

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА НА ОСНОВЕ БИОМАССЫ

Е.В. Дубоделова\*, Н.А. Герман, С.И. Шпак, И.Г. Федосенко  
*Белорусский государственный технологический университет, Минск*  
*E-mail: katedubodelova@tut.by*

В настоящее время значительную долю на мировом рынке занимает твердое биотопливо, получаемое из различных видов биомассы. Его применение в энергетических целях является актуальным направлением, обеспечивающим сокращение использования таких дефицитных и дорогостоящих источников топлива, как природный газ и нефть. При этом согласно ISO 17225-1 возможна переработка любых видов биомассы (древесная биомасса, плодовая биомасса, травяная биомасса, а также биомасса водных растений, отходы биологического разложения), которая может иметь как природное, так и промышленное происхождение, т.е. в том числе представлять собой отходы.

Основными показателями, обеспечивающими защиту окружающей среды в соответствии с требованиями стандартов, при применении в специальных установках для сжигания биотоплива, являются массовая доля токсичных элементов, а также химических элементов, определяющих его теплотворную способность.

В работе проанализированы неоднородные композиции отходов биомассы и рассмотрена возможность достижения соответствия стандартам различного уровня.

*Ключевые слова: биотопливо, биомасса, отходы, древесина ивы, камыш, хлопчатник, зольность, механическая прочность, теплотворная способность, токсичные элементы.*

Рациональное использование отходов биомассы является одной из основных задач при решении общей проблемы улучшения использования различного растительного сырья в химической промышленности [1]. Даже незначительное количество отходов, образующихся в технологическом процессе, использование которых не предусмотрено технологией производства, приводит со временем к накоплению больших объемов этих отходов. Находясь длительное время в отвалах, отходы различных видов биомассы подвергаются негативному воздействию атмосферного воздуха, влаги, бактерий, грибов и насекомых. Под действием перечисленных факторов биомасса разрушается и теряет свой энергетический потенциал, а в некоторых случаях может выделять большое число различных веществ распада, многие из которых токсичны и канцерогенны [2].

Перспективным направлением использования отходов растительного сырья является получение твердого биотоплива, которое востребовано на мировом рынке и относится к высоко рентабельному виду продукции.

На территории ЕАЭС действует ГОСТ 33103.1-2017, модифицированный по отношению к международному стандарту ISO 17225-1:2014 «Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 1. Общие требования», который предполагает однозначную и четкую классификацию твердого биотоплива. В данном контексте следует отметить то, что товарное твердое биотопливо имеет множество различных размеров и форм. Размеры и форма топлива влияют на его подготовку к сжиганию, а также на свойства горения. Среди основных торговых форм, согласно вышеназванному стандарту, выделяют: целое дерево, щепу, измельченное топливо, стволовая древесина, поленья, дрова, кора, пачки, топливная пыль, опилки, стружка, брикеты, пеллеты, кипы, рубленая солома или энергетическая трава, зерно или семена, косточки или ядра плодов, волокнистый жмых и термически обработанный жмых.

Особенно востребована такая торговая форма твердого биотоплива как пеллеты, классифицируемые по происхождению и источникам получения как древесные. Древесными

пеллетами называют спрессованное в пресс-грануляторе биотопливо, изготовленное из древесной биомассы с добавками или без добавок, обычно в форме цилиндра с обломанными концами длиной от 5 до 40 мм, диаметром до 25 мм (ГОСТ 33103.2-2017 (ISO 17225-2:2014)). По статическим данным FAO [3] производство древесных пеллет за последние годы резко выросло, главным образом благодаря спросу, определяемому целевыми показателями в области развития биоэнергетики, установленными Европейской комиссией. В 2018 году их производство в мире дополнительно увеличилось на 11% и достигло 37 млн. тонн, открывая возможности для сокращения зависимости от ископаемого топлива. Наибольшая доля производства в мире пришлась на Европу и Северную Америку, тем не менее, и в Азиатско-Тихоокеанском регионе в период с 2014 по 2018 год производство пеллет выросло вдвое и достигло 15%.

