В мире без хлора и его соединений отбеливают около 5% целлюлозы. Отбелка TCF значительно дороже, чем ECF отбелка и не дает больших экологических преимуществ. Схемы отбелки TCF обычно содержат ступени КЩО, обработки озоном и пероксидом водорода. Например, КЩО-ОЗ-Q-ПО; КЩОQ-ОП-ОЗ-Q-ПО [87].

2.5 Предложенная технология по совместной утилизации твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги.

Для решения этой проблемы предлагается применять топливные брикеты второго поколения, изготовленные из твердых древесных остатков и отходов производства ламинированной упаковочной бумаги, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры. Эти материалы будут измельчены с помощью дробилки и затем сожжены в котлоагрегате с низкотемпературной вихревой топкой,

разработанной В.В. Померанцевым (НТВ-топка) [88]. Это позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей и повышение максимальной энергетической и экономической эффективности, а также, существует возможность полезного использования тепловой энергии в виде тепла дымовых газов или перегретого пара для технологических процессов на целлюлозно-бумажных производствах.

Основными достоинствами данного метода являются:

- 1) Использование данных отходов в качестве биотоплива позволит получить большое количество тепловой энергии, которые предприятие может использовать на собственные нужды;
- 2) Данный метод позволяет избежать долгосрочного гниения отходов, которые находясь на местах складирования выделяют вредные выбросы, без получения какой-либо полезной энергии;
- 3) Позволит обеспечить экологическую, энергетическую и экономическую безопасность РФ, а также позволит приблизиться к достижению поставленных правительством целей по переходу к углеродной нейтральности.

Особенность данного метода заключается в использовании комбинированного сырья, в состав которого входит целлюлоза и синтетические полимеры. При определенных условиях у полимерных компонентов древесины и синтетических полимеров проявляются свойства термовлагопластичности, что улучшает процесс формирования топливного брикета.

Гидрофильность достаточного объема древесины позволяет удерживать необходимое количество влаги в брикете, а переход синтетического полимера из стеклообразного состояния в высоко эластическое под воздействием температуры увеличивает прочность и плотность полученного брикета [89].

2.6 Исходное сырье

В качестве используемого сырья ЦБП были взяты отходы, образующиеся в процессе производства ламинированной упаковочной бумаги, изготовленной в учебной лаборатории кафедры ТЦКМ (рис. 2.2).



Рис. 2.2 - Отходы ламинированной бумаги

Данный вид отходов содержит в своем составе 50% полиэтилена марки 11503-070 низкой плотности и высокого давления.

В качестве древесных отходов – была выбрана древесная мука опилок лиственницы с исходной влажностью 30 %.

2.7 Описание используемой энергоустановки

Для эффективного сжигания комбинированного брикета на промышленных мощностях требовалось подобрать наилучшее энергооборудование, способное обеспечить максимальную экологическую, энергетическую и экономическую эффективность при использовании этого типа топлива.

В работе, в качестве примера, был выбран котлоагрегат БКЗ 75-39 ФБ с НТВ топкой Померанцева [88]. Котел БКЗ 75-39 ФБ имеет следующие номинальные расчетные параметры, указанные в таблице 2.1 [90].

Таблица 2.1 – Номинальные расчетные параметры котла БКЗ 75-39 ФБ

Наименование параметра	Значение	Ед. измерения
Паропроизводительность	75	т/ч
Давление перегретого пара	40	бар
Температура перегретого пара	440	°С
Температура питательной воды	145	°С
Температура уходящих газов	120	°С
Температура горячего воздуха	290	°С
Температура холодного воздуха	30	°С

2.7.1 Описание котла БКЗ 75-39 ФБ

БКЗ 75-39 ФБ изготовлены Барнаульским котельным заводом в середине 1960-х годов (рисунок 2.3). Проектным топливом котлов являются кузнецкие каменные угли марки ССР. В качестве растопочного и резервного топлива используется мазут марки м-100 [91, 92].

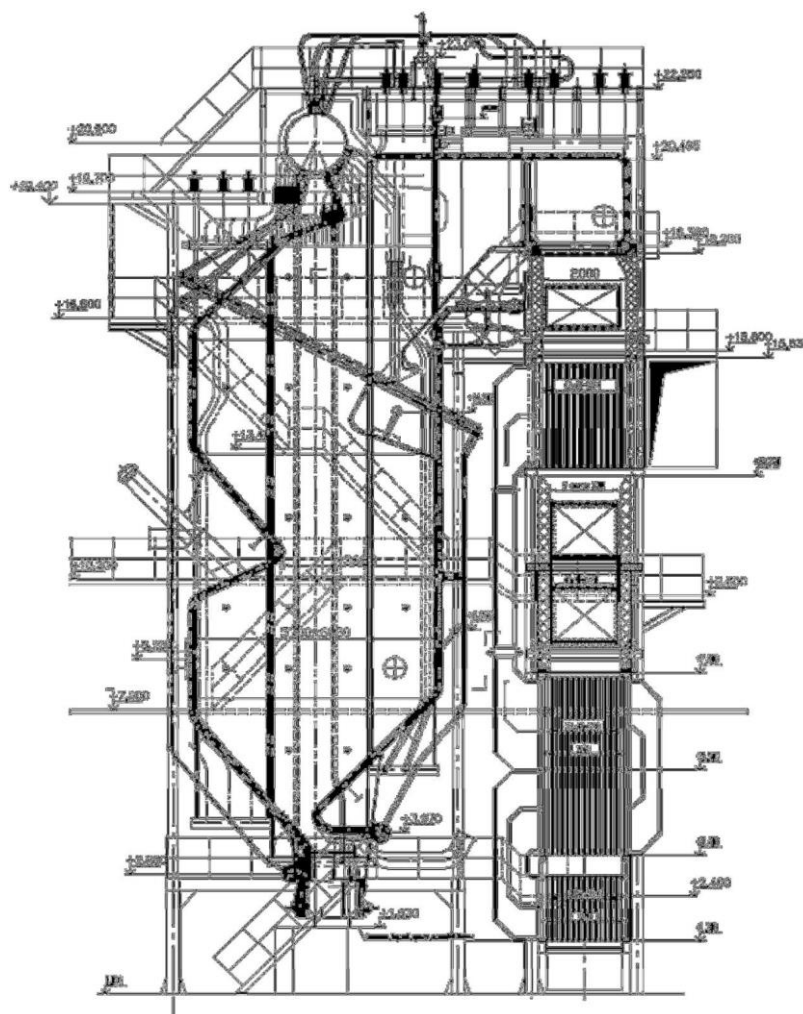


Рис. 2.3 - Общий вид котла БКЗ 75-39 ФБ с НТВ-топкой

Внутренняя часть котла состоит из:

- Топочной камеры, сконструированной по НТВ-технологии. Трубы фронтного и заднего экранов в нижней части образуют холодную воронку, а в верхней части трубы заднего экрана собираются в камеры, откуда пароводяная смесь по отводящим трубам, образующим фестон, направляются в барабан котла.

- Пароперегреватель: на котле установлен радиационный и конвективный пароперегреватель. Радиационный пароперегреватель размещен на потолке топочной камеры. Конвективная поверхность размещена в поворотном газоходе. «Холодные» пакеты и потолочная часть пароперегревателя изготовлены из труб 38x4, сталь марки 20; горячие пакеты из труб 38x4,5, сталь марки 12x80. Пароперегреватель имеет две ступени регулирования температуры перегрева пара. Регулирование осуществляется с помощью регуляторов впрыска. Регуляторы расположены в следующих местах: первая ступень — за «холодным» пакетом

пароперегревателя; вторая ступень – за последними пакетами «горячей» части пароперегревателя. На впрыск подается питательная вода с температурой 215 градусов.

- Конвективная шахта: конвективная шахта представляет собой опускной газоход котла с размещенными в нем в рассечку поверхностями нагрева экономайзера и воздухоподогревателя. Поверхности нагрева, кроме верхнего водяного экономайзера с каркасом не обвязаны. Экономайзер и воздухоподогреватель имеют по 2 ступени каждый [92].

Способ НТВ сжигания и топочное устройство было разработано советским ученым-теплоэнергетиком В.В.Померанцевым [88].

Принцип низкотемпературного вихревого сжигания заключается в организации низкотемпературного сжигания грубо измельченного твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камере сгорания [91].

В НТВ-топке предусмотрены две основные зоны: аэродинамическая вихревая зона горения и прямоточная зона догорания. В отличие от традиционных технологий пылеугольного сжигания, где основная часть топлива (до 95 %) сжигается в небольшой первой зоне, вихревая топка использует значительно больший объем топочного пространства. Это приводит к снижению максимальной температуры в вихревой топке на 100–300 °С, а активная аэродинамика обеспечивает равномерное распределение температуры в объеме вихревой зоны (см. рисунок 2.4). Отсюда и название — низкотемпературный вихрь [91].

При этом горящий поток поднимается из холодной воронки вдоль фронтального экрана и зажигает факел непосредственно у корня. За счет такой аэродинамики повышается надежность воспламенения и устойчивость топочного процесса, расширяется диапазон регулирования. Область стока вихря смещена к заднему экрану, в ней при развороте потока происходит эффективная сепарация, способствующая многократной циркуляции топлива внутри топки.

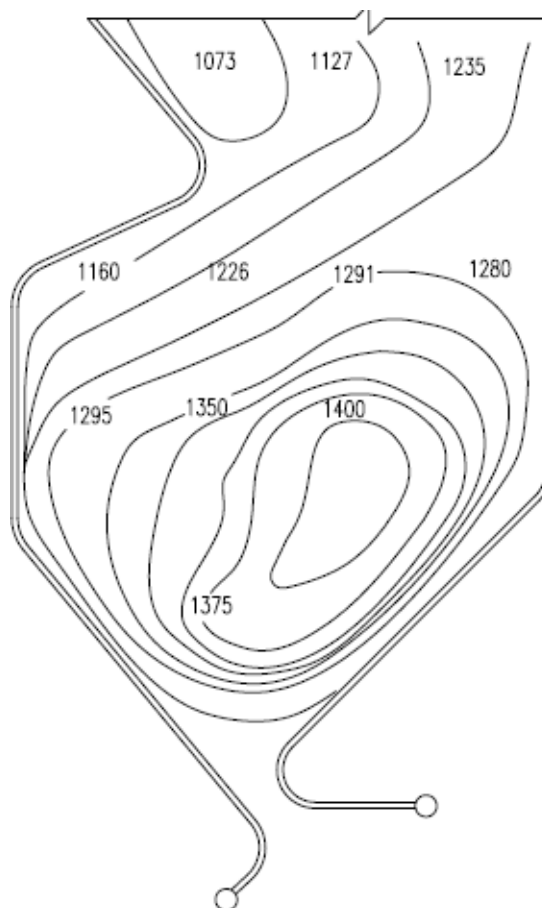


Рис. 2.4 - Температурные поля в топке котла при НТВ сжигании

Пониженная температура в активной зоне горения, а также, поэтапный подвод воздуха, многократная циркуляция частиц топлива и повышение содержания золы в совокупности способствуют улучшению характеристик НТВ-топок по выбросам вредных веществ, таких как оксиды азота и серы, а также повышают эффективность работы оборудования для улавливания золы в котлоагрегате [91].

Одним из основных преимуществ технологии сжигания НТВ является ее невысокая чувствительность к изменениям характеристик топлива. Это позволяет унифицировать топку для различных типов топлива и осуществлять сжигание разных видов твердого топлива в одном агрегате. Технология НТВ была успешно протестирована на множестве твердых топлив, включая бурые и каменные угли, торф, горючие сланцы, отходы деревообработки и продукты микробиологического производства.

Достоинства НТВ-сжигания

Применение НТВ-технологии позволяет [88, 91]:

- упростить систему подготовки топлива, увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;
- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от "подсветки" факела газом или мазутом даже при сжигании низкосортных топлив;
- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;
- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15...20 %;
- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;
- обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 30...50 %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20...40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO -содержащих добавок.

2.8 Необходимые теплотехнические расчеты

Для успешной реализации предложенного способа, был проведен ряд теплотехнических расчетов [93] приведённых в приложениях 1, 2.

Коэффициент избытка воздуха в газовом тракте котельного агрегата. Учет рециркуляции газов

Для вычисления фактических объемов продуктов сгорания в газоходах котельного агрегата сначала необходимо определить коэффициент избытка воздуха в верхней части топки (α_t) и присосы воздуха ($\Delta\alpha$) на отдельных

поверхностях нагрева. Коэффициент избытка воздуха должен обеспечить практически полное сгорание топлива и выбирается в зависимости от вида сжигаемого топлива и типа топочного устройства. При заданном α_t избыток воздуха, попадающий в зону горения через горелки, равен $\alpha_{гор} = \alpha_t - \Delta\alpha_t$. В газоплотных топках, работающих под давлением, засосы воздуха в топку отсутствуют ($\Delta\alpha_t = 0$).

В системах пылеприготовления, функционирующих под разрежением, также наблюдаются засосы воздуха ($\Delta\alpha_{пл}$), которые поступают в горелки вместе с транспортирующей средой для топлива. Средние значения засосов воздуха в замкнутых системах пылеприготовления, работающих под разрежением и с прямым поддуванием пыли в топку, составляют $\Delta\alpha_{пл} = 0,04$. Коэффициент избытка горячего воздуха ($\beta_{гв}$), подаваемого через горелки, должен быть уменьшен на величину засосов, таким образом: $\beta_{гв} = \alpha_{гор} - \Delta\alpha_{пл}$.

Засосы воздуха в газопроводах парового котельного агрегата устанавливаются в соответствии с справочными данными. Избыток воздуха за каждой поверхностью нагрева после топочной камеры (α_i) вычисляется путем добавления к α_t соответствующих засосов воздуха, т.е.

$$\alpha_i = \alpha_t + \sum_1^1 \Delta\alpha_i.$$

В расчётах объемов и энтальпий продуктов сгорания в газовом тракте учитывается рециркуляция газов, начиная с точки их ввода в газоход котельного

агрегата и заканчивая местом отбора.
$$\Gamma = \frac{V_{рц}}{V_{г.отб}},$$
 где $V_{рц}$ и $V_{г.отб}$ - объём газов, отбираемых на рециркуляцию, и остающийся объём за местом отбора газов, $\text{м}^3/\text{кг}$ топлива.

Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания

По общепринятой методике объемы сгоревших газов и воздуха указываются в кубических метрах при стандартных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.) для сжигания 1 кг твёрдого или жидкого топлива или 1 м^3 газообразного топлива.

