УДК 662.62 https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.19

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕЛЛЕТ ИЗ НЕДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Ю.В. Булыгин*, В.К. Любов, П.Д. Алексеев, К.Е. Комичев, И.А. Булатова

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д.17
** e-mail: yurii-bulygin@mail.ru*

Аннотация. *В статье приведены результаты экспериментальной оценки трёх видов растительного сырья – костры льна, костры конопли и биомассы борщевика Сосновского – как потенциального сырья для производства топливных гранул. Определены теплотехнические характеристики (влажность, зольность, выход летучих, теплота сгорания, элементный состав) и показана возможность гранулирования без синтетических связующих. Выявлено высокое содержание оксидов щелочных металлов в золе, что создаёт риск шлакования. Предложены способы его снижения: смесевое сжигание с древесным топливом или углём, либо использование низкотемпературных вихревых топок. Результаты могут быть внедрены на предприятиях, перерабатывающих лён и техническую коноплю.*

Ключевые слова: *биомасса, костра льна, костра конопли, борщевик Сосновского, пеллеты, шлакование золы, смесевое сжигание, углеродная нейтральность, локальная энергетика.*

UDC662.62

ENERGY USE OF PELLETS FROM NON-WOOD BIOMASS

Y.V. Bulygin*, V.K. Lyubov, P.D. Alekseev, K.E. Komichev, I.A. Bulatova

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, house 17, embankment Severnaya Dvina street, 163002, Arkhangelsk, Russia
**e-mail: yurii-bulygin@mail.ru*

Abstract. *The article presents the results of an experimental assessment of three types of plant raw materials – flax fires, hemp fires and Sosnovsky hogweed biomass – as potential raw materials for the production of fuel pellets. Thermal engineering characteristics (humidity, ash content, volatile yield, heat of combustion, elemental composition) are determined and the possibility of granulation without synthetic binders is shown. A high content of alkali metal oxides in the ash has been revealed, which creates a risk of slag formation. Suggested ways to reduce it: mixed combustion with wood fuel or coal, or the use of low-temperature vortex furnaces. The results can be implemented in enterprises processing flax and industrial hemp.*

Key words: *biomass, flax fires, hemp fires, Sosnovsky hogweed, pellets, ash slagging, mixed combustion, carbon neutrality, local energy.*

Введение

На предприятиях агропромышленного комплекса, в частности при переработке льна и технической конопли, образуются значительные объёмы отходов – костры. Традиционно они либо складируются, либо сжигаются на свалках, что приводит к загрязнению окружающей среды и нерациональному использованию ресурсов. Одновременно острой проблемой во многих регионах остаётся распространение борщевика Сосновского – инвазивного растения, на борьбу с которым тратятся бюджетные средства.

Одним из перспективных направлений является энергетическое использование перечисленных видов биомассы путём производства топливных пеллет. Гранулированное топливо обладает высокой энергетической плотностью, низкой влажностью, хорошо

транспортируется и позволяет автоматизировать процесс сжигания. Кроме того, сжигание растительной биомассы считается углеродно-нейтральным, так как количество выделяемого CO_2 эквивалентно объёму, поглощённому растениями при фотосинтезе.

Цель данной работы – оценить теплотехнические характеристики костры льна, костры конопли и биомассы борщевика Сосновского, определить возможность производства качественных пеллет без связующих добавок, а также выявить основные технологические ограничения и предложить пути их преодоления.

Методы и материалы

Исследовались образцы: костры льна, костры технической конопли, борщевика Сосновского. Подготовка проб выполнялась по ГОСТ 33255-2015 «Биотопливо твердое. Методы подготовки проб». Использованы стандартизованные методики: влажность и зольность – по ГОСТ Р 54186-2010 и ГОСТ Р 54211-2010, выход летучих веществ – по ГОСТ Р 55660-2013, высшая и низшая теплота сгорания – на калориметре IKA C 2000 basic – по ГОСТ 147-2013, элементный состав золы – методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000, при исследовании состава исходной биомассы, кроме спектрометра EDX-8000, дополнительно применялся анализатор EuroVector EA-3000.

Экспериментальные партии пеллет получали на пресс-грануляторе Kahl 14-175 с плоской матрицей. Связующие добавки не применялись – уплотнение происходило за счёт естественных лигниновых компонентов и внутримолекулярной влаги, активируемой нагревом.

Результат

В таблице 1 представлены основные теплотехнические показатели исследованной биомассы. Все три вида биомассы показали энергетический потенциал, сопоставимый с низкосортной древесиной [1]. Низшая теплота сгорания на горючую массу составила 18,38–18,81 МДж/кг. Наибольшая зольность выявлена у борщевика (7,7% на сухую массу), наименьшая – у костры льна (1,4%). Выход летучих веществ на сухую массу (72–81%) указывает на необходимость организации достаточного топочного объёма для дожигания газообразных продуктов. Содержание серы в образцах конопли и борщевика - 0,05%, а у льна - 0,08%; что является значительным экологическим преимуществом перед углём и мазутом.

Таблица 1.

Основные теплотехнические показатели исследованной биомассы

Table 1.