Следует отметить, что согласно ГОСТ 33103.2-2017 (ISO 17225-2:2014) «Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 2. Классификация древесных пеллет» к древесным пеллетам относят продукцию, произведенную из природной древесины, побочных продуктов и отходов деревообрабатывающей промышленности и химически не обработанной использованной древесины. При этом важно отметить, что при использовании в композиции пеллет других видов биомасс в количестве более 20% они уже не относятся к категории древесных и по происхождению и источникам получения согласно ГОСТ 33103.1-2017 (ISO 17225-1:2014) классифицируются как биотопливная смесь и смешанное биотопливо. При этом в отечественных и зарубежных публикациях существует противоречивая информация о структурном составе твердого биотоплива из разных видов биомассы. Кроме того, нет данных о совместимости различных видов биомасс при производстве востребованных на рынке торговых форм твердого биотоплива. Так, например, в соответствии с СТБ 2027-2010 «Гранулы древесные топливные. Общие технические условия» не рекомендуется использовать отходы растительного происхождения в количестве более, чем 10%. В направлении переработки древесной биомассы следует отметить, что отсутствуют четкие рекомендации по использованию мало ликвидной древесины.

Нормирование показателей качества твердого биотоплива является сложной задачей, исходя из области его применения, происхождения и торговой формы. Особенно это важно для жилых помещений, небольших коммерческих и общественных объектов по следующим причинам:

- небольшие установки, генерирующие энергию, обычно имеют не очень совершенную систему контроля и очистки газообразных продуктов сжигания;
- управление такими установками, как правило, не осуществляется высокопрофессиональными специалистами;
- подобные установки часто располагаются в жилых кварталах и густонаселенных районах.

В связи с вышесказанным национальных и региональных стандартов технических условий на пеллеты существует большое множество, что обусловлено во многом торговыми отношениями производителей пеллет и поставщиков оборудования для их производства. Наиболее часто применяемыми нормативными документами являются следующие:

- Австрия – ONORM M 7135 Austrian Association pellets;
- Англия – The British BioGen Code of Practice for biofuel (pellets);
- Германия – DIN 51731 (briquettes and pellets);
- США – Standard Regulations & Standards for Pellets in the USA: The PFI;
- Швейцария – SN 166000 (briquettes and pellets);
- Швеция – SS 187120 (pellets).

Характеристики древесных топливных гранул по этим стандартам приведены в таблице 1.

Согласно уровню требований стандартов различного уровня, например, единого европейского стандарта EN 14961-2, твердое биотопливо подразделяется на следующие классы – A1, A2, B, а в соответствии с СТБ 2027 – на 3 группы – 1, 2, 3. Отнесение к тому или иному классу (группе) определяется такими основными показателями качества, как

зольность, механическая прочность, массовая доля токсичных элементов, а также химических элементов, определяющих его теплотворную способность, которые зависят, как правило, от вида и свойств исходного древесного сырья.

Таблица 1 – Стандартизированные показатели качества топливных гранул

Нормы качества	Единицы измерения	DIN Plus	SS 187120	EN 14961-2	DIN 51731	ONorm M 7135	СТБ 2027
Диаметр	мм	4–10	4-10	6(±1)	4–10	4–10	6
Длина	мм	20–50	20–50	3,15–40	20–50	<50	24–36
Насыпная масса	кг/м <sup>3</sup>	650	650	≥600	650	650	500–800
Теплота сгорания	МДж/кг	≥18	≥18	≥16,0	≥18	17,5-19,5	≥17,5
Влажность	%	≤10				≤12	
Истирание/пыль	%	≤ 1	–				≤ 6,5
Твердость	%	≥ 97,7	≥ 97,7	≥ 97,7	–		≥97,5
Зольность	%	≤ 0,5	≤ 1,5	≤ 3,0	–		≤ 2,5
Сера	мг/кг	≤0,04	≤0,08	≤0,05	≤0,04	≤0,08	≤0,08
Хлор	мг/кг	≤0,02	≤0,03	≤0,03	–		≤0,03