Для твердых и жидких видов топлива расчёт теоретических объемов воздуха (в м³ на кг) и продуктов сгорания (при $\alpha = 1$) выполняется на основании состава рабочей массы топлива согласно следующим формулам: теоретический объем воздуха, м³/кг:

$$V_B^o = 0,0889 \cdot (C^r + 0,375) + 0,265 \cdot H^r - 0,0333 \cdot O^r;$$

теоретические объемы продуктов сгорания, м³/кг:

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^r + 0,375 \cdot S_{p+o}^r);$$

$$V_{NO_2}^o = 0,79 \cdot V_B^o + 0,008 N^r;$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111 \cdot H^r + 0,0124 \cdot W_t^r + 0,0161 \cdot V_B^o;$$

$$V_r^o = V_{RO_2} + V_{H_2O}^o + V_{H_2O}^o.$$

Реальные объемы продуктов сгорания вычисляются на основе среднего коэффициента избытка воздуха α_{cp} на теплопередающих поверхностях, который равен полусумме значений на входе и выходе, м³/кг.

Объем водяных паров

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161(\alpha_{cp} - 1) V_B^o.$$

Полный объем газов

$$V_r = V_r^o + 1,0161(\alpha_{cp} - 1) V_B^o.$$

Безразмерная концентрация золовых частиц в потоке дымовых газов определяется по формуле:

$$\mu_{zl} = \frac{A^r a_{yh}}{100 G_r},$$

где a_{yh} - доля золы, уносимая потоками газов; для камерных топок с твердым шлакоудалением $a_{yh} = 0,95$; G_r - масса дымовых газов на килограмм топлива, при сжигании твердого топлива и мазута составляет

$$G_r = 1 - 0,01A^r + 1,306 \alpha_{cp} V_B^o, \text{ кг/кг.}$$

Дальнейшие расчеты представляли из себя следующие этапы:

- Тепловой баланс котлоагрегата;
- Расчет топочной камеры;

- Расчет фестона;
- Расчет конвективного пароперегревателя;
- Расчет водяных экономайзеров 1 и 2 ступеней;
- Расчет воздухоподогревателей 1 и 2 ступеней.

По окончании теплового расчета котлоагрегата, представленного в приложении 1 к данной работе, необходимо было провести аэродинамический расчет (приложение 1) и расчет вредных выбросов в атмосферу при работе энергоустановки на заданном топливе (приложение 2), а также, технико-экономическое обоснование (приложение 4).

2.9 Обоснование выбранного метода

Для реализации поставленной цели и решения проблемы утилизации ныне не утилизируемых отходов ЦБП, данный метод был выбран с экологической и энергетической точки зрения. Твердые древесные отходы и отходы производства ламинированной бумаги целесообразно перерабатывать в комбинированный топливный брикет высокой плотности по особой технологии. Топливо в виде брикетов удобнее транспортировать до места их непосредственного сжигания. Готовый брикет, поступив к котельному оборудованию, подвергается размолу в дробленку с помощью специально установки вблизи котлоагрегата для дальнейшего сжигания в котле БКЗ 75-39 ФБ с низкотемпературной вихревой топкой. Выбор НТВ технологии позволит добиться следующих целей [88]:

- упростить систему подготовки топлива, увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;
- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от «подсветки» факела газом или мазутом даже при сжигании низкосортных топлив;
- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;
- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15...20 %;

- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;
- обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 30...50 %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20...40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO -содержащих добавок.

Все это дает в совокупности высокий энергетический и экономический эффект, а также, значительно повышает экологическое благополучие окружающей среды. Помимо этого, существует возможность полезного использования тепловой энергии в виде тепла дымовых газов или перегретого пара для целлюлозно-бумажных производств.

3 Экспериментальная часть

Экспериментальная часть была выполнена в стенах СПбГУПТД, с использованием лабораторного технического оборудования.

Этапами проведения экспериментальной части данной работы были:

- Измельчение отходов ламинированной бумаги до мелкой фракции, с помощью мельничной установки;
- Проведение ситового анализа для определения гранулометрического состава сырья;
- Определение влажности исходного сырья и его высушивание с помощью влагомера AND MF-50;
- Формирование навески с различными композициями сырья;
- Пропарка полученной смеси насыщенным паром в течение определенного временного промежутка для достижения необходимой влажности;
- Формирование топливного брикета в лабораторных условиях с помощью автоматизированного пресса (INSTRON-1121) при различных температурных и влажностных условиях;
- Исследование упруго-релаксационных свойств смесей древесного компонента и отходов ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры;
- Определение плотности и прочности полученных образцов при определенных условиях формирования брикета;
- Определение конечной влажности и зольности рабочей массы топлива;
- Определение низшей теплоты сгорания (теплотворной способности) топлива с помощью лабораторной установки, состоящей из калориметрической бомбы и калориметра;
- Определение химического состава полученного брикета;

- Проведение теплотехнических расчетов, с целью определения энергетической, экономической и экологической эффективности.

3.1 Подготовка исходного сырья

Перед началом проведения экспериментов, было необходимо подготовить исходное сырье. На рисунке 3 представлен первоначальный вид отходов ламинированной бумаги.



Рис. 3 - Отходы ламинированной бумаги перед их подготовкой к эксперименту

Первым этапом при подготовки исходного сырья – являлся процесс измельчения материала с помощью лабораторной дисковой мельницы, представленной на рисунке 3.1.



Рис. 3.1 Дисковая мельница

Далее, было необходимо провести ситовый анализ, полученных измельченных отходов. Для корректного определения гранулометрического состава топлива, использовалось 20 грамм полученного материала. Данный материал пропусклся через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек: R_{5000} , R_{2000} , R_{1000} , R_{500} . Полученные результаты сводятся в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты проведения ситового анализа отходов ламинированной бумаги

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R_{5000}	6,5	1,3
R_{2000}	7,5	1,5
R_{1000}	39	7,8
R_{500}	41	8,2
Остаток на поддоне	6	1,2
Сумма	100	20

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что размер большей части полученных частиц ламинированной бумаги, находился в пределах от 1000 до 500 мкм. Размер фракций древесной муки находится в пределах 250 – 500 мкм, результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты проведения ситового анализа древесной муки

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R ₁₀₀₀	0	0
R ₅₀₀	31,5	5,2
R ₂₅₀	41	8,2
R ₁₀₀	26	6,3
Остаток на поддоне	1,5	0,29
Сумма	100	20

Различный размер фракций древесной муки и отходов ламинированной бумаги – не является негативным фактором для проведения эксперимента, наоборот, исходя из литературных данных, различные размеры композиционных материалов, в том числе и различные длины волокон, способствуют улучшению прочностных свойств получаемых композитов [94].

Следующим шагом подготовки сырья являлся процесс формирования навески смеси двух видов сырья в различных композициях общей массой – 2 грамма.

Для того, чтобы получить корректные эмпирические данные в процессе проведения эксперимента, необходимо было выровнять влажности двух видов сырья. Для этого использовалось специальное устройство – влагомер ANDMF – 50, представленный на рисунке 3.2.



Рис. 3.2 Влагомер ANDMF – 50

Древесные отходы и отходы ламинированной бумаги были высушены до 3,3 % влажности.

С целью выявления зависимости изменения влажности сырья в различных композициях от времени пропарки и приданию материалам свойств термовлагопластичности, была проведена паровая обработка. Образцы подвергались воздействию насыщенного пара в течение определенного временного промежутка. Экспериментальным путем была установлена зависимость изменения влажности исходного материала от времени пропарки у различных композиций сырья, данные приведены на рисунке 3.3.

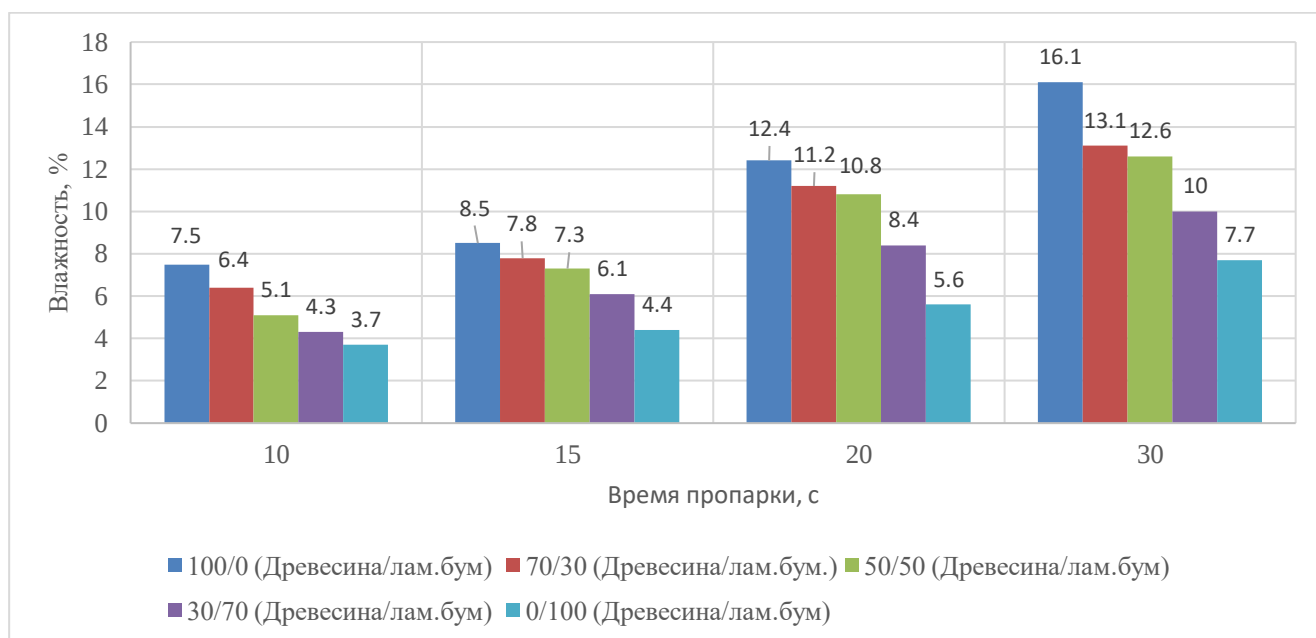


Рис.3.3 – Зависимость влажности сырья от времени пропарки

В результате проведения эксперимента и построения диаграммы были выявлены следующие зависимости:

1. При композиции 100/0% (древесина/лам.бумага) линейная функция имеет вид $W = 2,97 \cdot \tau + 3,7$; $R^2 = 0,9504$; (1)
2. При композиции 70/30% (древесина/лам.бумага) линейная функция имеет вид $W = 2,35 \cdot \tau + 3,75$; $R^2 = 0,9761$; (2)
3. При композиции 50/50% (древесина/лам.бумага) линейная функция имеет вид $W = 2,6 \cdot \tau + 2,45$; $R^2 = 0,9857$; (3)

4. При композиции 30/70% (древесина/лам.бумага) линейная функция имеет вид $W = 1,94 \cdot \tau + 2,35$; $R^2 = 0,9957$; (4)

5. При композиции 0/100% (древесина/лам.бумага) линейная функция имеет вид $W = 1,32 \cdot \tau + 2,05$; $R^2 = 0,9459$, (5)

где W – влажность исходного сырья, %; τ – время пропарки сырья, с; R^2 – коэффициент аппроксимации.

3.2 Формирование топливного брикета

Данный этап эксперимента заключался в процессе формирования топливного брикета с различными композициями сырья, из заранее подготовленных образцов. Формирование брикета осуществлялось с помощью цилиндрической пресс-формы (рисунок 3.4) на испытательной установке Instron1121 при скорости деформирования $V = 100\text{мм/мин}$ и различных значениях влажности и температуры.



Рис. 3.4 - Пресс-форма

В качестве автоматизированного прессы был использован прибор Instron1121, представленный на рисунке 3.5, установленный в лаборатории кафедры ТЦКМ, университета СПбГУПТД ВШТЭ.



Рис 3.5 - Instron1121

Данная установка позволяет прессовать брикеты высокой плотности и с высокой силой сжатия. Помимо этого, можно определить упруго-релаксационные свойства смеси древесных полимерных компонентов и синтетических полимеров, а также, параметры, обуславливающие экструдирруемость смеси. Возможность изучить влагопластичность древесного компонента и термопластичность синтетических полимеров.

Ход проведения опытов состоял из следующих этапов:

1. Полученная смесь в различных композициях сырья (0/100%, 50/50%, 100/0%) загружалась в цилиндрическую пресс-форму;
2. Формирование брикета производилось под нагрузкой 4500 Н до установления стабилизации прямой на графике прибора;
3. В процессе прессования производился замер температуры пресс-формы с помощью термопары;
4. Извлечение брикета из пресс-формы и замер конструктивных параметров (диаметр и высота) для дальнейшего определения плотности полученного брикета;

5. Определение прочности полученного брикета с давлением на поперечное сечение брикета при скорости деформации $V = 100 \text{ мм/мин}$;
6. Анализ влияния температуры и влажности на физико-механические параметры полученного брикета.

3.3 Результаты эксперимента по определению плотности и прочности брикета

По результатам проведения эксперимента по определению плотности и прочности комбинированных брикетов с различными композициями сырья при различных теплотехнических характеристиках (температура, влажность), были получены следующие результаты, приведенные в таблицах 3.2, 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты определения физико-механических параметров полученных брикетов при $t = 20^\circ\text{C}$

Композиции брикетов, %	Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
100/0 (древесные отходы/лам.бумага)	10	7,5	680	4,6	0
	15	8,5	650	5,7	0
	20	12,4	640	8,1	0
50/50 (древесные отходы/лам.бумага)	10	5,1	720	2,4	50
	15	7,3	710	3,9	50
	20	10,8	700	4,5	50
0/100 (древесные отходы/лам.бумага)	10	3,7	800	1,5	0
	15	4,4	790	1,9	0
	20	5,6	780	2,1	0

Ниже представлен график (рис. 3.6) зависимости средних значений плотности полученных брикетов от влажности при температуре 20 °С во всех трех композициях.

