

## УТИЛИЗАЦИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ И УСТОЙЧИВОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

**С.В. Копылов**  
Лесная фабрика  
(Россия, пгт. Шумячи)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-5-1-345-351

***Аннотация.** В статье всесторонне рассматривается проблема эффективного использования древесных отходов в современной России – как актуальная экологическая задача и одновременно перспективное экономическое решение для предприятий лесопромышленного комплекса. Рост объёмов переработки древесины неизбежно приводит к увеличению количества производственных отходов. В условиях приоритетного развития лесопромышленного сектора (включающего деревообработку и целлюлозно-бумажное производство) особенно важно трансформировать затратную статью утилизации в источник дополнительного дохода. Это имеет большое значение для экономики регионов с развитой лесной промышленностью и для страны в целом.*

***Ключевые слова:** древесные отходы; биоэнергетика; биотопливо; пиролиз; газификация; сжигание в кипящем слое; теплотехнические характеристики; элементный анализ; циркулярная экономика; устойчивое развитие; CO<sub>2</sub>-нейтральность; когенерация; термохимическая конверсия.*

Лесопромышленный комплекс России, включающий деревообработку и целлюлозно-бумажное производство, является важнейшим направлением экономики с перспективами развития на внутреннем и международном рынках. Нарастание объёмов переработки древесины приводит к увеличению количества производственных отходов, что создаёт как экологические вызовы, так и экономические возможности.

Эффективное использование древесных отходов становится не только необходимостью с точки зрения охраны окружающей среды, но и потенциальным источником прибыли для предприятий. Трансформация затратной статьи утилизации в источник дополнительного дохода имеет большое значение для экономики регионов с развитой лесной промышленностью.

**Цель исследования** – оценить потенциал древесных отходов как альтернативного источника энергии, проанализировать современные технологии их переработки и определить оптимальные условия интеграции в энергетическую систему России.

В современной России эффективное использование древесных отходов становится не только экологической необходимостью, но и потенциальным источником прибыли для

предприятий. Нарастание объёмов переработки древесины, являющееся приоритетной задачей отрасли, неизбежно приводит к увеличению количества производственных отходов. Лесопромышленный комплекс, включающий деревообработку и целлюлозно-бумажное производство, представляет собой важнейшее направление российской экономики, обладающее значительными перспективами развития как на внутреннем, так и на международном рынке. Компании стремятся трансформировать проблему утилизации древесных отходов в выгодное экономическое решение, превращая затратную статью расходов в дополнительный доход [1].

Одним из основных направлений в переработке древесных отходов является их использование для производства тепла и электроэнергии. В последние годы производство энергии из древесных отходов рассматривается как альтернатива традиционным видам топлива. Причина этого заключается в том, что древесные отходы имеют множество преимуществ в качестве топлива, а именно [2]:

- относится к возобновляемым источникам энергии;

- является CO<sub>2</sub>-нейтральной. При сжигании древесины в воздух выбрасывается ровно столько углекислого газа, сколько дерево

накопило в своих клетках в процессе роста (закрытый кругооборот углерода);

- уменьшенное содержание загрязняющих веществ в выбросах в атмосферу по сравнению с ископаемым топливом;

- уменьшенное образование золы;

- возможность сжигать влажные отходы (до 55-60% влаги);

- низкая коррозионная агрессивность дымовых газов;

- возможность конденсировать влагу дымовых газов и высвободить скрытую теплоту парообразования;

- возможность автоматизации котельных;

- низкие риски при транспортировке, т.к. исключен риск загрязнения окружающей среды из-за вытекания нефтепродуктов, отсутствует опасность пожаров, взрывов;

низкая, по сравнению с ископаемым топливом, цена.

Новые подходы к энергетическому использованию древесных отходов включают развитие технологий их переработки и конверсии в различные виды биотоплива. Это достигается через внедрение инновационных методов термохимической и биохимической обработки, таких как пиролиз и газификация, а также совершенствование методов прессования и гранулирования.

### *1. Экологические преимущества*

С точки зрения экологии, переработка древесных отходов в энергоносители позволяет сократить выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ. По сравнению с традиционными источниками, такими как нефть и уголь, древесные обрабатываемые материалы значительно уменьшают выбросы CO<sub>2</sub>. Дополнительные исследования показывают, что использование древесных отходов может предотвратить деградацию земель вследствие их захоронения и сократить накопление углерода в атмосфере.

