

**РЫЖИКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре промышленной теплоэнергетики и кафедре технологии целлюлозы и композиционных материалов в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель: **Луканин Павел Владимирович** – доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», директор Высшей школы технологии и энергетики.

Официальные оппоненты: **Сафин Рушан Гареевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Колибаба Ольга Борисовна** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»

Защита состоится «17» сентября 2025г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.11 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. СПб, ул. Ивана Черных,4, <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095 Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении учёных степеней).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Соколова Виктория Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В связи с переходом к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике, вопросы переработки отходов производства ламинированной бумаги – бумаги с покрытием из синтетических полимеров, являются актуальными и своевременными. При производстве ламинированной бумаги не всегда есть возможность утилизировать отходы производства (обрезки кромок, заправочный брак) и чаще всего отходы располагают на свалках. Это не только увеличивает площади полигонов, но и приводит к дополнительным выбросам диоксида углерода при их гниении без получения полезной энергии.

**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.

**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 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. 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.** Использование полученных комбинированных брикетов позволяет снизить концентрацию вредных выбросов в атмосферу, утилизировать синтетические отходы, повысить теплотворную способность твердого биотоплива, понизить энергетические и экономические затраты на подготовку топлива, транспортировку и топливоснабжение. Сжигание комбинированных топливных брикетов позволит предприятиям использовать полученную тепловую энергию для собственных нужд.

**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 лабораториях кафедры ПТЭ и кафедры ТЦКМ Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД.

Измельчение исходных видов сырья выполнялось с помощью лабораторной дисковой мельницы сухого размола; ситовый анализ исходных материалов, высушивание обоих видов сырья до одинаковой влажности, изучение термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины выполнялось с помощью специализированных приборов, определение низшей теплоты сгорания полученного брикета проводилось с помощью лабораторного калориметра, проведение теплотехнических расчетов топочных камер различной конструкции велось согласно нормативному методу.

**Степень достоверности результатов.** Экспериментальные исследования по определению основных параметров и свойств полученных комбинированных брикетов 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: VII Международная научно-техническая конференция памяти профессора В.И. Комарова «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» - Архангельск, САФУ, 16.09.2023г.; Pulp-For 2023, ВШТЭ, 14.11.2023г.; 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.

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

**Личный вклад автора** заключался в непосредственном участии во всех этапах работы: формулировка цели и задач работы, проведение экспериментальных исследований с последующей обработкой результатов, проведение теплотехнических расчетов, поиск и обработка информации, подготовка публикаций и выступлений на конференциях с докладами по теме работы.

**Соответствие работы паспорту специальности.** Полученные научные результаты соответствуют пункту 6 «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках», пункту 10 «Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды» паспорта специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника» (технические науки).

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех основных глав, выводов по работе, библиографического списка, списка сокращений и 5-и приложений. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста и содержит 25 рисунков, 29 таблиц, 98 наименований использованных источников литературы.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена актуальность работы степень разработанности темы, сформулирована цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость,

обозначены объекты исследования, представлена методология исследования, описана степень достоверности результатов, обозначены положения, выносимые на защиту, апробация работы, личный вклад автора и количество публикаций по теме работы.

**В первом разделе** представлен аналитический обзор литературы, в котором описываются основные положения, связанные с полимерными синтетическими отходами в целлюлозно-бумажной промышленности: образование, сортировка, масштабы и вред, наносимый окружающей среде. Проведен анализ современного рынка синтетических полимеров и объемов их потребления в мире.

**Второй раздел** описывает теоретический подход к решению проблемы утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности. Описывается возможность совместной утилизации отходов ламинированной бумаги с полимерным покрытием и твердых древесных отходов в составе топливных брикетов.

Предлагается использование инновационных комбинированных топливных брикетов, состоящих из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры (полиэтилен).

Выявлено, что при определенных условиях, у полимерных компонентов древесины и синтетических полимеров проявляются свойства термовлагопластичности, что улучшает процесс формирования топливных брикетов и их конечные физико-механические свойства.

**В третьем разделе** представлена экспериментальная часть работы и результаты проведенных исследований по: ситовому анализу измельченных видов сырья, выявлению зависимости изменения влажности исходного сырья от времени пропарки, определению физико-механических свойств брикетов с различными композициями исходного материала при определенных условиях, теплотворной способности полученного брикета, сравнительному анализу расчетных параметров топок различных конструкций, результатам расчета вредных выбросов при сжигании полученного комбинированного брикета и ожидаемому экономическому эффекту при реализации описанного технического решения.