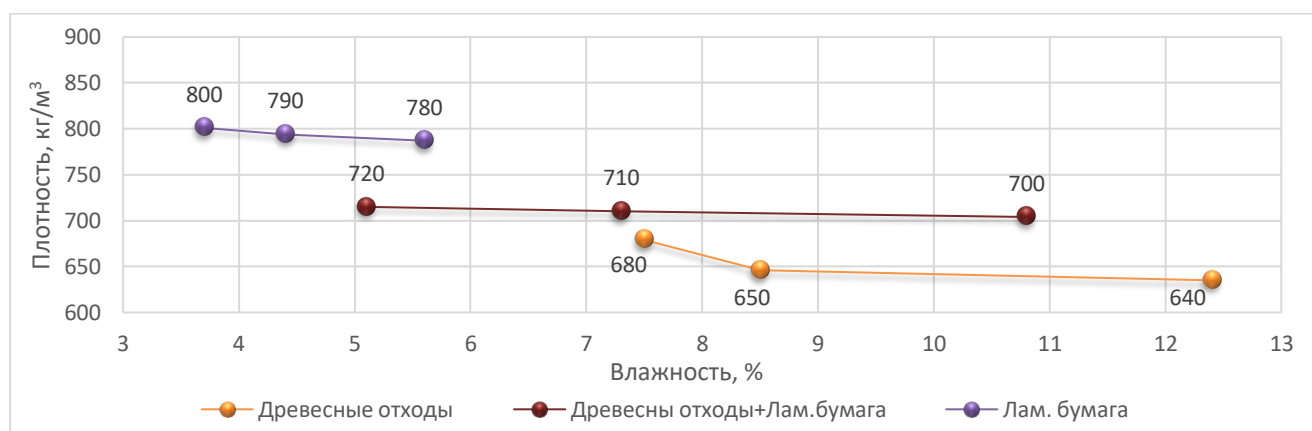


Рис. 3.6 – Зависимость среднего значения плотности полученных брикетов от влажности для композиций №1,2,3.

Логарифмическая функция по рис.2 для композиции №1 имеет вид: $\rho = -73,97 \cdot \ln(W) + 817,86$; $R^2 = 0,715$; (6)

Логарифмическая функция по рис.2 для композиции №2 имеет вид: $\rho = -14,67 \cdot \ln(W) + 738,99$; $R^2 = 0,9993$; (7)

Логарифмическая функция по рис.2 для композиции №3 имеет вид: $\rho = -33,48 \cdot \ln(W) + 844,36$; $R^2 = 0,9911$, (8)

где ρ – плотность брикета, кг/м³; W – влажность исходного сырья, %, R^2 – коэффициент аппроксимации.

Таблица 3.3 – Результаты определения физико-механических параметров полученных брикетов при температурах прессования $t = 20, 50, 80^\circ\text{C}$ и времени пропарки $\tau = 15\text{c}$

Композиции брикетов, %	Температура в процессе прессования t , °C	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}$, %	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}$, кг/м³	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}$, %	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, Н
100/0 (древесные отходы/лам.бумага)	20	8,5	650	5,7	0
	50		900	5,7	70
	80		950	5,2	100

Продолжение таблицы 3.3.

50/50 (древесные отходы/лам.бумага)	20	7,3	710	3,9	50
	50		960	4,4	150
	80		1040	3,7	350
0/100 (древесные отходы/лам.бумага)	20	4,4	790	1,9	0
	50		990	1,7	100
	80		1050	1,5	100

Ниже представлен график (рис. 3.7) зависимости средних значений плотности полученных брикетов от температур (20, 50, 80°C) при времени пропарки 15 с.

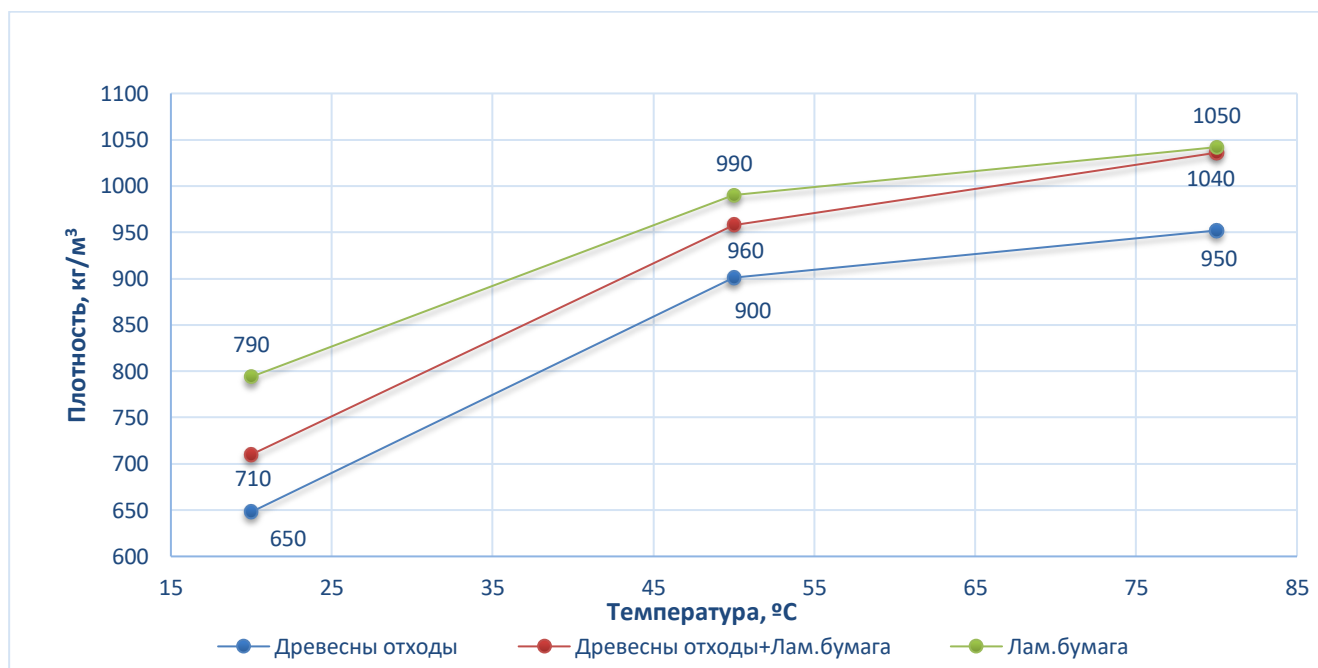


Рис. 3.7 – Зависимость среднего значения плотности полученных брикетов от температур (20, 50, 80°C) при времени пропарки сырья (15с.) для композиций №1,2,3.

Логарифмическая функция по рис.3 для композиции №1 имеет вид: $\rho = 227,08 \cdot \ln(t) - 20,9$; $R^2 = 0,967$; (9)

Логарифмическая функция по рис.3 для композиции №2 имеет вид: $\rho = 240,03 \cdot \ln(t) - 1,95$; $R^2 = 0,9882$; (10)

Логарифмическая функция по рис.3 для композиции №3 имеет вид: $\rho = 183,7 \cdot \ln(t) + 250,71$; $R^2 = 0,9806$, (11)

Где ρ – плотность брикета, кг/м^3 ; t – температура формирования брикета, $^{\circ}\text{C}$, R^2 – коэффициент аппроксимации.

Результаты исследования показывают, что влажность сырья оказывает меньшее воздействие на плотность и прочность брикета, чем температура при формировании брикета. При температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ и различных временных интервалах пропарки, средняя плотность образцов составила 719 кг/м^3 , при увеличении времени обработки насыщенным паром – плотность образцов снижалась для каждой из трех композиций. Показатель прочности на поперечное сжатие составил 50 Н в композиции 50/50%, это обуславливается влагопластичностью древесных полимерных компонентов при взаимодействии с отходами ламинированной бумаги. В остальных двух композициях брикет имел нулевую прочность, переставая сохранять целостность в процессе извлечения его из пресс-формы.

При температурах 20, 50 и 80°C и одинаковом времени пропарки (15 секунд) средняя плотность образцов составила: 717 кг/м^3 при 20°C , 950 кг/м^3 при 50°C и 1010 кг/м^3 при 80°C . Самый высокий показатель прочности имела композиция 50/50% при температуре 80°C и он был равен 350 Н. Это обосновывается изменением релаксационного состояния синтетического полимера (полиэтилена). При температуре выше 60°C полиэтилен марки 11503-070 изменяет свое релаксационное состояние из стеклообразного в высокоэластическое, тем самым становится дополнительным связующим элементом при формировании брикета. Полученный брикет имеет высокую прочность и не сильно уступает в плотности образцу под номером 3, имея значение в 1036 кг/м^3 .

Исходя из полученных результатов, для дальнейших исследований был выбран брикет с композицией древесных отходов и отходов ламинированной бумаги - 50/50%.

От соотношения отходов производства ламинированной бумаги и древесной муки зависит также и теплотворная способность топлива, что является наиболее важным, с энергетической точки зрения, показателем топлива. Также, не маловажна и экологическая составляющая, т.к. в отходах ламинированной бумаги

присутствуют синтетические полимеры, которые влияют на состояние окружающей среды в процессе дальнейшего сжигания. Помимо этого, при термической обработке отходов, содержащих синтетические полимеры – возможны усиленные загрязнения поверхностей нагрева используемого энергетического оборудования из-за плавления полиэтилена. По этой причине использования слишком большой концентрации отходов данного вида – может крайне негативно отразиться на функционировании оборудования в целом.

3.4 Определение зольности топливного брикета

Несгоревшая часть топлива формирует остатки в виде очагов, которые могут принимать вид шлака или золы в зависимости от условий сжигания и расположения в различных частях топки и дымоходах [93]. Зола представляет собой твердый, негорючий порошкообразный остаток, образующийся после завершения процессов преобразования минеральной части топлива во время его горения. Выделяют летучую золу – мелкие пылевидные фракции, уносимые уходящими газами, и провал – более крупные фракции золы и шлака, которые покидают зону горения через холодную воронку (рисунок 3.8).

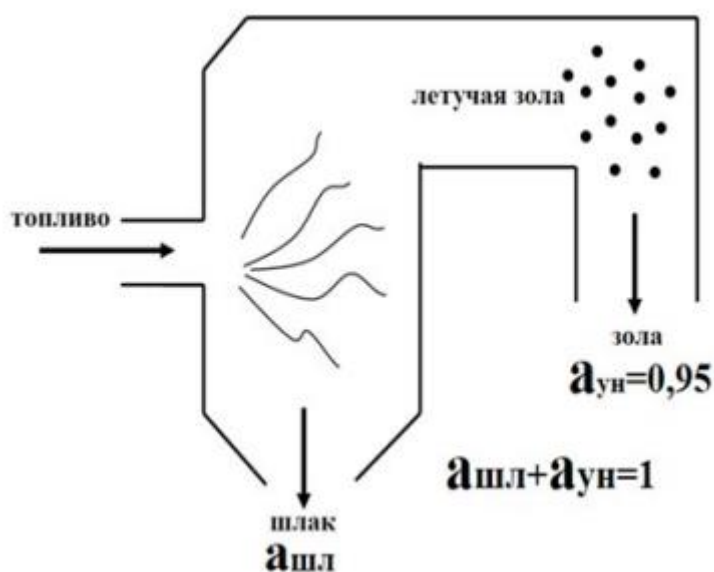


Рис. 3.8 - Зола и шлак, уносимые из энергоустановки

Шлак – это минеральная масса, которая была подвергнута высокотемпературному нагреву, что позволило ей приобрести высокую прочность благодаря процессам оплавления и спекания. После сгорания остаются очаговые остатки (ашл – доля удаления шлака) и зола (аун – доля уноса золовых частиц), причем сумма ашл и аун равна 1. Зольность, рассматриваемая как технический параметр, представляет собой массу золы, обычно выраженную в процентах по отношению к сухой массе топлива [93].

Зольность топлива устанавливается на основе результатов его технического анализа, который проводится путем прокаливании образца весом примерно 2 грамма в муфельной печи при температуре 820 °С в течение 20-25 минут (Рис. 3.9):

$$A^a = \frac{m_{\text{ост}}}{m_m} \cdot 100 \%,$$



Рис 3.9 - Муфельная печь для определения зольности топлива

Зольность рабочей массы топливного брикета по результатам эксперимента составила 0,2%.

3.5 Определение теплотворной способности топлива

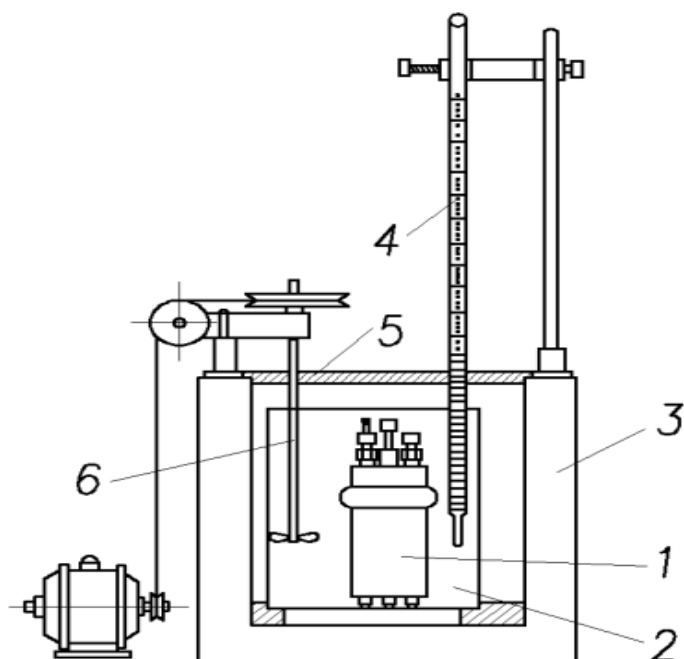
Основной теплотехнической характеристикой топлива является теплота сгорания (теплотворная способность), то есть количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы массы твердого топлива (кДж/кг). Теплоту сгорания, подобно элементному составу, классифицируют по рабочей, сухой или горючей массе топлива: Q_r , Q_d , Q_{daf} [93].

Наиболее точно теплота сгорания твердых и жидких видов топлива измеряется эмпирическим путем с использованием специализированного устройства – калориметрической бомбы (смотрите рисунок 3.10).



Рис. 3.10 - Калориметрическая установка и бомба Крекера

Схема калориметрической бомбы представлена на рисунке 3.11.



1 – калориметрическая бомба; 2 – калориметр; 3 – наружная оболочка;
4 – термометр; 5 – крышка; 6 – мешалка с приводом

Рис. 3.11 - Схема калориметрической установки

Опыт по определению теплотворной способности топлива проводился следующим образом: в герметично закрытом стальном цилиндрическом сосуда (калориметрической бомбе) сжигают пробу комбинированного топливного брикета в кислородной среде, подаваемой под давлением 2,5–3 МПа. Количество тепла, выделяющегося при сжигании топлива, устанавливается по изменению температуры воды в калориметре, в который помещена калориметрическая бомба, а также с учетом водного эквивалента деталей самого устройства. Температура воды в калориметре близка к температуре окружающей среды (около 20 °С), поэтому водяной пар, образующийся в бомбе при сгорании топлива, практически полностью конденсируется. Это означает, что измеренный тепловой эффект с помощью калориметра соответствует высшей теплоте сгорания. Тем не менее, определенная таким образом теплота сгорания в бомбе (Q_b) превышает высшую теплоту сгорания (Q_s), так как в процессе сжигания топлива в бомбе в кислородной среде происходят экзотермические реакции образования серной и азотной кислот,

которые не наблюдаются в условиях топки. Поэтому при расчете теплоты сгорания необходимо учитывать соответствующие корректировки [93].