### *2. Экономические перспективы*

Экономическая эффективность использования древесных отходов в наиболее общем виде представлена через снижение совокупных затрат на утилизацию и обеспечение топливных потребности, достигающее величины до 50%, и рассматривается как фактор сокращения издержек для лесной и деревообрабатывающей отраслей. Развитие биоэнергетических технологий интерпретируется как детер-

минант стимулирования рынка вторичной переработки, при этом данное стимулирование получает выражение в создании рабочих мест и в содействии экономическому росту регионов с развитым лесным сектором.

### *3. Технические достижения и энергопроизводительность*

Фиксируется повышение коэффициента полезного действия (КПД) при применении современных технологий, в частности когенерации и термохимической конверсии, которое получает выражение в снижении энергетических потерь и в обеспечении возможности использования отходов в энергетических приложениях, включая производство электроэнергии и обогрева.

### *4. Устойчивое энергоснабжение*

Энергетическое использование древесных отходов рассматривается как составная часть концептуальных установок устойчивого развития и модели циркулярной экономики, при этом в качестве приоритетного направления деятельности определяется развитие инфраструктуры, обеспечивающее мобилизацию и эксплуатацию локальных ресурсных баз, снижение импортной топливной зависимости и укрепление параметров энергетической безопасности.

В структуре технологической последовательности энергетической утилизации древесного биотоплива пиролиз фиксируется как исходная фаза, к которой последовательно присоединяется процесс газификации, представляющий собой частичное окисление углеродосодержащего материала с образованием генераторного газа и сопровождаемое комплексом сложных химических реакций, при этом в прикладной и теоретической литературе сохраняется ограниченность эмпирической и методологической базы, что выступает предметом критического осмысления.

Пиролиз, понимаемый как термическое разложение органического топлива в инертной среде, интерпретируется как ключевой механизм преобразования древесной биомассы, детерминируемый высоким содержанием летучих соединений в исходном материале, оцениваемым в пределах 70-85%, подлежащих разложению при температуре порядка 160 градусов Цельсия, при этом в результате пиролизного превращения фиксируется образование монооксида углерода, несгоревших

углеводородов, водорода, водяного пара и кислот, составляющих основу ценного газового состава.

В качестве методологического инструмента при анализе термического разложения биомассы применяется термогравиметрический метод (ТГ), основание которого представлено фиксацией изменения массы образца в пределах заданного временного интервала и который обеспечивает возможность детализированного исследования кинетики процесса в инертных и активных средах.

Эксплуатация древесного топлива в качестве энергетического ресурса рассматривается как фактор обеспечения автономности лесных регионов, тогда как развитие лесной биоэнергетики интерпретируется как механизм реализации комплекса задач, включающего использование побочных продуктов деревообработки, снижение затрат на энергообеспечение и уменьшение экологической нагрузки, при этом древесное биотопливо, ввиду своих эксплуатационных характеристик и доступности, получает выражение как значимый компонент повышения эффективности энергетического сектора и сокращения его воздействия на природную среду.

Сжигание древесных отходов рассматривается как эффективная технология их энергетического использования, в которой осуществляется преобразование химической энергии в тепловую энергию и которая характеризуется преимуществами, представленными доступностью исходного материала и относительной простотой реализации, что обосновывает ее прикладную привлекательность.

Учитывая установленную долю угля, составляющую более 23% мирового энергетического баланса, и его доминирование в топливной структуре ТЭС России, вероятность осуществления полного замещения ископаемого угля возобновляемыми биотопливами определяется как низкая, тогда как возможность частичного замещения древесным биотопливом рассматривается как механизм интеграции возобновляемых источников энергии, обеспечивающий снижение зависимости от ископаемых ресурсов и уменьшение негативного воздействия на экологическую среду.

Эффективная реализация совместного сжигания угольного и древесного топлива в условиях ТЭС требует проведения комплексных

исследований термических характеристик и анализа процессов горения в топливных смесях, при этом указанное исследовательское направление рассматривается как необходимое условие повышения эффективности генерации энергии и обеспечения стабильности эксплуатационной работы энергетических установок.