Начальный этап проведения эксперимента заключался в подготовке исходных видов сырья. Отходы ламинированной бумаги и твердые древесные отходы измельчались при помощи лабораторной дисковой мельницы. Был проведен ситовый анализ измельченного сырья. Исследуемые материалы пропускались через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек: R<sub>5000</sub>, R<sub>2000</sub>, R<sub>1000</sub>, R<sub>500</sub>, R<sub>250</sub>, R<sub>100</sub>. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты проведения ситового анализа отходов ламинированной бумаги

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R <sub>5000</sub>	6,5	1,3
R <sub>2000</sub>	7,5	1,5
R <sub>1000</sub>	39	7,8
R <sub>500</sub>	41	8,2
Остаток на поддоне	6	1,2
Сумма	100	20

Размер большей части измельчённых отходов ламинированной бумаги находился в пределах от 1000 до 500 мкм. Размер фракций измельченных древесных отходов находился в пределах 250 – 500 мкм, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты проведения ситового анализа древесных отходов

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

Различный размер фракций древесных отходов и отходов ламинированной бумаги не является негативным фактором для проведения эксперимента. Отличающиеся размеры частиц исходных материалов, в том числе и различные длины волокон, способствуют улучшению прочностных свойств, получаемых композиционных материалов.

Далее были составлены навески смеси двух видов сырья в различных композициях общей массой 2 грамма. Для того, чтобы получить корректные эмпирические данные в процессе проведения эксперимента, влажности двух видов сырья были приведены к одинаковому значению. Для этого использовалось специальное устройство – 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. На рис. 1 приведены экспериментальные данные по влиянию времени пропарки на влажность исходного материала у сырья с различной композицией.

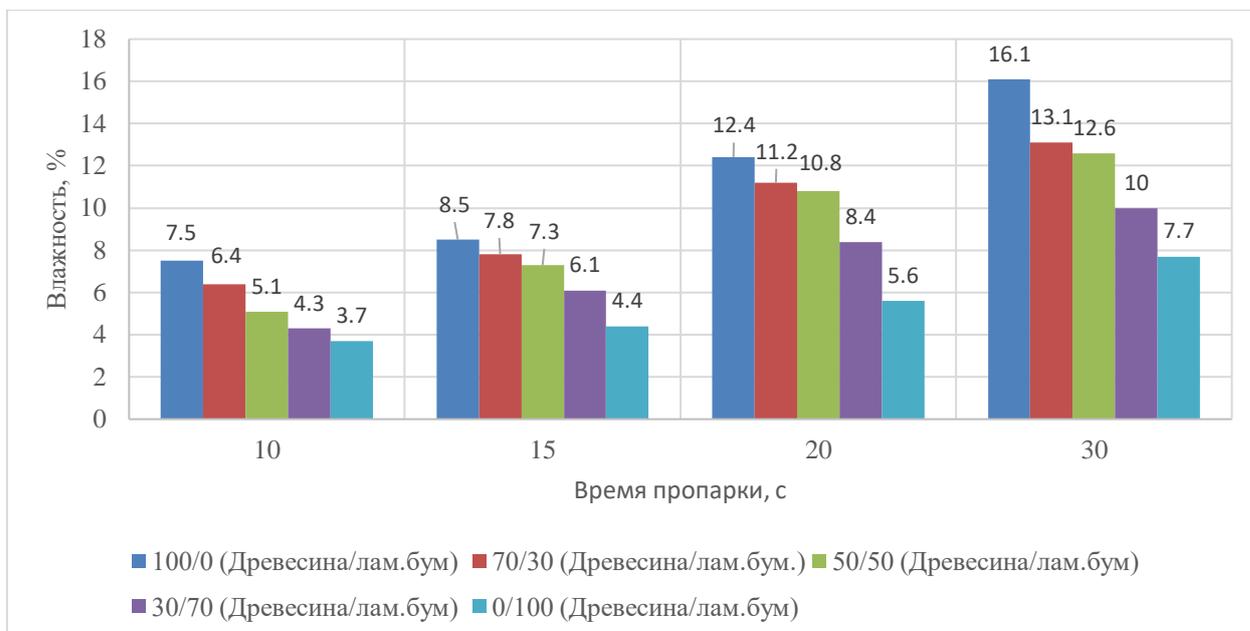


Рис.1 – Зависимость изменения влажности сырья от времени пропарки

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 30/70% (древесина/лам. бумага) линейная функция имеет вид  $W = 1,32 \cdot \tau + 2,05$ ;  $R^2 = 0,9459$ ; (5)

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

Следующий этап проведения эксперимента заключался в процессе формирования топливных брикетов с различными композициями сырья, из заранее подготовленных образцов. Формирование брикетов осуществлялось с помощью цилиндрической пресс-формы на испытательной установке Instron1121 при скорости деформирования  $V = 100$  мм/мин и различных значениях влажности и температуры.