Теплотворная способность топливного брикета в соотношении отходов ламинированной бумаги и древесной муки опилок лиственницы 50/50%, по результатам проведенных опытов, представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Теплотворная способность комбинированного топливного брикета

№	Q_6^a , кДж/кг	Q_s^r , кДж/кг	Q_i^r , кДж/кг
1	25189	22564	21499
2	25796	22832	21157
3	24657	21114	20970
4	23115	21488	20803
5	24485	21322	20001

Теплота сгорания в бомбе аналитической пробы топлива с учетом поправки на теплообмен калориметра с окружающей средой, кДж/кг

$$Q_6^a = \frac{(m_b + W)(t_n - t_0 + \Delta h)C_p - m_{пр}q_{пр}}{m_m},$$

где m_b , $m_{пр}$, m_m - масса воды в калориметре, запальной проволоки и навески топлива, соответственно, кг; $W = 0,3272$ кг – водяной эквивалент (постоянная) калориметра; $q_{пр}$ - теплота сгорания запальной проволоки, кДж/кг; C_p - теплоемкость воды кДж/(кг×°C).

Высшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг.

$$Q_s^r = Q_6^a \frac{100 - W^r}{100 - W^a},$$

где W^r , W^a – влажность рабочей и аналитической массы топлива, соответственно, %.

Низшая теплота сгорания рабочей массы топлива [93], кДж/кг

$$Q_i^r = Q_s^r - 25 (W^r + 9H^r),$$

Где H^r - содержание водорода, %.

Среднее значение низшей теплоты сгорания составило $Q_i^r = 21$ МДж/кг

Химический состав исследуемого брикета представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Элементный состав, полученного брикета в композиции 50/50%

№	Углерод С, %	Водород Н, %	Азот N, %	Кислород О, %	Зольность А, %	Влажность W, %
Комбинированный брикет 50/50 %	53	7,6	0,5	35	0,2	3,7

Ниже представлена сравнительная таблица 3.6, в которой сопоставляется низшая теплота сгорания полученного топливного брикета в соотношении 50/50% и других видов твердых топлив.

Таблица 3.6 – Низшая теплота сгорания различных видов твердых топлив

Среднее значение низшей теплоты сгорания на рабочую массу, МДж/кг	Средняя влажность на рабочую массу, %	Вид топлива
21	3,7	Инновационный комбинированный брикет из отходов ЦБП
18	3	Брикет из опилок лиственницы
23	10	Каменный уголь марки Д (ДГР)
16	35	Бурый уголь марки 2Б
10	55	Древесная щепа
18	4	Костра конопли
10	12	Дрова (береза)

На диаграмме 3.16 представлены значения низших теплот сгорания различных видов твердых топлив.

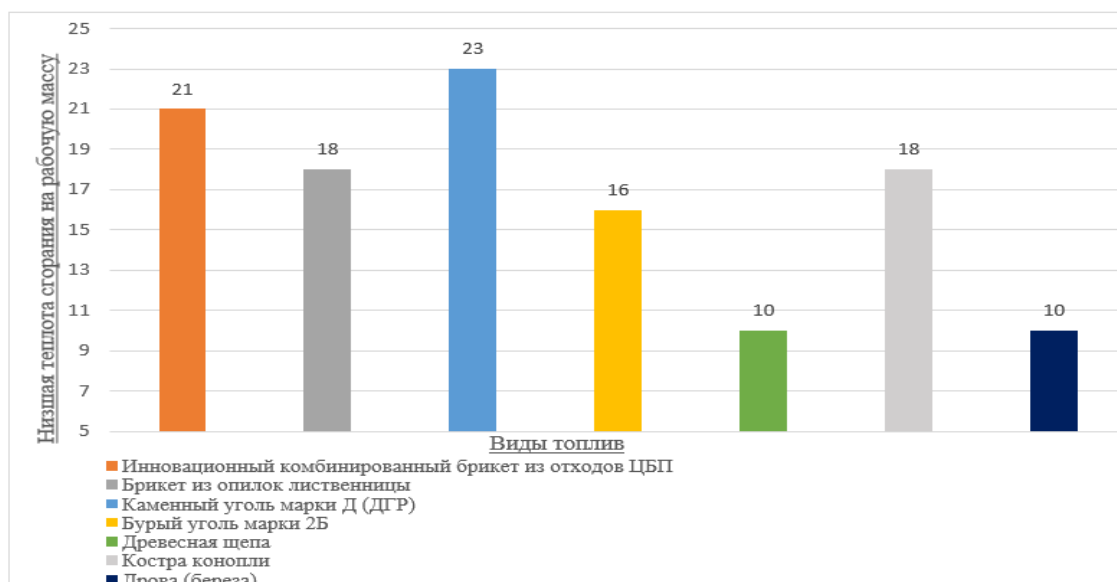


Рис 3.16 – Диаграмма значений низших теплот сгорания различных видов топлив

3.6 Анализ топок различных конструкций

Был проведен анализ топок различной конструкции с целью определения оптимальной топочной конструкции для сжигания полученного комбинированного брикета в соотношении 50/50%. Для корректного сравнения был выбран котлоагрегат с одинаковыми номинальными параметрами (паропроизводительностью и давлением пара). По результатам расчета материального баланса, теплового баланса и расчету топочных камер, были получены следующие результаты, представленные в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчетов котлоагрегата с различными конструкциями топочных камер

Параметр	НТВ	Факельное сжигание	Слоевое сжигание	Кипящий слой
Паропроизводительность D , кг/с	20,9	20,9	20,9	20,9
Давление перегретого пара P , МПа	3,9	3,9	3,9	3,9
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °C	120	120	150	145
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α	1,2	1,2	1,4	1,3

Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	21	21	21	21
Сумма тепловых потерь $\sum q$, %	7,2	6,2	13,4	13,9
КПД η , %	92,8	93,8	86,6	86,1
Расход топлива В, кг/с	2,94	2,81	2,95	2,7
Адиабатная температура горения t_a , °С	1658	1854	1101	1263
Температура газов на выходе из топки ϑ'' , °С	1064	963	862	801

3.7 Определение погрешности измерений

Для определения погрешности измерений в работе использовался метод расчета с использованием распределения Стьюдента.

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta X_{\text{случ}})^2 + (\Delta X_{\text{приб}})^2},$$

где $\Delta X_{\text{случ}}$ – случайная абсолютная погрешность; $\Delta X_{\text{приб}}$ – статистическая (приборная) абсолютная погрешность.

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,00475$$

В данном случае использовалось определение систематической ошибки как числа с наименованием единиц величин, измеряемых прибором (используется для высокоточных приборов): $\Delta X_{\text{приб}} = \alpha * n$.

$\Delta X_{\text{случ}} = t_{\alpha n} \cdot \sigma_{x_{\text{cp}}}$, где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблице 3.8; n – количество измерений; α – доверительная вероятность или коэффициент надежности; $\sigma_{x_{\text{cp}}}$ – среднеквадратичная погрешность данной серии измерений.

$$\sigma_{x_{\text{cp}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{cp}} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(x_{\text{cp}} - x_1)^2 + (x_{\text{cp}} - x_2)^2 + \dots + (x_{\text{cp}} - x_n)^2}{n(n-1)}}$$

где x_{cp} – среднее значение искомой величины данной серии измерений; x_i – величины, полученные в опыте.

Таблица 3.8 – Коэффициенты Стьюдента

α n	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,999
2	1,00	2,0	3,1	6,31	12,7	636,6
3	0,82	1,3	1,9	2,92	4,30	31,6
4	0,77	1,3	1,0	2,35	3,18	12,9
5	0,74	1,2	1,5	2,13	2,78	8,61
6	0,73	1,2	1,5	2,02	2,57	6,37
7	0,72	1,1	1,4	1,94	2,45	5,96
8	0,71	1,1	1,4	1,89	2,36	5,41
9	0,71	1,1	1,4	1,86	2,31	5,04
10	0,70	1,1	1,4	1,83	2,26	4,78

Погрешность измерений плотности комбинированных брикетов при различной влажности исходного сырья и комнатной температуре 20°C.

Для более высокой точности полученных значений, был выбран доверительный интервал равный 0,95 и коэффициент Стьюдента равнялся $t_{\alpha n} = 2,26$.

1. Для композиции 100/0% (древесные отходы/лам.бумага):

$$\sigma_{\text{хср}} = 5,2;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 5,2 * 2,26 = 11,8;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 11,8;$$

$$\text{Относительная погрешность } \varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 1,8 \, \%.$$

2. Для композиции 50/50% (древесные отходы/лам.бумага):

$$\sigma_{\text{хср}} = 6,1;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 6,1 * 2,26 = 13,8;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 13,8;$$

$$\text{Относительная погрешность } \varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 1,9 \, \%.$$

3. Для композиции 0/100% (древесные отходы/лам.бумага):

$$\sigma_{\text{ср}} = 6,6;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 6,6 * 2,26 = 14,9;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 14,9;$$

$$\text{Относительная погрешность } \varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 1,9 \, \%.$$

Погрешность измерений плотности комбинированных брикетов при одинаковом времени пропарки сырья (15 секунд) исходного сырья и температурах 20, 50 и 80°C.

1. Для композиции 100/0% (древесные отходы/лам.бумага):

$$\sigma_{\text{ср}} = 7,7;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 7,7 * 2,26 = 17,4;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 17,4;$$

$$\text{Относительная погрешность } \varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 2,2\%.$$

2. Для композиции 50/50% (древесные отходы/лам.бумага):

$$\sigma_{\text{ср}} = 8,3;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 8,3 * 2,26 = 18,8;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 18,8;$$

Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 2\%$.

3. Для композиции 0/100% (древесные отходы/лам.бумага):

$$\sigma_{\text{ср}} = 8,5;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 8,5 * 2,26 = 19,2;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 19,2;$$

Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 2\%$.

Погрешность измерений низшей теплоты сгорания полученных брикетов в соотношении 50/50%.

$$\sigma_{\text{ср}} = 256;$$

$$\Delta X_{\text{случ}} = 256 * 2,26 = 579;$$

$$\Delta X_{\text{приб}} = 0,1;$$

$$\Delta X = 579;$$

Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} * 100\% = 2,8\%$.

Погрешности всех измерений находятся в пределах 5% при выбранном доверительном интервале 0,95, что свидетельствует о достаточно высокой достоверности измерений.

3.8 Определение взаимодействия древесины и синтетических полимеров

В зависимости от выбранной композиции исходного сырья и его заданных параметров влажности и температуры – полученный топливный брикет релаксировал по-разному. При слишком высокой установленной влажности, древесные составляющие брикета релаксировали значительно дольше, нежели чем при оптимальной влажности. При слишком высокой заданной температуре – синтетические полимеры, так же, релаксировали в течение нескольких дней,

именно поэтому важно было подобрать оптимальные параметры влажности и температуры при формировании топливного брикета для отнесения его к соответствующему классу топливных брикетов, указанных в соответствии с ГОСТ 33103.3 – 2017 [95] и отображенных в приложении 3 данной работы. Полученный топливный брикет соответствует классу А1 [95].

3.9 Экструдирруемость смеси

Процесс экструзии является непрерывным, что требует стабильности технологических параметров [96]. Параметры экструзии можно рассчитать, принимая во внимание следующие аспекты:

1. Конструктивные характеристики экструдера и его головки.
2. Процессуальные параметры – условия, в которых осуществляется экструзия, включая скорость вращения шнека, температурные условия в разных зонах цилиндра и головки, и прочие факторы.
3. Характеристики обрабатываемого материала – вязкость, плотность, теплофизические свойства.

Тем не менее, до сих пор не создана всеобъемлющая и окончательная теория экструзионного процесса, что позволяет рассчитывать параметры экструзии лишь для определенных конкретных случаев [95]. К технологическим параметрам экструзии относятся: температура в цилиндре материала по зонам; производительность; давление, создаваемое шнеком; температура экструдата; потребляемая мощность. В процессе работы экструзионного агрегата все эти параметры взаимосвязаны, и изменение одного из них приводит к соответствующему изменению других [96]. Также существует возможность регулирования параметров экструзии (управления процессом) путем:

1. Корректировки температурного режима по зонам;
2. Изменения числа оборотов. Оптимальным считается режим работы экструзионной машины, при котором достигается максимальная производительность при высоком качестве экструдированных изделий. Это не означает, что в таком режиме увеличение производительности становится

невозможным, но в любом случае это обязательно приведет к снижению качества готовой продукции [96].

3.10 Технологическая схема процесса формирования брикета и подготовки к сжиганию

На рисунке 3.17 изображена принципиальная схема процесса переработки отходов и получения комбинированных брикетов [97].