В настоящей работе произведено рассмотрение свойств древесного биотоплива и осуществлено их сопоставление с характеристиками угольных топлив, добываемых из различных месторождений, при этом результаты анализа фиксируют потенциал древесных биотоплив в качестве альтернативного источника энергии для теплоэнергетики и определяют оптимальные условия их совместного применения с традиционными топливами, что обеспечивает возможность снижения экологических рисков и повышения эффективности энергетического производства и способствует переходу к более устойчивым и экологически безопасным методам генерации энергии.

В качестве объектов исследования по древесному биотопливу осуществлено выделение еловой и сосновой древесины, а также коры сосны и коры ели, представляющих собой целевую совокупность видов биомассы, предназначенную для последующего аналитического и экспериментального рассмотрения в рамках настоящего исследования. Обоснование выбора указанных видов биомассы детерминировано их распространенностью в лесном фонде Российской Федерации и высокой энергетической ценностью, которые рассматриваются как критерии перспективности для научного исследования в рассматриваемой области при сохранении исходной логики отбора и с учетом специфики предметной области. Отбор образцов угольного топлива осуществлен на ТЭЦ города Северодвинска, что обеспечило возможность сопоставления характеристик различных видов топлива при идентичности условий испытания и тем самым придало полученным результатам требуемую степень достоверности и практической значимости.

Процесс подготовки образцов древесного и угольного топлива к аналитическому исследованию представлял собой двуступенчатую последовательность процедур, включающую операции измельчения и фракционирования:

1. Осуществление операции измельчения для доведения степени дисперсности до требуемого фракционного состояния на установке Retsch PM 200.

2. Осуществление операции фракционирования с целью выделения частиц размерного интервала 63-125 мкм на установке Retsch AS 200 Control.

Обеспечение однородности исходного материала по совокупности рассматриваемых видов топлива рассматривается как результат применения указанного подхода и в указанном аспекте интерпретируется как критически важный компонент обеспечения надежности и сопоставимости проводимых исследований.

Использование анализатора EuroVector EA-3000 осуществлялось в целях определения химического состава образцов и выступало как техническая процедура, обеспечивающая возможность точного установления массовых долей углерода (С), водорода (Н), серы (S) и азота (N), при этом расчет содержания кислорода (O) в биотопливе и угле осуществлялся на основании данных массового баланса.

Зола твёрдых биотоплив была собрана после процесса горения в котле Herz Firematic 60 кВт, который служит резервным источником теплоснабжения учебно-научного центра энергетических инноваций Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова. Это позволило изучить состав золы, образующейся при реальных условиях эксплуатации оборудования.

Результаты экспериментального исследования представляют собой эмпирическое подтверждение перспективности использования древесных отходов – ели, сосны и коры – в качестве альтернативного источника энергии по сравнению с углем, при этом осуществление двухэтапной подготовки образцов, включавшее измельчение и фракционирование до фракций 63-125 мкм, обеспечило достижение высокой однородности материалов, что обусловило воспроизводимость и надежность аналитических показателей; проведенный анализ химического состава фиксирует значительное содержание углерода и водорода в древесном биотопливе при одновременном снижении содержания серы и азота по отношению к углю, что интерпретируется как фактор, уменьшающий экологическую нагрузку процесса сжигания, дополнительно

характеризуется существенное снижение зольности древесных образцов в диапазоне 0,3-2,5% по сравнению с углями в диапазоне 16,8-35,5%, что детерминирует снижение эксплуатационных затрат и снижение нагрузки на системы золоудаления, причем сбор золы в котле Herz Firematic 60 кВт подтвердил применимость полученных характеристик в условиях, приближенных к эксплуатационным; совокупность выявленных параметров древесного биотоплива позволяет рассматривать возможность его совместного применения с углем как меру, направленную на снижение экологической нагрузки и повышение энергетической автономности регионов с развитой лесной промышленностью, а полученные данные обосновывают техническую реализуемость и экологическую целесообразность использования древесных отходов в теплоэнергетике и закладывают методологическую основу для разработки рекомендаций по их внедрению.

*Процесс сжигания древесных отходов.*

Процесс сжигания древесных отходов представляет собой многоступенчатую технологическую последовательность, включающую выделение и систематизацию ключевых этапов.