Традиционно в качестве сырья для получения твердого биотоплива используются отходы лесопиления и деревообработки, т.е. древесная биомасса, которая обладает высокой теплотворной способностью, а за счет достаточно высокого содержания в ней гемицеллюлоз и лигнина, которые являются природными связующими, обеспечивается образование формоустойчивых изделий. На территории ЕАЭС действует ГОСТ 33103.6-2017 (ISO 17225-6:2014) «Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 6. Классификация недревесных пеллет», нормирующий показатели качества пеллет, изготовленных из травяной, плодовой биомасс, биомассы водных растений, искусственных и непроизвольных смесей биомасс. Указанные биомассы обладают аналогичным комплексом свойств, однако имеют повышенную зольность, высокое содержание хлора, азота и серы, а также ряда макроэлементов.

Нами были рассмотрены такие виды однолетних растений, как камыш и хлопчатник в виде отходов их переработки, а также малоликвидная древесина ивы. Данные виды биомассы имеются в большом объеме на территории Узбекистана, однако в настоящее время не находят практического применения. Главной проблемой при использовании отходов камыша и хлопчатника в качестве исходного сырья для получения биотоплива является повышенное содержание в них минеральных веществ – порядка 3–4%, что при сжигании приведет к нежелательному количеству зольных веществ. Однако стоит заметить, что при сжигании твердого биотоплива в современных промышленных котлах с автоматическим золоудалением зольность перестает играть существенную роль.

Целью исследований является нахождение оптимального композиционного состава твердого биотоплива с применением симплекс-решетчатых планов Шеффе, включающих графическую визуализацию результатов в виде «состав-свойство».

Расположение экспериментальных точек в факторном пространстве соответствует плану третьего порядка [4]. Массовые доли хлопчатника, ивы и камыша в композиции твердого биотоплива варьировали от 0 до 100% согласно плану эксперимента.

На основании результатов исследований с применением программы STATISTICA было получено адекватное уравнение регрессии, характеризующее степень влияния каждого компонента и их попарных сочетаний на показатели предела прочности при изгибе и зольность твердого биотоплива. С использованием полученных уравнений регрессии были построены поверхности отклика, представленные на рис. 1.