Этапы формирования топливного брикета:

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 с последующим эластическим восстановлением;
3. В процессе прессования производился замер температуры пресс-формы с помощью термопары;

4. Извлечение брикета из пресс-формы и замер его параметров (диаметр и высота) для дальнейшего определения плотности полученного брикета;
5. Определение прочности полученного брикета с давлением на поперечное сечение брикета при скорости деформации  $V = 100$  мм/мин;
6. Анализ влияния температуры и влажности на физико-механические параметры полученного брикета.

По результатам экспериментов были получены результаты, приведенные в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – 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. 2) зависимости средних значений плотности полученных брикетов от влажности при температуре  $20^\circ\text{C}$  во всех трех композициях.

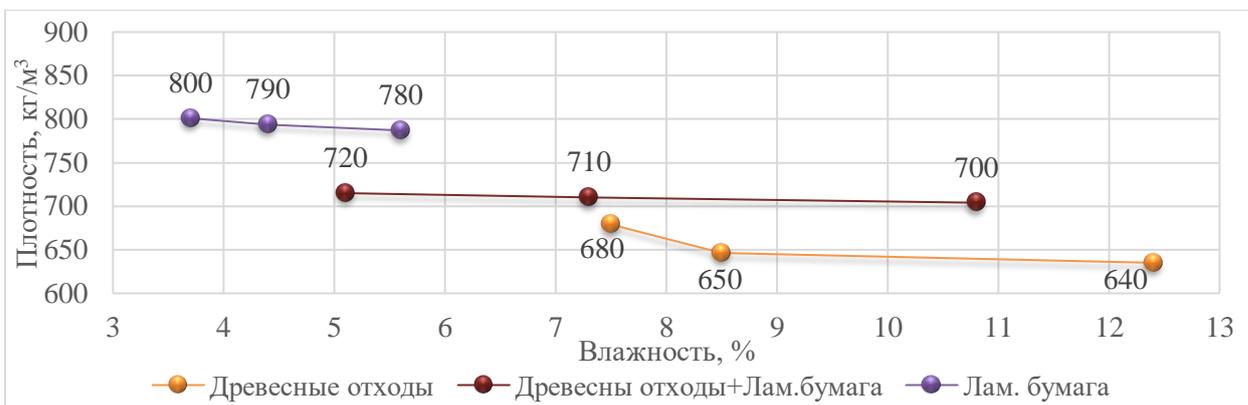


Рис. 2 – Зависимость среднего значения плотности полученных брикетов от влажности для композиций №1,2,3.

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:  $\rho = -33,48 \cdot \ln(W) + 844,36$ ;  $R^2 = 0,9911$ , где (8)

$\rho$  – плотность брикета, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – влажность исходного сырья, %,  $R^2$  – коэффициент аппроксимации.

Таблица 4 – 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 $t, ^\circ\text{C}$	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)	20	8,5	650	5,7	0
	50		900	5,7	70
	80		950	5,2	100
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) зависимости средних значений плотности полученных брикетов от температур (20, 50, 80°C) при времени пропарки 15 с.