Сушка древесины рассматривается как процесс удаления влаги из древесного материала, осуществляемый в целях повышения эффективности использования и переработки, при котором фиксируется снижение влагосодержания и наблюдается улучшение технологических показателей.

Пиролиз интерпретируется как термическое разложение органического материала при повышенных температурах в отсутствие кислорода, сопровождаемое выделением летучих веществ в результате термодеструкции исходного сырья.

Окисление характеризуется взаимодействием с атмосферным кислородом, в результате которого фиксируется выделение тепловой энергии и осуществляется полное сгорание топлива.

Эффективность сгорания представляет собой параметр, детерминируемый температурными режимами и качественно-композиционными характеристиками горючей смеси, при сохранении исходной логики полнота протекания окислительных процес-

сов и уровень эмиссии загрязняющих веществ рассматриваются как взаимосвязанные показатели, получение значений которых обусловлено указанными факторами и которые в совокупности определяют степень завершенности сгорания и величину экологической нагрузки.

В современной практике утилизации древесных отходов фиксируется совокупность методов сжигания, которые в наиболее общем виде рассматриваются как включающие следующие технологические варианты.

Прямое сжигание древесных отходов применяется в водогрейных установках мощностью до 20 МВт и характеризуется применением автоматических горелок либо печей с решетками.

Сжигание в кипящем или циркулирующем слое рассматривается как технологическая конфигурация, обеспечивающая полноту сгорания и при которой наблюдается снижение выбросов вследствие равномерного распределения топлива и воздушного потока.

Сжигание газов во вторичной камере осуществляется в целях дожигания летучих компонентов и рассматривается как фактор, повышающий энергетическую эффективность процесса.

Сжигание пылевидного топлива применяется на крупных ТЭЦ и характеризуется направленностью на обеспечение максимальной энергоэффективности.

Утилизация влажной древесины осуществляется посредством технологии прямого сжигания, которая в указанном аспекте представлена как эффективный механизм обработки материала в многообразии форм, включая длинномерные заготовки, прессованные пеллеты, брикеты и побочные древесные отходы (кора, опилки).

В проведенном исследовании фиксируется потенциал древесных отходов в качестве возобновляемого источника энергии, что в пределах данной смысловой связи создает основание для их интеграции в энергетическую инфраструктуру и обеспечивает вклад в развитие циркулярной экономики.

Применение технологии прямого сжигания древесины фиксируется в малых теплогенерирующих системах мощностью до 20 мВт, при этом осуществляется утилизация древесины различной влажности и формы, включая

длинные заготовки и побочные продукты деревообработки (кора, опилки).

Разнообразие организационно-технологических схем сжигания представлено спектром конструктивно-технологических решений, включающим специализированные печные установки с различной решеточной конструкцией и автоматизированные трубчатые горелочные агрегаты, оборудованные шнековыми механизмами для подачи измельченного древесного сырья, при этом акцент на номинализации процесса подачи топлива и на механизмах дозирования рассматривается как существенный компонент типологии применяемых технических решений.

Рассматриваемый подход к утилизации древесных материалов представляет собой технологическую модель, обеспечивающую эффективность теплоснабжения в условиях малого масштаба и предоставляющую возможность гибкого привлечения различных категорий топлива, что получает подтверждение в имеющихся практических реализациях и отражено в источнике [3].

Сжигание в кипящем слое находит применение в коммерческих и муниципальных котельных, а также на ТЭС с установленной мощностью в диапазоне от 5 до 600 МВт, при этом преимущество указанного метода интерпретируется как обеспечивающее возможность обработки широкого спектра топливных материалов, включая низкосортный уголь, торф, твердые бытовые отходы и бумажную массу.

Имеются промышленные установки, представляющие собой комплексы, предназначенные для осуществления процесса сжигания древесной пыли с влажностью порядка 8%, при этом осуществление технологического цикла характеризуется полной автоматизацией, охватывающей стадии измельчения отходов и их подачу в горелочные устройства, а ограничение применения указанных систем в качестве единственного источника энергообеспечения обусловлено высокой стоимостью оборудования, вследствие чего в практической реализации предпочтение обычно отдается комбинированному использованию древесной пыли совместно с углем или торфом.