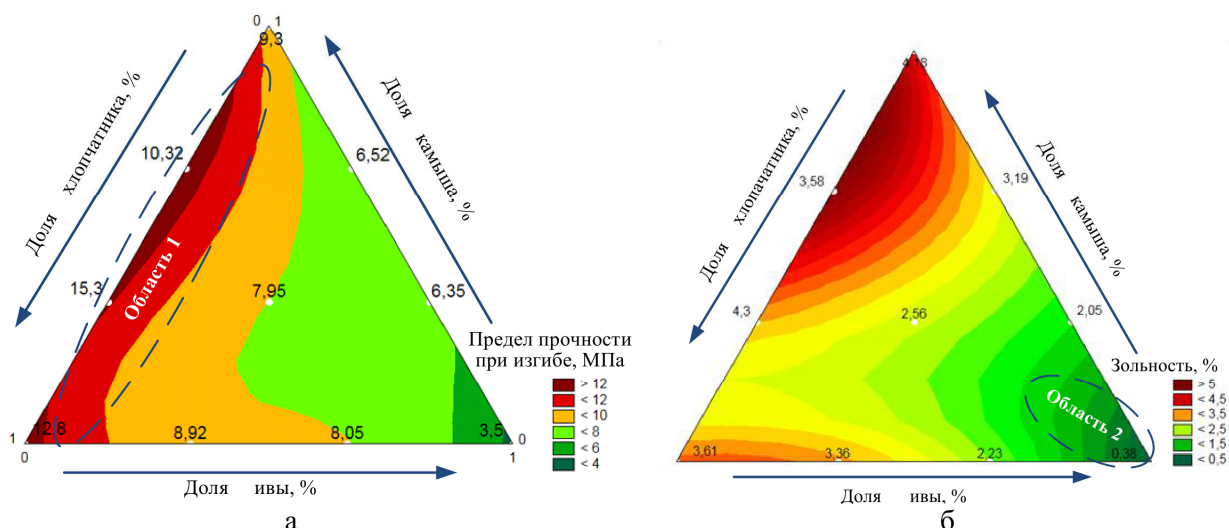


Рисунок 1 – Влияние компонентного состава твердого биотоплива на его химико-механические свойства: а – предел прочности при изгибе, МПа; б – зольность, %

Комплексная оценка результатов анализа диаграмм «состав–свойство» представлена в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты анализа диаграмм «состав–свойство», представленных на рис. 1

Наименование показателя	Композиционный состав		
	хлопчатник, %	ива, %	камыш, %
Предел прочности при изгибе (Область 1), МПа	5–65	30–80	0–10
Зольность (Область 2), %	0–10	80–100	0–5

Как видно из табл. 2, влияние каждого из компонентов твердого биотоплива имеет сложный и противоречивый характер на исследуемые свойства, но решив задачу оптимизации, возможно подобрать оптимальный состав для производства твердого биотоплива.

Суть решения задачи заключается в следующем: определить такое соотношение компонентов растительной биомассы в составе твердого биотоплива, при котором достигается оптимальное сочетание его показателей качества.

С целью определения оптимального компонентного состава для получения твердого биотоплива были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии и с помощью надстройки «Поиск решения» найдено оптимальное соотношение исследуемых отходов растительного происхождения: древесины ивы – 65%, хлопокчатника – 30%, камыша – до 5%. В табл. 3 представлены свойства твердого биотоплива, полученного при оптимальном соотношении исследуемых компонентов растительной биомассы.

Таблица 3 – Физико-механические показатели качества твердого биотоплива

Наименование показателя	Требования СТБ 2027 (группа 3)	Требования EN 14961-2 (класс В)	Оптимизированный смешанный состав твердого биотоплива, состоящий из древесины ивы 65%, хлопокчатника 30%, камыша 5%
Влажность, %	не более 12	не более 10	8,5
Зольность, %	не более 2,5	не более 3,0	1,1
Механическая прочность (содержание древесной пыли при истирании), %	не более 6,5	не более 1,0	0,8

Наименование показателя	Требования СТБ 2027 (группа 3)	Требования EN 14961-2 (класс В)	Оптимизированный смешанный состав твердого биотоплива, состоящий из древесины ивы 65%, хлопчатника 30%, камыша 5%
Предел прочности при изгибе, МПа	не нормируется	не нормируется	10,5
Низшая теплота сгорания (теплотворная способность), МДж/кг	не менее 17,5	16,0–19,0	18,5

Из табл. 3 видно, что образцы твердого биотоплива, полученные из оптимизированного состава различных видов биомассы, обладают высокими физико-механическими характеристиками, превышающими требования стандартов для смешанного биотоплива.

Анализ элементного состава полученного твердого биотоплива показал отсутствие превышения массовой доли различных химических элементов, предусмотренных требованиями различных стандартов (табл. 4).

Таблица 4 – Результаты элементного анализа образцов твердого биотоплива

Химический элемент	Единица измерения	Химический состав исследуемого твердого биотоплива	Требования к элементному химическому составу по СТБ 2027	Требования к элементному химическому составу по EN 14961-2
Углерод	%	49,8	49,5	не нормируется
Водород	%	6,00	6,10	не нормируется
Азот	%	0,30	0,30	0,30
Кислород	%	43,5	43,0	не нормируется
Сера, не более	%	0,02	0,08	0,03
Хлор, не более	%	0,02	0,03	0,02
Мышьяк, не более	мг/кг	0,75	0,80	1,00
Свинец, не более	мг/кг	9,3	10,0	10,0
Кадмий, не более	мг/кг	0,40	0,50	0,50
Хром, не более	мг/кг	7,7	8,00	10,0
Медь, не более	мг/кг	4,1	5,00	10,0
Ртуть, не более	мг/кг	0,02	0,05	0,10
Цинк, не более	мг/кг	87,0	100,0	100,0
Никель, не более	мг/кг	9,4	не нормируется	10,00