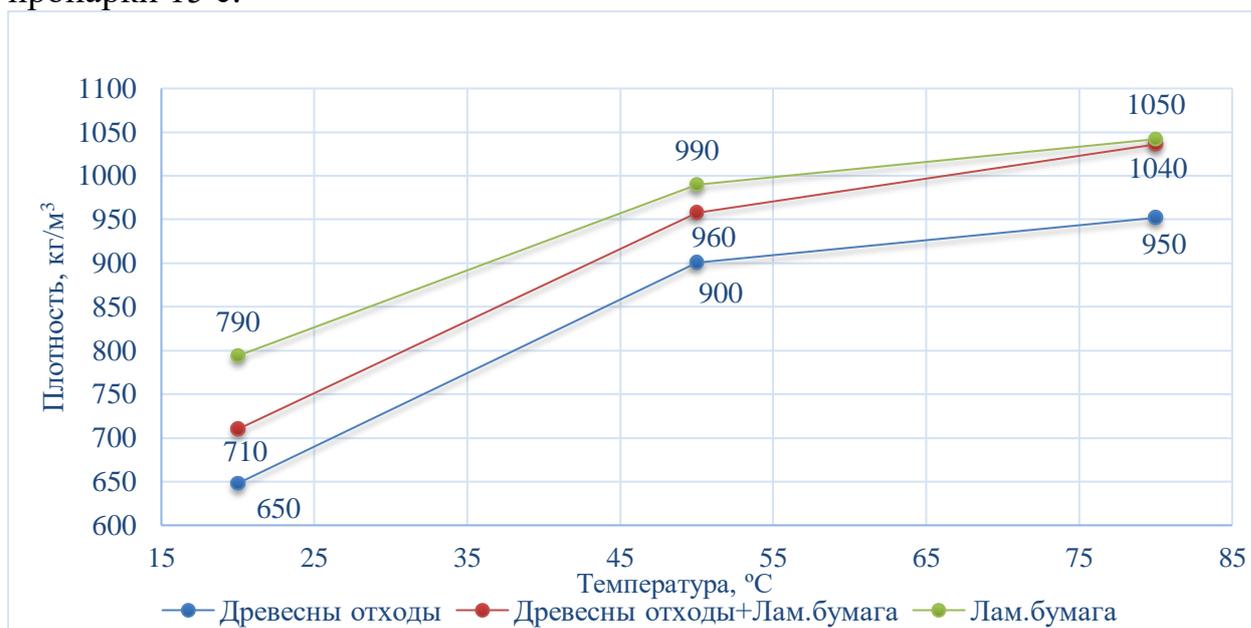


Рис. 3 – Зависимость среднего значения плотности полученных брикетов от температур (20, 50, 80°C) при времени пропарки сырья (15с.) для композиций №1,2,3.

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:  $\rho = 183,7 \cdot \ln(t) + 250,71$ ;  $R^2 = 0,9806$ , где (11)

$\rho$  – плотность брикета, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – температура формирования брикета, °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<sup>3</sup>, 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<sup>3</sup> при 20°C, 950 кг/м<sup>3</sup> при 50°C и 1010 кг/м<sup>3</sup> при 80°C. Самый высокий показатель прочности имела композиция 50/50% при температуре 80°C и он был равен 350 Н. Это объясняется 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<sup>3</sup>.

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

Результаты исследования по определению теплотворной способности топливного брикета в калориметре, в соотношении отходов ламинированной бумаги и древесной муки опилок лиственницы 50/50%, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Теплотворная способность комбинированного топливного брикета в композиции 50/50%

№	$Q^a$ , кДж/кг	$Q^r_s$ , кДж/кг	$Q^r_i$ , кДж/кг
1	25189	22564	21499
2	25796	22832	21157
3	24657	21114	20970
4	23115	21488	20803
5	24485	21322	20001

Среднее значение низшей теплоты сгорания составило  $Q^r_i = 21$  МДж/кг.

Химический состав исследуемого брикета представлен в таблице 6.

Таблица 6 – 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

На диаграмме (рис. 4) приводится сравнение значений низших теплот сгорания полученного топливного брикета, в соотношении 50/50%, и других видов твердых топлив.

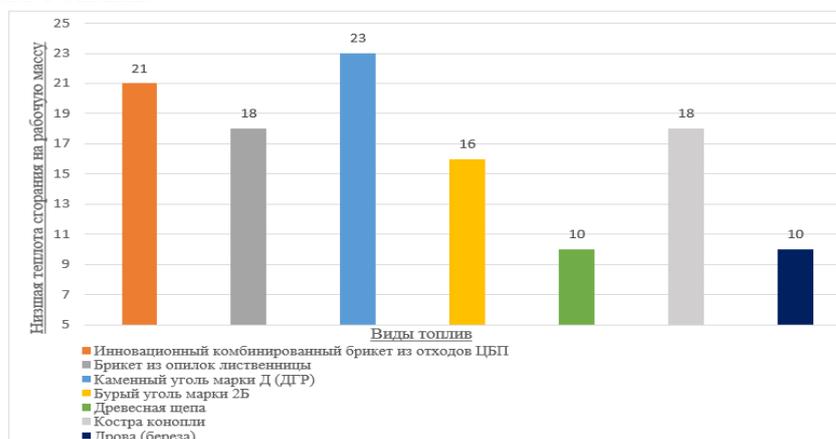


Рис.4 - Диаграмма значений низших теплот сгорания различных видов топлив

Для сжигания полученного комбинированного брикета необходимо было выбрать энергоустановку, позволяющую использовать данный вид топлива с максимальной экологической, энергетической и экономической эффективностью.

Был проведен анализ топок различной конструкции с целью определения наиболее эффективной 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 7.