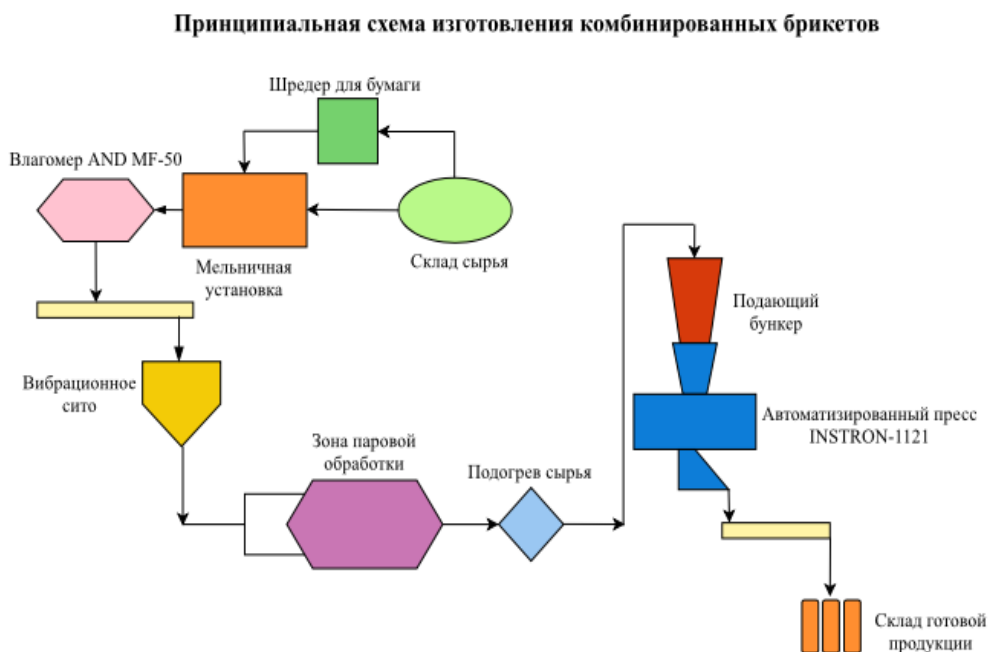


Рис. 3.17 – Принципиальная схема процесса формирования брикетов

Со склада сырья отходы ламинированной бумаги (листы) направляются в шредер для предварительного измельчения. Далее древесные отходы (опилки) совместно с отходами ламинированной бумаги направляются в мельничную установку, где измельчаются в мелкую фракцию. Измельченное сырье поступает во влагомер AND MF-50, где высушивается до одинаковой влажности, после сушки исследуемый материал попадает на вибрационные сита, установленные друг под другом, где анализируется гранулометрический состав материала. Далее сырье поступает в зону паровой обработки по разным каналам (это сделано для того, чтобы можно было составить смесь в определенных пропорциях), где обрабатывается насыщенным паром в течение установленного временного

промежутка. Обработанное и насыщенное влагой сырье поступает в зону подогрева сырья, где нагревается до температуры 80 градусов Цельсия, после этого направляется шнеком в подающий бункер, из которого засыпается в подготовленную пресс форму, установленную на автоматизированной установке Instron1121. Полученные образцы топливных брикетов отправляются на склад готовой продукции, где определяются их конструктивные величины для дальнейшего расчета плотности брикетов.

На рисунке 3.18 изображена принципиальная схема подготовки брикетов к сжиганию в котлоагрегате [98].

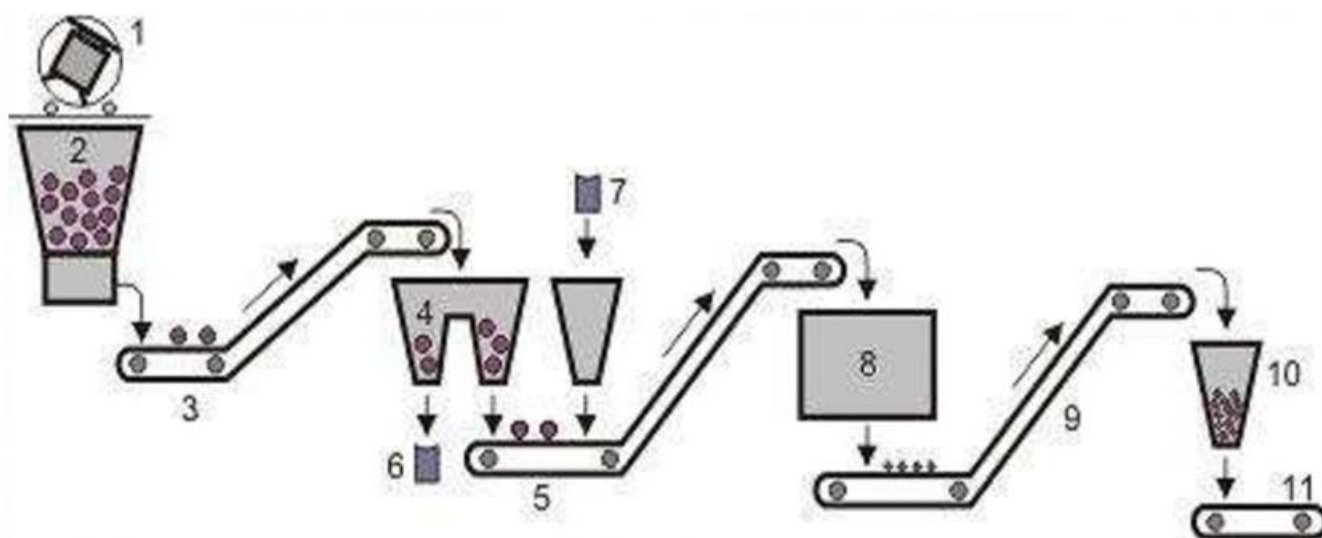


Рис. 3.18 – Принципиальная схема подготовки топлива к сжиганию

1 – опрокидыватель с топливом; 2 – приемный бункер; 3 – ленточный конвейер; 4- узел пересыпки; 5 – ленточный конвейер подачи топлива в дробильное отделение; 6 – ленточный конвейер подачи топлива на склад; 7 – ленточный конвейер выдачи топлива со склада; 8 – дробильное отделение; 9 – ленточный конвейер в главный корпус котельной; 10 – узел пересыпки; 11 – ленточный конвейер к котельной установке.

Брикеты поступают к системе подготовки топлива авто или ЖД транспортом, где высыпаются в приемный бункер. Из приемного бункера с помощью ленточного конвейера подаются в узел пересыпки, где часть топлива поступает непосредственно в дробильное отделение, а часть отправляется на склад для хранения. В дробильном отделении брикеты размалываются в дробленку с размерами частиц 3-5 мм и поступают на ленточный конвейер, ведущий в главный

корпус котельной. После очередного узла пересыпки – подготовленное топливо направляется непосредственно к самому котельному агрегату для подачи его в топку.

Заключение

В рамках данной диссертационной работы были проведены теоретические и экспериментальные исследования и выполнены следующие задачи:

1. Разработаны научные основы повышения эффективности использования композитных брикетов, включающих древесные опилки и отходы бумаги с полиолефиновым покрытием, как энергетических ресурсов в малоотходных тепловых технологических установках, способствующих защите окружающей среды;

2. Определена и установлена зависимость повышения влажности двух видов сырья (древесных опилок и отходов бумаги с полиолефиновым покрытием) от времени пропарки;

3. Проведен анализ зависимости плотности и прочности полученных брикетов от различных значений влажности сырья и температуры прессования. Предпочтительным являлся брикет 50/50% с плотностью 1036 кг/м^3 и прочностью на поперечное сжатие 350 Н;

4. Опытным путем определена низшая теплота сгорания топливного брикета в соотношении сырья 50/50%, её значение составило 21 МДж/кг;

5. Проведен анализ расчетных параметров топок различных конструкций. В качестве наиболее эффективной конструкции выбрана низкотемпературная вихревая топка для сжигания полученного комбинированного брикета 50/50%;

6. Определены достоинства топочных камер с низкотемпературным вихрем по вредным выбросам оксидов азота, обусловленные понижением температуры в зоне активного горения на 200°C относительно факельного способа и ступенчатому вводу окислителя.

7. Установлено, что ожидаемый экономический эффект при переводе котлоагрегата с древесного биотоплива на полученные комбинированные брикеты, с соотношением древесных отходов и отходов ламинированной бумаги 50/50%, только за счет снижения расхода топлива, составит 131,1 млн. руб в год.

Помимо этого, снижаются затраты на подготовку топлива, в частности на

сушку и размол. Так как, в случае с НТВ-технологией, топливо не нуждается в мелкодисперсном размоле, а подается в виде дробленки, то затраты электроэнергии на его размол значительно снижаются.

При использовании описанного в работе комбинированного брикета, КПД котельной установки возрастает более чем на 1% из-за снижения потерь с уходящими газами при одинаковых температурах, незначительно снижается объем дымовых газов и на 21% снижается расход топлива. Эти факторы приводят к снижению экономических затрат на потребление топлива котлоагрегатом, снижаются затраты электроэнергии на работу дымососа и повышается общая эффективность работы котла и вспомогательного оборудования. Тем самым, только за счет уменьшения расхода топлива, возрастет экономический эффект использования инновационного комбинированного брикета, при таких же номинальных параметрах котлоагрегата. Результаты представлены в таблице 4.1 в приложении № 4 к данной работе.

Данное исследование нацелено на повышение эффективности использования твердого биотоплива, путем переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, в топливный комбинированный брикет, состоящий из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующим сжиганием в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой. Инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей окружающей среды и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность промышленных предприятий. Использование полученного нового вида твердого биотоплива и технологии его производства, и последующего сжигания в НТВ-топке, даст возможность снизить нагрузку на полигоны с ныне не утилизируемыми отходами, использовать полученную энергию топлива на собственные нужды, упрощает очистку дымовых газов благодаря использованию технологии низкотемпературного вихревого сжигания (низкие показатели

концентрации оксидов азота из-за низких температур в зоне активного горения, ступенчатого подвода окислителя и отсутствие серы).

Полученные экспериментальные данные и образцы целесообразно использовать в качестве основополагающих для внедрения данной технологии в производство. Данная диссертационная работа является актуальной на сегодняшний день для Российской Федерации и мира в целом. Перспективы развития предложенного решения проблемы крайне велики, поэтому целесообразно развивать данное техническое решение дальше, не ограничиваясь лишь отходами производства ламинированной бумаги. Это послужит большим шагом к реализации поставленных правительством целей и задач в области композиционных материалов, экологии и энергетики.

Список сокращений

ЦБП – целлюлозно-бумажная промышленность;
ТКО – твердые коммунальные отходы;
ЦБК – целлюлозно-бумажный комбинат;
ФАО – продовольственная и сельскохозяйственная организация (food and agriculture organization);
ПТЭ – промышленная теплоэнергетика;
ТЦКМ – технология целлюлозы и композиционных материалов;
ПЭНП – полиэтилен низкой плотности;
ОНПО – охтинское научно-производственное объединение;
ПС – полистирол;
ПА – полиамид;
ПЭТФ – полиэтилентерефталат;
ПЭВП – полиэтилен высокой плотности;
ПП – полипропилен;
ПВХ – поливинилхлорид;
ФТС – федеральная таможенная служба;
ПЭ – полиэтилен;
ТЭС – тепловая электростанция;
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;
ЕСF – без использования элементарного хлора (elemental chlorine free);
TFC – полностью бесхлорная отбелка (total chlorine free);
КЩО – кислородно-щелочная отбелка;
НТВ – низкотемпературный вихрь;
КПД – коэффициент полезного действия;
БКЗ – барнаульский котельный завод;
ПП – пароперегреватель;
ВЭ – водяной экономайзер;
ВП – воздухоподогреватель.

Список литературы

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: указ Президента Российской Федерации [издан Президентом 21 июля 2020г. № 474]. – Текст: непосредственный // Собрание законодательства Российской Федерации, 2018, N 20, ст. 2817; N 30, ст. 4717.
2. Распоряжение правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».
3. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects // NY: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2017. P. 462.
4. Forest Products Annual Market Review 2021-2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.
5. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы: Женева: ЕЭК ООН, 2020- 173с. ISBN 978-92-1-004516.
6. Древесина как источник энергии в регионе ЕЭК ООН: данные, тенденции и перспективы в Европе, Содружестве Независимых Государств и Северной Америке // FAO / ЕЭК ООН. Нью-Йорк и Женева, 2018. с. 111.
7. Патент № 2596683 Российская Федерация, МПК F26B 20/00, F26B 17/10, F26B 3/10. Комплекс для непрерывной термообработки твердых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов, и способы термообработки, реализуемые с помощью данного комплекса / Пекарец А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «ПРОМЕТЕЙ». [Pekarets A.A. System for Continuous Heat Treatment of Solid Fine Particles, Mainly Disperse Wood Materials and Methods of Heat Treatment, Implemented Using Said Complex. Patent RF, no. 2596683, 2016].
8. Pekarets A., Mandre Y., Vinogradov N., Akim E. Bio-refining of larch sawdust producing wood and wood-charcoal briquettes: scientific and technological aspects. EUBCE 2019, Lisbon 27-30 May 2019. // Proceedings 27th European Biomass Conference and Exhibition. 2019. Portugal. P. 1887—1889.

9. Аким Э.Л., Мандре Ю.Г., Пекарец А.А. Изменение релаксационного состояния полимерных компонентов древесины при проведении ее высокотемпературного биорефайнинга // Химические волокна. 2019. № 3. С. 14—18.

10. Аким Э.Л., Пекарец А.А., Роговина С.З., Берлин А.А. Релаксационное состояние древесины и получение целлюлозных композитов энергетического назначения — древесных брикетов и пеллет. ВСЕ МАТЕРИАЛЫ. Энциклопедический справочник. №9, 2020, стр.1-8.

11. Пекарец А.А., Ерохина О.А., Новожилов В.В., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Роль упруго-релаксационных свойств при получении древесных и древесноугольных брикетов // Лесной журнал. 2020. № 1. С. 200—209.

12. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. [и др.]. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. Берлина А.А. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.

13. Николаева А.Ф., Крыжановский В.К., Бурлов В.В. [и др.]. Технология полимерных материалов / СПб: Профессия, 2008. 544 с.

14. Тагер А.А. Физико-химия полимеров: учеб. М.: Научный мир, 2007. 544 с.

15. Крыжановский В.К., Курлов В.В., Паниматченко А.Д. [и др.]. Технические свойства полимерных материалов: учеб-справ. пособие / 2-е изд., испр. и доп. СПб: Профессия, 2007. 240 с.

16. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.

17. Мэттьюз Ф., Роллингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 407 с.

18. Основы технологии переработки пластмасс / под ред. Кулезнева В.Н., Гусева В.К. М.: Химия. 2004. 600 с.

19. Волкова А.В. Рынок крупнотоннажных полимеров. Национальный исследовательский университет. Высшая школа экономики. Центр развития 2020.

20. Клинков А.С. [и др]. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов: учебное пособие / – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 100 с.
21. Полимерные пленки / под ред. Заикова Г.Е. – Санкт-Петербург: Профессия, 2006. – 352 с.
22. MICRO 2016: Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems / Ed. by J. Baztan Elsevier, 2016. ISBN: 9780128122723.
23. Borrelle SB, Ringma J, Law KL, Monnahan CC, Lebreton L, McGivern A, Murphy E, Jambeck J, Leonard GH, Hilleary MA, Eriksen M, Possingham HP, De Frond H, Gerber LR, Polidoro B, Tahir A, Bernard M, Mallos N, Barnes M, Rochman CM. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*. 2020 Sep 18;369(6510):1515-1518. doi: 10.1126/science.aba3656. Epub 2020 Sep 17. PMID: 32943526.
24. Carpenter EJ, Smith KL Jr. Plastics on the Sargasso sea surface. *Science*. 1972 Mar 17;175(4027):1240-1. doi: 10.1126/science.175.4027.1240. PMID: 5061243.
25. Geyer R., Jambeck J. R., & Law K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. doi:10.1126/sciadv.1700782/
26. Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T. R., Perryman M., Andrady A., Law K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. doi:10.1126/science.1260352.
27. Kelly A, Lannuzel D, Rodemann T, Meiners KM, Auman HJ. Microplastic contamination in east Antarctic sea ice. *Mar Pollut Bull*. 2020 May;154:111130. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111130. Epub 2020 Apr 8. PMID: 32319937.
28. Law K. L. (2017). Plastics in the Marine Environment. *Annual Review of Marine Science*, 9(1), 205–229. doi:10.1146/annurev-marine-010816-060409.
29. Duis K., Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environ Sci Eur* 28, 2 (2016). <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>.
30. Law KL, Morét-Ferguson S, Maximenko NA, Proskurowski G, Peacock EE, Hafner J, Reddy CM. Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre.