Полученные результаты исследований показали, что найденный с помощью симплекс-решетчатых планов Шеффе оптимальный состав твердого биотоплива (древесины ивы – 65%, хлопчатника – 30%, камыша – до 5%) соответствует по физико-механическим свойствам и химическому составу всем нормативным требованиям. Кроме этого, следует отметить, что применение планов Шеффе позволяет определять не только оптимальный состав твердого биотоплива по исходному сырью, но и осуществлять оценку показателей качества и безопасности планируемой к выпуску новых недревесных видов биотоплива в целях расширения ассортимента.

## Список литературы

1. Головков С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесная промышленность, 1987. 224 с.
2. Михайлов Г.М. Вторичные материальные ресурсы лесной и деревообрабатывающей промышленности. М: Экономика, 1983. 224 с.
3. Производство древесной продукции достигло в мире наивысшего уровня роста за последние 70 лет // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (FAO). URL: <http://www.fao.org/news/story/ru/item/1256293/icode/> (дата обращения: 24.12.2020).
4. Пен Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства. Красноярск: Красноярский гос. ун-т, 1982. 192 с.

## COMPREHENSIVE ANALYSIS OF QUALITY AND SAFETY INDICATORS FOR SOLID BIOFUELS BASED ON BIOMASS

E.V. Dubodelova \*, N.A. Herman, S.I. Shpak, I.G. Fedosenko  
*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*  
*E-mail: katedubodelova@tut.by*

Currently, solid biofuels, obtained from various types of biomass, occupy a significant share in the world market. Its use for energy purposes is a topical area to reduce the use of scarce and expensive fuel sources such as natural gas and oil. At the same time, according to ISO 17225-1, it is possible to process any types of biomass (woody biomass, fruit biomass, herbaceous biomass, as well as biomass of aquatic plants, biodegradation waste), which can be of both natural and industrial origin, i.e. including waste.

Key indicators to ensure environmental protection in accordance with the requirements of standards, when used in special installations for the combustion of biofuel, are the mass fraction of toxic elements, as well as chemical elements that determine its calorific value.

The paper analyzes the heterogeneous composition of biomass waste and considered the possibility of achieving compliance with standards at various levels.

*Keywords: biofuel, biomass, waste, willow wood, reeds, cotton, ash content, mechanical strength, calorific value, toxic elements.*

## References

1. Golovkov S.I., Koperin I.F., Najdenov V.I. *Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnyh othodov* [Energy use of wood waste]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1987. 224 p. (In Russian).
2. Mihajlov G.M. *Vtorichnye material'nye resursy lesnoj i derevoobrabatyvayushchej promyshlennosti* [Secondary material resources of the forest and woodworking industry]. Moscow, Ekonomika, 1983. 224 p. (In Russian).
3. *Proizvodstvo drevesnoj produkcii dostiglo v mire naivysshego urovnya rosta za poslednie 70 let* [Wood product manufacturing has achieved the world's highest growth rate in 70 years]. *Prodovol'stvennaya i sel'skohozyajstvennaya organizaciya Ob'edinennyh Nacij (FAO)* [Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)]. (In Russian). Available at: <http://www.fao.org/news/story/ru/item/1256293/icode/> (accessed 24.12.2020).
4. Pen R.Z. *Statisticheskie metody modelirovaniya i optimizacii processov cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Statistical Methods for Modeling and Optimizing Pulp and Paper Processes]. Krasnoyarsk, Krasnoyarskij gos. un-t, 1982. 192 p.