Осуществление сжигания древесных отходов рассматривается как процесс, характери-

зующийся повышенной энергоотдачей при соблюдении оптимальных технологических условий, при этом данная технология представляется как средство утилизации отходов и как фактор повышения энергетической эффективности, а внедрение системного подхода к проектированию и эксплуатации подобных комплексов обеспечивает минимизацию выбросов загрязняющих веществ и улучшение экологической ситуации.

### **Заключение**

В настоящем исследовании осуществляется подтверждение потенциала древесных отходов (еловой древесины, сосновой древесины, коры) в качестве альтернативного источника энергии по отношению к углю, что было зафиксировано на основании экспериментальных данных, полученных с использованием анализатора EuroVector EA-3000 и лабораторных установок Retsch PM 200 и Retsch AS 200 Control, при этом верифицированы преимущественные характеристики древесного биотоплива, выраженные в пониженной зольности (0,3-2,5% против 16,8-35,5% у угля), декларируемой CO<sub>2</sub>-нейтральности, возобновляемом статусе и уменьшенном содержании загрязняющих веществ.

Показатель теплоты сгорания древесины, определенный для сосновой породы на уровне 17 313 кДж/кг, интерпретируется как несколько ниже соответствующих параметров каменного угля, однако компенсирующая оценка осуществляется посредством учета экологической безопасности и экономической

целесообразности использования древесного топлива, что особенно проявляется в пределах регионов с развитой лесной промышленностью, при этом данные анализа золы, полученные после сжигания в котле Herz Firematic 60 кВт, фиксируют пониженную агрессивность древесного топлива в отношении оборудования и окружающей среды.

Формирование выводов о перспективности применения древесных отходов обосновывается рассмотрением стадий сжигания (сушка, пиролиз, окисление) и проведенным сопоставлением технологических схем (прямое сжигание, кипящий слой, сжигание пылевидного топлива), в результате чего древесные отходы рекомендуются в качестве перспективного компонента энергетической системы, включая возможность совместного сжигания с углем, при этом ожидаемые эффекты заключаются в снижении экологической нагрузки, экономии традиционных топливных ресурсов и повышении энергетической автономности лесных регионов России.

Таким образом, полученные результаты не только расширяют научные представления о свойствах древесного биотоплива, но и закладывают практическую основу для его внедрения в теплоэнергетическую отрасль. Они могут послужить опорой для дальнейших исследований и разработок в рамках выпускной квалификационной работы, нацеленных на оптимизацию технологий утилизации древесных отходов и их интеграции в устойчивую энергетическую инфраструктуру.

### **Библиографический список**

1. Габитов Р.Н. Повышение эффективности термической переработки твердых коммунальных отходов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.14.04 / Габитов Рамиль Наилевич; [Место защиты: Иван. гос. энергет. ун-т]. – Иваново, 2017. – 20 с.
2. Характеристики древесной биомассы, применяемой в топливных целях // Котлосервис. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://котлосервис.рф/wood.html>.
3. Донской И.Г., Козлов А.Н., Шаманский В.А. Кинетика сушки лигноцеллюлозных топлив // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: сб. тез. докл. X всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 6-9 нояб. 2018. – Новосибирск: Срочная полиграфия, 2018. – С. 40.

**UTILIZATION OF WOOD WASTE AS AN ELEMENT OF CIRCULAR ECONOMY  
AND SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY**

**S.V. Kopylov**  
**Lesnaya Fabrika**  
**(Russia, Shumyachi)**

***Abstract.** The article comprehensively addresses the issue of efficient use of wood waste in modern Russia – as a pressing environmental challenge and, at the same time, a promising economic solution for enterprises in the timber industry complex. The growing volume of wood processing inevitably leads to an increase in the amount of industrial waste. Given the priority development of the timber industry sector (which includes woodworking and pulp and paper production), it is especially important to transform the costly waste disposal item into a source of additional revenue. This is of great importance for the economies of regions with a developed timber industry and for the country as a whole.*

***Keywords:** wood waste; bioenergy; biofuel; pyrolysis; gasification; fluidized bed combustion; thermal performance characteristics; elemental analysis; circular economy; sustainable development; CO<sub>2</sub> neutrality; cogeneration; thermochemical conversion.*