Science. 2010 Sep 3;329(5996):1185-8. doi: 10.1126/science.1192321. Epub 2010 Aug 19. PMID: 20724586.

31. Andrady A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2011.05.030>.

32. van Sebille E., van Sebille E., Wilcox C., Lebreton L., Maximenko N., Hardesty B. D., van Franeker J. A., Eriksen M., Siegel D. A., Galgani F., & Law K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>.

33. Auta H. S., Emenike C. U., and Fauziah S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environ. Int.* 102, 165–176. doi: 10.1016/j.envint.2017.02.013.

34. Mesfin Medihin Ododo, Bezabih Kelta Wabalo. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Their Impacts on Human Health: A Review. *Journal of Environment Pollution and Human Health*. 2019; 7(2):73-77. doi: 10.12691/jephh-7-2-3.

35. Tanabe S., Watanabe M., Binh Minh T., Kunisue T., Nakanishi S., Ono H., Tanaka H. // *Environ. Sci. Technol.* 2004. V. 38. № 2. P. 403.

36. Петросян В.С., Шипелов А.Е., Шувалова Е.А. Полимерные твердые коммунальные отходы в окружающей среде и методы их переработки. Высокомолекулярные соединения, серия С, 2021, том 63. № 2. с. 202 – 231.

37. Chiba S., Saito H., Fletcher R., Yogi T., Kayo M., Miyagi S., et al. (2018). Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris. *Mar. Policy* 96, 204–212. doi: 10.1016/j.marpol.2018.03.022.

38. Petrosyan V., Shipelov A. Cycles and Etagers in New System of Municipal Solid Waste Management in Russian Federation. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(5):58-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-58-63>.

39. Petrosyan V.S., Shipelov A.E. & Shuvalova E.A. Polymer Municipal Solid Waste in the Environment and Methods for Their Processing. *Polym. Sci. Ser. C* **63**, 227–236 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1811238221020077>.

40. Hopewell J., Dvorak R., & Kosior E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. doi:10.1098/rstb.2008.0311.
41. Courtene-Jones W., Quinn B., Ewins C., Gary S. F. and Narayanaswamy B. E. (2020). Microplastic accumulation in deep-sea sediments from the Rockall Trough. *Mar. Pollut. Bull.* 154:111092. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111092.
42. Fischer V., Elsner N. O., Brenke N., Schwabe E., and Brandt A. (2015). Plastic pollution of the Kuril–Kamchatka Trench area (NW pacific). *Deep Sea Res. II Top. Stud. Oceanogr.* 111(Suppl. C), 399–405. doi: 10.1016/j.dsr2.2014.08.012.
43. Koseki Takafumi. “Technologies for Saving Energy in Railway Operation: General Discussion on Energy Issues Concerning Railway Technology.” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5 (2010): n. 616.
44. Morisako S, Watanabe S, Ikemoto S, Muratsugu S, Tada M, Yamashita M. Synthesis of A Pincer-Ir(V) Complex with A Base-Free Alumanyl Ligand and Its Application toward Dehydrogenation of Alkanes. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*. PMID 31397531 DOI: 10.1002/Anie.201909009.
45. Умнов В.А., Коробова О.С., Скрыбина А.А. Углеродный след как индикатор воздействия экономики на климатическую систему // Вестник РГГУ. Серия «Экономика. Управление. Право». 2020. № 2. С. 85–93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.
46. Abdullah R, Ishak CF, Kadir WR, Bakar RA (2015) Characterization and feasibility assessment of recycled paper mill sludges for land application in relation to the environment. *Int J Environ Res Public Health* 12:9314–9329.
47. Aguayo MG, Fernández Pérez A, Reyes G, Oviedo C, Gacitúa W, Gonzalez R, Uyarte O. Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Rejected Fibers Originated in the Kraft Pulping Process. *Polymers (Basel)*. 2018 Oct 14;10(10):1145. doi: 10.3390/polym10101145. PMID: 30961070; PMCID: PMC6403608.
48. Akampumuza O., Wambua P. M., Ahmed A., Li W., & Qin X.-H. (2016). Review of the applications of biocomposites in the automotive industry. *Polymer Composites*, 38(11), 2553–2569. doi:10.1002/pc.23847.

49. Maryam Akbari, Adetoyese Olajire Oyedun, Siddharth Jain, Amit Kumar, Options for the conversion of pulp and paper mill by-products in Western Canada, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 26, 2018, Pages 83-92, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.10.003>.
50. Albuquerque A, Scalize PS, Ferreira NC, Silva F (2015) Multi-criteria analysis for site selection for the reuse of reclaimed water and biosolids. *Revista Ambiente Água* 10:22–34. DOI: 10.4136/ambi-agua.1550.
51. Alen R (2019) Chapter 3A-pulp mills and wood-based biorefineries. *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*, de Pandey A., Hofer R., Larroche C., Taherzadeh, M., Nampoothiri, M, 91–126.
52. Asmare G (2017) Pulp production and optimization from cotton stalks. *Berhan Int Res J Sci Hum* 1:18–29.
53. Bahar K, Zeynep C, Orhan I (2011) Pollution prevention in the pulp and paper industries. *Environ Manag Pract* 5:223–246.
54. Bajpai P (2011) *Environmentally-friendly production of pulp and paper*. Wiley. ISBN: 978-1-118-07432-9.
55. Bajpai P (2013) Pulp bleaching and bleaching effluents. Springer, *Bleach Plant Effluents from the Pulp and Paper Industry*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00545-4>.
56. Bajwa D. S., Pourhashem G., Ullah A. H., & Bajwa S. G. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environment impact. *Industrial Crops and Products*, 139, 111526. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111526.
57. Bengtsson Andreas, Bengtsson Jenny, Olsson Carina, Sedin Maria, Jedvert Kerstin, Theliander Hans and Sjöholm Elisabeth. "Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin" *Holzforschung*, vol. 72, no. 12, 2018, pp. 1007-1016. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0028>.
58. Bengtsson A, Bengtsson J, Sedin M, Sjöholm E (2019) Carbon fibers from lignin-cellulose precursors: effect of stabilization conditions. *ACS Sustainable Chem Eng* 7:8440–8448. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b00108.
59. Cherian C., & Siddiqua S. (2019). Pulp and Paper Mill Fly Ash: A Review. *Sustainability*, 11(16), 4394. doi:10.3390/su11164394.

60. Clemons C. M. (2016). Nanocellulose in spun continuous fibers: A review and future outlook. *Journal of Renewable Materials*, 4(5), 327–339. <https://doi.org/10.7569/JRM.2016.634112>.
61. Dessbesell L, Paleologuo M, Leitch M, Pulkki R, Xu CC (2020) Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers. *Renew Sustain Energy Rev* 123:109768.
62. Đurđević D., Trstenjak M., & Hulenčić I. (2020). Sewage Sludge Thermal Treatment Technology Selection by Utilizing the Analytical Hierarchy Process. *Water*, 12(5), 1255. doi:10.3390/w12051255.
63. Eugenio ME, Ibarra D, Martin-Sampedro R, Espinosa E, Bascon I, Rodriguez A (2019) Alternative raw materials for pulp and paper production in the concept of a lignocellulosic biorefinery. *Cellulose* 12:78. p. 26. DOI: 10.5772/intechopen.90041.
64. Faubert P., Barnabé S., Bouchard S., Côté R., & Villeneuve C. (2016). Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions? *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 107–133. doi:10.1016/j.resconrec.2016.01.007.
65. Feng X., Meng X., Zhao J., Miao M., Shi L., Zhang S., & Fang J. (2015). Extraction and preparation of cellulose nanocrystals from dealginate kelp residue: structures and morphological characterization. *Cellulose*, 22(3), 1763–1772. doi:10.1007/s10570-015-0617-z.
66. Fernández-Rodríguez J., Erdocia X., Hernández-Ramos F., Alriols M. G., & Labidi J. (2019). Lignin Separation and Fractionation by Ultrafiltration. *Separation of Functional Molecules in Food by Membrane Technology*, 229–265. doi:10.1016/b978-0-12-815056-6.00007-3.
67. Adeosun S. O., Gbenebor O. P., & Cletus O. (2019). Biosourced Lignin: Sources and Properties. *Sustainable Lignin for Carbon Fibers: Principles, Techniques, and Applications*, 151–191. doi:10.1007/978-3-030-18792-7_4.
68. Gopal P. M., Sivaram N. M., & Barik D. (2019). Paper Industry Wastes and Energy Generation from Wastes. *Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation*, 83–97. doi:10.1016/b978-0-08-102528-4.00007-9.

69. Dixit M., Gupta G. K., Liu H., & Shukla P. (2019). Pulp and paper industry based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. doi:10.1016/j.coesh.2019.09.010.
70. Huang D, Hong H, Huang W, Zhang H, Hong X. Scalable Preparation of Cellulose Nanofibers from Office Waste Paper by an Environment-Friendly Method. *Polymers (Basel)*. 2021 Sep 15;13(18):3119. doi: 10.3390/polym13183119. PMID: 34578020; PMCID: PMC8473219.
71. Liu Z., Wang H., & Hui L. (2018). Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers. *Pulp and Paper Processing*. doi:10.5772/intechopen.79017.
72. Sarkar R, Kurar R, Gupta AK, Mudgal A, Guptal V (2017) Use of paper mill waste for brick making. *Cogent Engineering* 4:1405768. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1405768>.
73. Simao L, Hotza D, Raupp-Pereira F, Labrincha J, Montedo O (2018) Wastes from pulp and paper mills-a review of generation and recycling alternatives. *Cerâmica* 64:443–453.
74. Singh A. K., & Chandra R. (2019). Pollutants released from the pulp paper industry: Aquatic toxicity and their health hazards. *Aquatic Toxicology*. doi:10.1016/j.aquatox.2019.04.007.
75. Официальный сайт ООО ПК «Гофролайн» [электронный ресурс]. URL: <https://gofroline.ru/poleznoe/119112022.html?ysclid=lvw3gno7tx424216711> (дата обращения 15.05.2024).
76. Официальный сайт НПАО «Светогорский ЦБК» [электронный ресурс]. URL: <http://sveto-paper.com/questions.html> (дата обращения 15.05.2024).
77. Кузнецов А.Г. Обзор и перспективы процессов переработки многослойной ламинированной упаковки // Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 3/4. С. 83–90.
78. Мировые тенденции в упаковке [электронный ресурс]. URL: <https://article.unipack.ru/61115/> (дата обращения 24.09.2020).

79. Вторичная переработка после использования [электронный ресурс] // Сайт компании Tetra Pak. URL: <https://www.tetrapak.com/ru/sustainability/recycling> (дата обращения 25.09.2020).

80. Staley B., Kantner D. Quantification of Municipal Solid Waste Management in the United States – with Comparative Analysis to Other Estimates // *Detritus*. 2018. Vol. 03. Pp. 167–170.

81. Семенов Ю.П. Лесная биоэнергетика: учебное пособие / под. ред. Ю.П. Семенова. М.: ГОУ ВПО МГУД, 2008. 348 с.

82. Передерий С.Э. Древесные топливные брикеты // *Леспроминформ*. 2014. №6.

83. Holz – und Pellethandel GmbH [Электронный ресурс] // ЕКО – Hold und pellethandel GmbH [Сайт]. [2007]. URL: <http://www.eko-pellethandel.de/index.php?id=6> (дата обращения: 23.04.2023).

84. Румак В.С., Умнова Н.В. Диоксины и безопасность биосистем: результаты натурных исследований // *Жизнь Земли*. 2018. Том 40. № 3. С. 308–320.

85. Ившин В.П., Полушин Р.В. Диоксины и диоксиноподобные соединения / М-во образования и науки Рос. Федерации, Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2004. 315 с.

86. Федоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы. М.: Наука, 1993. 266 с.

87. Производство сульфатной целлюлозы: учебное пособие / сост. Иванов Ю.С., Кузнецов А.Г., Бабкина Л.Ю. / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2016. Ч.II. – 72 с.

88. Померанцев В.В. Топки скоростного горения для древесного топлива [Текст] / канд. техн. наук Померанцев В.В.; М-во тяжелого машиностроения СССР. Главкотлотурбопром. Центр. науч.-исслед. ин-т им. И. И. Ползунова. - Москва; Ленинград: [Ленингр. отд-ние] Машгиза, 1948 (Л.: тип. "Профинтерн"). – 74 с.

89. Рыжиков В.А., Аким Э.Л., Ерохина О.А., Пекарец А.А. / Совместная переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры, и твердых древесных отходов, входящих в состав топливного брикета // *Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов*:

Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – RUS: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 65-69. – EDN KQJYIG.

90. Модернизация и создание пылеугольных котлов нового поколения на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания: [сайт]. – URL: <https://pandia.ru/text/80/280/19286-4.php?ysclid=lvw3tv7wwf801361691> (дата обращения: 22.04.2024). – Текст: электронный.

91. Тринченко А.А., Парамонов А.П. Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 4(231). 2015.

92. Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Лакомкин В.Ю. Тепловой и аэродинамический расчеты котельных установок: учеб.пособие. - 5-е изд., перераб. и доп./ВШТЭ СПбГУПТД.: -СПб., 2018. - 200 с., ил. 41. – ISBN 978-5-91646-150-3.

93. Белоусов В.Н. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. Ч. 2: учеб. пособие / Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д.; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. - Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 151 с. – ISBN 978-5-91646-238-8.

94. Клинков А.С. Разработка технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов/ Клинков А.С., Соколов М.В., Шашков И.В. // IX науч.конф. ТГТУ: тех.докл. -Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Тех. Ун-та, 2004. -С 80.

95. Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива, часть 3. Классификация древесных брикетов. ГОСТ 33103.03 – 2017 (ISO 17225 – 3: 2014, MOD). Москва, Стандартиформ 2017.