Таблица 7 – Результаты расчетов котлоагрегата с различными конструкциями топочных камер

Параметр	НТВ	Факельное сжигание	Плотный слой	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 $\vartheta_{ух}$ , °С	120	120	150	145
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки $\alpha$	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 $\eta$ , %	92,8	93,8	86,6	86,1
Расход топлива $B$ , 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 $\vartheta''$ , °С	1064	963	862	801

В качестве примера был выбран котлоагрегат БКЗ 75-39 ФБ с НТВ топкой Померанцева.

Результаты сравнительного расчета образования диоксида азота в топках различной конструкции представлены на рисунке 5.

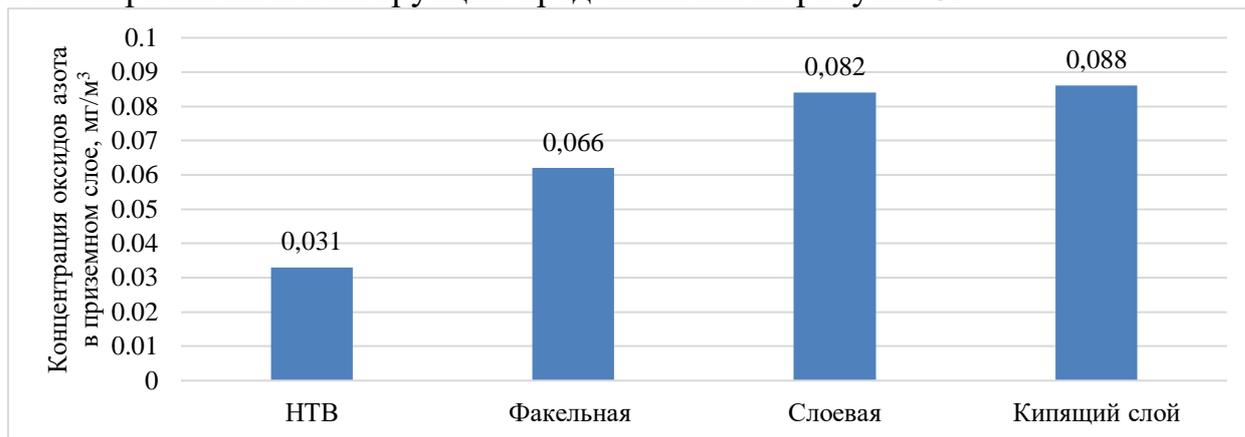


Рис.5 – Результаты расчета образования диоксида азота в топках различной конструкции

В сводной таблице 8 приведены основные результаты расчета теплового баланса котлоагрегата при сжигании полученного брикета и стандартного древесного брикета с влажностью 4%.

Таблица 8 – Сравнение расчетных параметров котлоагрегата при сжигании брикетов

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , МДж/кг	21	18
Температура уходящих газов $\vartheta_{ух}$ , °С	120	120
Сумма тепловых потерь в котле $\sum q$ , %	7,2	8,25
КПД котла $\eta$ , %	92,8	91,75
Расчетный расход топлива $V_p$ , кг/с	2,94	3,5

За счет уменьшения расхода топлива возрастет экономический эффект использования инновационных комбинированных брикетов при таких же номинальных параметрах котлоагрегата. Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Экономический эффект за счет снижения расхода топлива

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

## Выводы по работе

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<sup>3</sup> 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. Выявлены преимущества НТВ-топки по вредным выбросам диоксида азота, обусловленные понижением температуры в зоне активного горения на 200°С 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК*

1. 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.
2. 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.

*Публикации в других изданиях*

3. Рыжиков В. А., Кузнецов А. Г., Уварова Д. Ю. [и др.] / Совместная утилизация твёрдых древесных отходов и отходов целлюлозно-бумажного

производства // XXV международный Биос-форум и молодежная Биос-олимпиада 2020: сборник материалов, Санкт-Петербург, 01–05 октября 2020 года. Том Книга 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 2020. – С. 367-372. – EDN HLBRYL.

4. Рыжиков В. А., Кузнецов А. Г., Аким Э. Л. / Проблемы применения методов переработки отходов целлюлозы и синтетических полимеров // Наука - Технологии - Производство: Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, посвященной инновационному развитию текстильной и легкой промышленности, Санкт-Петербург, 29–31 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. – С. 8. – EDN IJLLGF.

5. 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.

6. Рыжиков В. А., Аким Э. Л., Ерохина О. А., Пекарец А. А. / Совместная переработка в топливные брикеты твёрдых древесных отходов и отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: Материалы V Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 85-89. – EDN LCCLYJ.

7. Федорук С. С., Рыжиков В. А. / Исследование физико-химических свойств комбинированного топливного брикета, содержащего целлюлозу и синтетические полимеры // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей, Санкт-Петербург, 22 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2024. – С. 124-129. – EDN IHMZWK.