96. Технология формирования изделий из пластмасс методом экструзии.

Лекции по ТППМ. Самарский государственный технический университет, 2019.

97. Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. / Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 180-194. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194. – EDN WXRKVJ.

98. Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. / Анализ влияния теплотехнических характеристик сырья на физико-механические свойства комбинированного брикета // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27. № 2. – С. 197-210. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-197-210.

Приложение 1

1. Тепловой и аэродинамический расчет котлоагрегата БКЗ 75-39 ФБ

Исходные данные для расчета:

Тип котла - барабанный, с естественной циркуляцией.

Паропроизводительность $D_{пе} = 20,8$ кг/с;

Давление перегретого пара $P_{пе} = 4$ МПа;

Температура перегретого пара $t_{пе} = 440$ °С;

Температура питательной воды $t_{пв} = 145$ °С;

Температура холодного воздуха $t_{хв} = 30$ °С;

Температура уходящих газов $\vartheta_{yx} = 120$ °С;

Температура горячего воздуха $t_{зв} = 290$ °С;

Непрерывная продувка $p = 3$ %;

Состав топлива:

- Топливо – комбинированный топливный брикет;
- влажность $W_i^r = 3,7$ %;
- зольность $A^r = 0,2$ %;
- сера общая $S_{p+o}^r = 0$ %;
- углерод $C^r = 53$ %;
- водород $H^r = 7,6$ %;
- азот $N^r = 0,5$ %;
- кислород $O^r = 35$ %;
- низшая теплота сгорания $Q_i^r = 21 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$;
- приведенная влажность $W_{np}^r = 0,16 \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}}$;
- приведенная зольность $A_{np}^r = 0,011 \frac{\% \cdot \text{кг}}{\text{МДж}}$;

- выход летучих газов на горючую массу $V^{daf} = 85 \%$;

Расчет объемов и энтальпий продуктов сгорания

Коэффициенты избытка воздуха по газоходам котлоагрегата:

Топка на выходе	$\alpha_T = 1,2$
Фестон	$\alpha_\phi = \alpha_T$
Пароперегреватель (1 ст.)	$\alpha_{пе3-4} = \alpha_T + \Delta\alpha_{пе} = 1,23$
Пароперегреватель (2 ст.)	$\alpha_{пе1} = \alpha_{пе3-4} + \Delta\alpha_{пе} = 1,26$
Водяной экономайзер (2 ст.)	$\alpha_{вэ2} = \alpha_{пе1} + \Delta\alpha_{вэ} = 1,28$
Воздухоподогреватель (2 ст.)	$\alpha_{вп2} = \alpha_{вэ2} + \Delta\alpha_{вп} = 1,31$
Водяной экономайзер (1 ст.)	$\alpha_{вэ1} = \alpha_{вп2} + \Delta\alpha_{вэ} = 1,33$
Воздухоподогреватель (1 ст.)	$\alpha_{вп1} = \alpha_{вэ1} + \Delta\alpha_{вп} = 1,36$

Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания

Теоретически необходимое количество воздуха:

$$V_B^O = 0,0889(C^r + 0,375S_{p+o}^r) + 0,265H^r - 0,0333O^r = 5,57 \frac{M^3}{K^2};$$

Теоретический объем азота:

$$V_{N_2}^O = 0,79 V_B^O + 0,008 N^r = 4,4 \frac{M^3}{K^2};$$

Объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2} = 0,01866(C^r + 0,375S_{p+o}^r) = 1,039 \frac{M^3}{K^2};$$

Теоретический объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^O = 0,111H^r + 0,0124W_t^r + 0,016V_B^O = 0,983 \frac{M^3}{K^2};$$

Теоретический объем газов:

$$V_\Gamma^O = V_{RO_2} + V_{N_2}^O + V_{H_2O}^O = 6,419 \frac{M^3}{K^2}.$$

Дальнейший расчет объемов продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата представлен в виде таблицы - объемы продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата (таблица 1).

Таблица 1 - Объемы продуктов сгорания по газоходам котлоагрегата

Наименование	Топка, Фестон	1 ст. ПП	2ст. ПП	2-й В.Э	2-й ВП	1-й В.Э	1-й ВП
Коэффициент избытка воздуха за поверхностью, α	1,2	1,23	1,26	1,28	1,31	1,33	1,36
Среднее значение коэффициента избытка воздуха в газоходе, α_{cp}	1,2	1,215	1,245	1,255	1,295	1,3	1,345
Объем водяных паров в газоходе: $V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \cdot (\alpha_{cp} - 1) \cdot V_g^o$, м ³ /кг	1,001	1,002	1,005	1,006	1,009	1,0099	1,014
Объем дымовых газов: $V_z = V_z^o + 1,0161 \cdot (\alpha_{cp} - 1) \cdot V_g^o$, м ³ /кг	7,55	7,63	7,8	7,86	8,08	8,12	8,37
Объемная доля трехатомных газов: $r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_z}$	0,138	0,136	0,133	0,132	0,128	0,127	0,124
Объемная доля водяных паров: $r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_z}$	0,133	0,131	0,129	0,128	0,125	0,124	0,121
Объемная доля трехатомных газов и водяных паров: $r_n = r_{H_2O} + r_{RO_2}$	0,27	0,267	0,262	0,26	0,253	0,252	0,245
Концентрация золовых частиц: $\mu_{зл} = \frac{A^r \cdot \alpha_{yn}}{100 \cdot G_z}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Масса дымовых газов: $G_2 = 1 - \frac{A^r}{100} +$ $1,306 \cdot \alpha_{cp} \cdot V_6^o,$ кг/кг	9,7	9,8	10,05	10,12	10,411	10,447	10,774
--	-----	-----	-------	-------	--------	--------	--------

[illegible]

Тепловой баланс котлоагрегата

1. Располагаемое тепло топлива. Для большинства видов достаточно сухих и малозольных топлив и газового топлива принимается:

$$Q_p = Q_i^r = 21000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

2. Температура уходящих газов: $\vartheta_{yx} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Энтальпия уходящих газов (см. таблицу 4): $I_{yx} = 1399 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

4. Температура холодного воздуха принимаем: $t_{xв} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Энтальпия холодного воздуха (см. таблицу 4): $I_{xв}^0 = 221 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

6. Потери тепла от химического недожога: $q_3 = 0 \text{ } \%$.

7. Потери тепла от механического недожога: $q_4 = 1,5 \text{ } \%$.

8. Потери тепла с уходящими газами:

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{вп1} \cdot I_{xв}^0)(100 - q_4)}{Q_p} = 5,15 \text{ } \%.$$

9. Потери тепла от наружного охлаждения: $q_5 = 0,5 \text{ } \%$.

10. Потери с теплом шлака: $q_6 = 0 \text{ } \%$.

11. Сумма тепловых потерь:

$$\sum q = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 7,15 \text{ } \%.$$

12. КПД котлоагрегата «брутто»:

$$\eta_{ка} = 100 - \sum q = 92,85 \text{ } \%.$$

13. Коэффициент сохранения тепла:

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{ка} + q_5} = 0,99.$$

14. Температура перегретого пара: $t_{ne} = 440 \text{ }^\circ\text{C}$.

15. Давление перегретого пара: $P_{ne} = 4 \text{ МПа}$.

16. Теплосодержание перегретого пара: $i_{ne} = 3307 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

17. Температура питательной воды: $t_{ne} = 145 \text{ }^\circ\text{C}$.

18. Энтальпия питательной воды:

$$i_{\text{пв}} = 601 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

19. Энтальпия продувочной воды:

$$i_{\text{кип}} = 1115 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

20. Непрерывная продувка:

$$D_{\text{пр}} = 0,01 \cdot p \cdot D_{\text{пе}} = 0,624 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

где $p = 3\%$ – процент продувки.

21. Полезно использованное тепло:

$$Q_{\text{ка}} = D_{\text{пе}} \cdot (i_{\text{пе}} - i_{\text{пв}}) + D_{\text{пр}} \cdot (i_{\text{кип}} - i_{\text{пв}}) = 56606 \text{ кВт}.$$

22. Полный расход топлива:

$$B = \frac{Q_{\text{ка}}}{Q_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{ка}}} \cdot 100 = 2,903 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

23. Расчетный расход топлива:

$$B_{\text{р}} = \frac{B \cdot (100 - q_4)}{100} = 2,86 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Тепловой расчет топочной камеры

Таблица 1.2 – Результаты расчета топочной камеры

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Адиабатная температура горения $\vartheta_{\text{а}}$, °С	1668
Действительная температура газов на выходе из топки $\vartheta''_{\text{т}}$, °С	1043
Энтальпия газов на выходе из топки $I''_{\text{т}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	12277
Средняя тепловая нагрузка лучевоспринимающей поверхности $q_{\text{л}}$, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	72
Теплонапряжение топочного объема $q_{\text{в}}$, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$	135

Фестон

Таблица 1.3 – Результаты расчета фестона

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в фестон $\vartheta'_{\phi} = \vartheta''_T, ^\circ C$	1043
Температура газов за фестоном $\vartheta''_{\phi}, ^\circ C$	987
Погрешность расчёта (невязка) $\Delta Q = \frac{Q_T - Q_6}{Q_6} \cdot 100, \%$	0,21

Пароперегреватель 1 ступени

Таблица 1.4 – Результаты расчета пароперегревателя 1 ступени

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в ПП 1 $\vartheta', ^\circ C$	987
Температура газов за ПП 1 $\vartheta'', ^\circ C$	771
Температура пара на входе в ПП 1 $t', ^\circ C$	256
Температура пара на выходе из ПП 1 $t'', ^\circ C$	348
Площадь поверхности ПП 1 H, m^2	273

Пароперегреватель 2 ступени

Таблица 1.5 - Результаты расчета пароперегревателя 2 ступени

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в ПП 2 $\vartheta', ^\circ\text{C}$	771
Температура газов за ПП 2 $\vartheta'', ^\circ\text{C}$	608
Температура пара на входе в ПП 2 $t', ^\circ\text{C}$	348
Температура пара на выходе из ПП 2 $t'', ^\circ\text{C}$	440
Площадь поверхности ПП 2 $H, \text{м}^2$	492

Водяной экономайзер 2 ступени

Таблица 1.6 - Результаты расчета водяного экономайзера 2 ступени

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в ВЭ 2 $\vartheta', ^\circ\text{C}$	608
Температура газов за ВЭ 2 $\vartheta'', ^\circ\text{C}$	497
Температура воды на входе в ВЭ 2 $t', ^\circ\text{C}$	170
Температура воды на выходе из ВЭ 2 $t'', ^\circ\text{C}$	210
Площадь поверхности ВЭ 2 $H, \text{м}^2$	605

Воздухоподогреватель 2 ступени

Таблица 1.7 - Результаты расчета воздухоподогревателя 2 ступени

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в ВП 2 $\vartheta', ^\circ\text{C}$	497
Температура газов за ВП 2 $\vartheta'', ^\circ\text{C}$	384
Температура воздуха на входе в ВП 2 $t', ^\circ\text{C}$	170
Температура воздуха на выходе из ВП 2 $t'', ^\circ\text{C}$	290
Площадь поверхности ВП 2 $F, \text{м}^2$	593

Водяной экономайзер 1 ступени

Таблица 1.6 - Результаты расчета водяного экономайзера 1 ступени

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в ВЭ 1 $\vartheta', ^\circ\text{C}$	384
Температура газов за ВЭ 1 $\vartheta'', ^\circ\text{C}$	277
Температура воды на входе в ВЭ 1 $t', ^\circ\text{C}$	155
Температура воды на выходе из ВЭ 1 $t'', ^\circ\text{C}$	170

Площадь поверхности ВЭ 1 Н, м ²	1271
---	------

Воздухоподогреватель 1 ступени

Таблица 1.8 - Результаты расчета воздухоподогревателя 1 ступени

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов на входе в ВП 1 $\vartheta', ^\circ\text{C}$	277
Температура газов за ВП 1 $\vartheta'', ^\circ\text{C}$	120
Температура воздуха на входе в ВП 1 $t', ^\circ\text{C}$	30
Температура воздуха на выходе из ВП 1 $t'', ^\circ\text{C}$	170
Площадь поверхности ВП 1 Н, м ²	2437

Невязка баланса теплового расчета

Невязка баланса:

$$\Delta Q = Q_p \cdot \frac{\eta_{ка}}{100 - q_4} - (Q_{\Gamma} + Q_{\phi} + Q_{mn1} + Q_{mn2} + Q_{\epsilon\epsilon1} + Q_{\epsilon\epsilon2}) = 75,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Относительная невязка:

$$\frac{\Delta Q}{Q_p} \cdot 100 = 0,45 \%. \text{ (если невязка меньше 0,5\%, то перерасчет не требуется)}$$

Аэродинамический расчет котлоагрегата БКЗ 75-39 ФБ

Таблица 1.1 – Результаты аэродинамического расчета котла БКЗ 75-39 ФБ

<u>Параметры</u>	<u>Топливный брикет 50/50%</u>
Температура газов в циклоне	116 °С
Скорость газов в циклоне	2,73 м/с
Скорость газов в устье дымовой трубы	9,9 м/с
Расчетная высота дымовой трубы	27 м
Перепад полных давлений по газовому тракту	2008 Па
Расчетная производительность дымососа	117 м ³ /с
Приведенный напор для выбора дымососа	2611 Па
Выбранный дымосос	ДН 22х2 (2 шт.)
Необходимая мощность электродвигателя дымососа	17,9 кВт
Перепад полных давлений по воздушному тракту	2822 Па
Расчетная производительность вентилятора	67 м ³ /с
Приведенный напор для выбора вентилятора	3105 Па
Выбранный вентилятор	ВДН-21 (3 шт.)
Необходимая мощность электродвигателя вентилятора	14,6 кВт

2. Расчет выбросов, загрязняющих атмосферу в топках различной конструкции

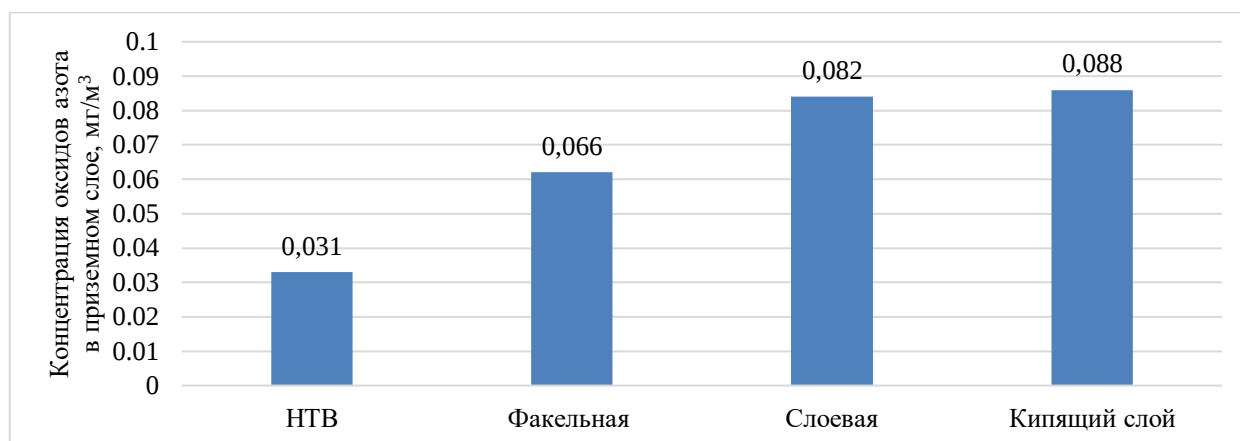


Рис. 2 – Результаты расчета вредных выбросов в топках различной конструкции

3. Технические характеристики древесных брикетов в соответствии с ГОСТ 33103.03 – 2017.

Наименование показателя	Наименование технической характеристики. Метод определения	Единица измерения	Значение технической характеристики для брикетов основного класса		
			A1	A2	B ^a
Нормируемые характеристики	Происхождение и источник получения, ГОСТ 33103.1		1.1.3 Древесные стволы 1.2.1 Химически не обработанные древесные отходы ^b	1.1.1 Целые деревья без корневой системы 1.1.3 Древесные стволы 1.1.4 Отходы лесозаготовки 1.2.1 Химически не обработанные древесные отходы ^b	1.1 Лесные деревья, древесные насаждения и другая природная древесина 1.2 Побочные продукты и отходы деревообрабатывающей промышленности 1.3.1 Химически не обработанная использованная древесина
	Диаметр (D) или длина (L ₁), ширина (L ₂) и высота (L ₃) Согласно рисунку 1	мм	Указывают диаметр, ширину, высоту и длину	Указывают диаметр, ширину, высоту и длину	Указывают диаметр, ширину, высоту и длину
		Форма	Согласно рисунку 1 указывают 1 или 2 и т. д	Согласно рисунку 1 указывают 1 или 2 и т. д	Согласно рисунку 1 указывают 1 или 2 и т. д
	Массовая доля влаги, M, ISO 18134-1 [9], ГОСТ 32975.2	% на рабочее (влажное) состояние	M12 ≤ 12	M15 ≤ 15	M15 ≤ 15
	Зольность, A, ГОСТ 32988	% на сухое состояние	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Плотность частиц, DE, ISO 18847 [10]	г/см ³ на рабочее состояние	DE1.0 ≥ 1,0	DE0.9 ≥ 0,9	DE0.9 ≥ 0,9
	Добавки ^c	% на рабочее состояние	≤ 2 Указывают тип и количество добавок	≤ 2 Указывают тип и количество добавок	≤ 2 Указывают тип и количество добавок
	Низшая теплота сгорания, Q ^d , ГОСТ 33106	МДж/кг или кВт·ч/кг на рабочее состояние	Q15.5 ≥ 15,5 или Q4.3 ≥ 4,3	Q15.3 ≥ 15,3 или Q4.25 ≥ 4,25	Q14.9 ≥ 14,9 или Q4.15 ≥ 4,15
	Массовая доля азота, N, ГОСТ 32985	% на сухое состояние	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Массовая доля серы, S, ГОСТ 33256	% на сухое состояние	S0.04 ≤ 0,04	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05
	Массовая доля хлора, Cl, ГОСТ 33256	% на сухое состояние	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03

Рис. 3 - Технические характеристики древесных брикетов

Наименование показателя	Наименование технической характеристики. Метод определения	Единица измерения	Значение технической характеристики для брикетов основного класса		
			A1	A2	B ^a
Нормируемые характеристики	Содержание мышьяка, As, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Содержание кадмия, Cd, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Содержание хрома, Cr, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Содержание меди, Cu, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Содержание свинца, Pb, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Содержание ртути, Hg, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Содержание никеля, Ni, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Содержание цинка, Zn, ISO 16968 [11]	мг/кг на сухое состояние	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Справочные характеристики	Поверхность брикетов на единицу массы, включая полную общую поверхность, если есть сведения	см ² /кг	Следует указывать	Следует указывать	Следует указывать
^a Брикеты класса В не рекомендуется использовать в хлебопекарных печах. ^b Присутствие незначительного количества клея, смазочного масла или добавок других лесоматериалов, которые используются на деревообрабатывающих предприятиях при производстве пиломатериалов и изделий из дерева, допустимо, если все показатели, характеризующие химические свойства брикетов, укладываются в указанные пределы и концентрация этих примесей слишком мала, чтобы принимать ее во внимание. ^c Указывают тип добавок, способствующих производству, транспортировке или сжиганию брикетов (связующие вещества при прессовании, ингибиторы шлакообразования или любые другие добавки, например, крахмал, кукурузная мука, картофельная мука, растительное масло, лигнин). ^d Вычисление низшей теплоты сгорания на рабочее состояние по ГОСТ 33103.1, приложение D.					

Рис. 3.1 - Технические характеристики древесных брикетов (продолжение)

4. Техничко-экономическое обоснование использования инновационных топливных брикетов

Полученный топливный брикет, так же, как и древесный брикет, является экологично-чистым топливом и плата за вредные выбросы будет минимальна, он, также, имеет более высокую теплотворную способность, составляющую 21 МДж/кг в то время, как диапазон низших теплот сгорания древесных брикетов, как правило, находится в пределах 17-18 МДж/кг на рабочую массу при той же влажности, что и полученный комбинированный брикет.

Помимо этого, снижаются затраты на подготовку топлива, в частности на сушку и размол. Так как, в случае с НТВ-технологией, топливо не нуждается в мелкодисперсном размоле, а подается в виде дробленки, то затраты электроэнергии на его размол значительно снижаются.

В сводной таблице 4, материального и теплового баланса, приведены расчетные (полученные) значения при сжигании инновационного брикета и стандартного древесного брикета с влажностью 4%

Таблица 4 – сводная таблица материального и теплового баланса

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	21	17
Объем дымовых газов V_r , м ³ /кг; м ³ / м ³	6,4	6,9
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °C	120	120
Потери тепла с ух. газами q_2 , %	5,2	6,3

Сумма тепловых потерь в котле, %	7,2	8,3
КПД котла $\eta_{ка}$, %	92,85	91,75
Расчетный расход топлива B_p , кг/с	2,86	3,5

Исходя из таблицы 4 можно сделать вывод, что при использовании описанного в работе комбинированного брикета возрастает КПД котла более чем на 1% из-за снижения потерь с уходящими газами при одинаковых температурах, незначительно снижается объем дымовых газов и 21% снижается расход топлива. Эти факторы приводят к снижению экономических затрат на потребление топлива котлоагрегатом, снижаются затраты электроэнергии на работу дымососа и повышается общая эффективность работы котла и вспомогательного оборудования.

Тем самым, только за счет уменьшения расхода топлива, возрастет экономический эффект использования инновационного комбинированного брикета, при таких же номинальных параметрах котлоагрегата. Данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Общая экономия на топливоснабжение

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Розничная цена на тонну топлива, руб.	6500	6500
Годовой расход топлива, т/год	90193	110376
Затраты на топливо в год, без учета логистики, млн. руб.	586,3	717,4

5. Полученные акты апробации работы

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Проммонтажсервис НТ»
А.А. Таразанов
5 мая 2025 г

печать

Акт

об использовании отходов опытной выработки ламинированной бумаги (бумаги с покрытием из синтетических полимеров) для их применения при получении биотоплива – брикетов из древесных опилок и отходов производства бумаги с покрытием из синтетических полимеров

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что в период с октября 2024 года по февраль 2025 года при проведении опытных выработок целлюлозного композиционного материала - ламинированной бумаги (бумаги с покрытием из синтетических полимеров) получаемые отходы (обрезаемые кромки, заправочная рвань и др.) были использованы при получении биотоплива – топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием.

Цель опытно-промышленной выработки

Получение в опытных условиях отходов целлюлозного композиционного материала (ЦКМ) - ламинированной бумаги (бумаги с покрытием из синтетических полимеров) для их использования при получении биотоплива – топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием.

Выработка ЦКМ

Образцы ЦКМ с покрытием из полиэтилена (ПЭ) низкой плотности (полиэтилен высокого давления) получали на пилотной экструзионной ламинаторной установке (ПЭЛУ, ООО «МАШПЛАСТ», Россия, 2004 г.).

Для выработки использовалась мешочная бумага SKI 80 массой метра квадратного 80 г/м² производства Сегежа - Группы и полиэтилен низкой плотности (полиэтилен высокого давления марки 11503-070, показатель текучести 7г/10 мин., ПАО «Сибур-Холдинг», Россия).

Целлюлозный композиционный материал получен в рамках учебного процесса, при выполнении выпускных бакалаврских работ и магистерских диссертаций.

По результатам проведенной выработки получено пять килограмм отходов, полностью переработанных в композиционные древесно-полимерные брикеты.

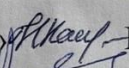
Выводы

1. Проведенная выработка показала, что при получении целлюлозного композиционного материала - ламинированной бумаги (бумаги с покрытием из синтетических полимеров) все получаемые отходы могут быть использованы при получении биотоплива – топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием.

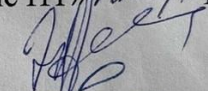
2. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе, при выполнении выпускных бакалаврских работ и магистерских диссертаций.

3. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении НИР и НИОКР в рамках выполнения Стратегического проекта «Приоритет 2030», «Создание новых видов биоразлагаемой упаковки и новых видов биотоплива» на предприятиях ООО «Светоупак», в г. Светогорске, на предприятии ООО Торговый Дом «Славфарбен» (ООО ТД «Славфарбен», 152025, Россия, Ярославская область, город Переславль-Залесский, площадь Менделеева д.2ф и др.).

4. Запланированные результаты выполнены в полном объеме.

Заместитель директора ООО «Проммонтажсервис НТ»  Н.В. Калинина

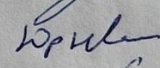
Заведующий кафедрой ТЦКМ д.т.н., проф.

 Э.Л. Аким

Заведующая лабораторией кафедры ТЦКМ

 О.А. Ерохина

Заведующая лабораторией кафедры ТЦКМ

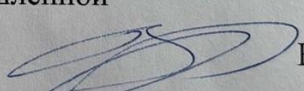
 Ю.Т. Юрьева

Старший преподаватель кафедры ТЦКМ

 В.Н. Селезнёв

Старший преподаватель кафедры промышленной

теплоэнергетики

 В. А. Рыжиков



«УТВЕРЖДАЮ»

«генеральный» директор ООО «ПРОМТЕЙ»

В.А.Горбач

«28» мая 2025 г.

АКТ

промышленного использования и опытно-промышленных испытаний по производству инновационных комбинированных топливных брикетов.

Повышение эффективности использования биотоплива – топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт об использовании результатов диссертации Рыжикова В.А. на тему «Повышение эффективности использования биотоплива – топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием».

Авторы разработки: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (г. Санкт-Петербург) в лице старшего преподавателя кафедры промышленной теплоэнергетики Рыжикова Владимира Александровича, Луканина Павла Владимировича – доктора технических наук, профессора, первого проректора ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», директора Высшей школы технологии и энергетики, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой ТЦКМ Акима Эдуарда Львовича.

Объекты исследования: Комбинированные топливные брикеты, состоящие из древесных опилок и отходов ламинированной бумаги (обрезные кромки, заправочная рвань и др.), содержащих синтетические полимеры (полиэтилен низкой плотности), полученные в ООО «Проммонтажсервис НТ», в период с октября 2024 года по февраль 2025 года на пилотной экструзионной ламинаторной установке (ПЭЛУ, ООО «МАШПЛАСТ», Россия) при проведении опытных выработок целлюлозного композиционного материала - ламинированной бумаги (бумаги с покрытием из синтетических полимеров) и полученные на промышленной экструзионной ламинаторной установке ООО Торговый Дом «Славфарбен» (ООО ТД «Славфарбен», 152025, Россия, Ярославская область, город Переславль-Залесский, площадь Менделеева д.2ф), полученные отходы были использованы при получении инновационных комбинированных видов биотоплива – брикетов из древесных опилок и промышленных отходов производства бумаги с покрытием из синтетических полимеров.

Цель опытно-промышленной выработки. Оценить возможность промышленного производства комбинированных брикетов из предлагаемых видов сырья по имеющейся технологии, а также сопоставить конечные

физико-механические параметры готового продукта с результатами лабораторных испытаний. Получить в опытно-промышленных условиях инновационные комбинированные виды биотоплива из отходов целлюлозного композиционного материала (ЦКМ) - ламинированной бумаги (бумаги с покрытием из синтетических полимеров) для их сжигания в низкотемпературных вихревых топках.

Адрес и статус производства: 666033, обл. Иркутская, г. Шелехов, пр-кт Строителей И Монтажников, д. 17. ООО «ПРОМЕТЕЙ» является организацией по производству пиломатериалов, профилированных по кромке; производству древесного полотна, древесной муки; производству технологической щепы или стружки (код по ОКВЭД 16.10.2) (электронный ресурс: https://www.audit-it.ru/contragent/1153850015318_ooo-prometey).

Ответственные за апробацию со стороны производства: технический директор ООО «ПРОМЕТЕЙ» Александр Андреевич Пекарец.

Результаты апробации: Предложенный авторами комбинированный биотопливный брикет, состоящий из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги, содержащей синтетические полимеры, позволяет производить его в промышленных масштабах по имеющейся технологии, реализуемой на предприятии ООО «ПРОМЕТЕЙ», а также на аналогичной линии в Меленках (ООО МЕЛЕНКИ ЛЕС, Владимирская обл.). Физико-механические свойства полученных на предприятии брикетов соответствуют ранее заявленным количественным величинам, полученным в лабораторных условиях. Полученный комбинированный брикет позволяет повысить энергетическую эффективность предприятий, а также, снижаются затраты на транспортировку и хранение за счет высокой плотности и прочности брикета.

Акт составили

технический директор ООО «ПРОМЕТЕЙ»,
кандидат технических наук
А.А. Пекарец

старший преподаватель кафедры
промышленной теплоэнергетики
В. А. Рыжиков