Main thermal characteristics of the studied biomass

Показатель	Костра конопли	Костра льна	Борщевик Сосновского
Низшая теплота сгорания, МДж/кг (горючая масса)	18,71	18,38	18,81
Зольность, % (сухая масса)	2,34	1,40	7,70
Выход летучих, % (сухая масса)	78,68	80,81	72,31
Сера, % (сухая масса)	0,05	0,08	0,05
Влажность, % (аналитическая масса)	8,13	9,35	21,9

В работах [2, 3] был проведен анализ элементного состава и теплотехнических характеристик льняной костры и борщевика Сосновского, а также их золы. Элементный анализ золы показал высокое содержание оксидов щелочноземельных и щелочных металлов (таблица 2). Содержание CaO достигает 49,2% (борщевик) и 34,6% (костра конопли), а суммарное содержание $K_2O + Na_2O$ составляет для костры льна 9,89% – что многократно превышает порог 3% для сильнозагрязняющих топлив. Это свидетельствует о высоком риске шлакования (образования плотных отложений) при автономном сжигании таких пеллет.

Таблица 2.

Содержание основных оксидов в золе, %

Table 2.

The content of basic oxides in the ash, %

Оксид	Пороговое значение	Костра конопли	Костра льна	Борщевик Сосновского
CaO	<13.0	34,6	28,4	49,2
K_2O	$K_2O + Na_2O$ <3.0	3,92	9,89	6,51
Na_2O	$K_2O + Na_2O$ <3.0	-	2,07	3,26

Экспериментально подтверждена возможность получения механически прочных пеллет из всех трёх видов сырья без добавления синтетических связующих. На рисунке 1 представлен внешний вид полученных гранул из костры льна. Связующие свойства обеспечиваются природными лигниновыми компонентами и влагой, активирующей процессы уплотнения при нагреве в матрице пресс-гранулятора. Для гранул из костры конопли основные технические характеристики имели следующие значения: средний диаметр 8,03 мм; механическая прочность DU= 88,07 %; кажущая плотность 1,01 г/см^3; насыпная плотность 0,456 т/м^3.

Обсуждение

Повышенное содержание калия и натрия в золе биомассы – типичное явление для травянистых растений и отходов переработки лубяных культур. Содержание оксидов щелочных металлов в золе недревесной биомассы может в 5–10 раз превышать аналогичные показатели для древесины [4]. Эти элементы образуют с кремнием легкоплавкие силикаты, которые при температурах выше 700–800 °C начинают плавиться и формировать прочные отложения на конвективных поверхностях нагрева котлов. Следствием является снижение коэффициента полезного действия и необходимость частых остановок для очистки.

Рис.1. Внешний вид гранул из костры льна.
Fig. 1. Appearance of flax straw pellets

На основе полученных данных можно предложить два технологических сценария сжигания пеллет из костры льна, костры конопли или борщевика:

- Смесевое сжигание. Добавление 15–25% недревесных пеллет к древесному топливу (щепа, опилки) позволяет «разбавить» концентрацию щелочных металлов в общей золе до приемлемого уровня (сумма K_2O+Na_2O менее 3%). Альтернативно, совместное сжигание с углём даёт дополнительный экологический эффект: оксиды щелочных металлов биомассы связывают оксиды серы угля, снижая выбросы SO_2 [5]. Эффективность такого подхода подтверждена при сжигании суспензионных и композиционных топлив на основе различных отходов [6].

- Применение специализированных топочных устройств. Использование низкотемпературных вихревых топок, в которых температура в ядре горения поддерживается на уровне 950–1050 °C за счёт рециркуляции дымовых газов и ступенчатой

подачи воздуха. При таких температурах плавление щелочных силикатов почти не происходит, и шлакование минимизируется. Такие технические решения уже прошли апробацию для высокозольных и легкоплавких биотоплив [7, 8].

Энергетическое использование недревесных отходов (костры льна, костры конопли) и инвазионного борщевика решает несколько задач:

- снижает объёмы складирования отходов и затраты на их размещение;
- создаёт дополнительный источник доходов для предприятий льняной и конопляной промышленности;
- способствует борьбе с распространением борщевика, превращая его из проблемы в ресурс;
- замещает ископаемое топливо, снижая выбросы парниковых газов (углеродно-нейтральный цикл).

Заключение

Костра льна, костра конопли и биомасса борщевика Сосновского обладают энергетическим потенциалом, сопоставимым с низкосортной древесиной: низшая теплота сгорания на горючую массу составляет 18,38–18,81 МДж/кг, содержание серы – менее 0,08%.

Экспериментально доказана возможность производства качественных топливных пеллет из всех трёх видов сырья без добавления синтетических связующих – уплотнение обеспечивается природным лигнином.

Основным технологическим ограничением является высокое содержание оксидов щелочных металлов в золе (сумма K_2O+Na_2O достигает 11,96% у костры льна), что создаёт высокий риск шлакования теплообменных поверхностей при автономном сжигании.

Рекомендованы два способа решения проблемы: смесевое сжигание с добавлением 15–25% недревесных пеллет к древесному топливу или углю, либо использование специализированных низкотемпературных вихревых топок.

Результаты могут быть непосредственно внедрены на предприятиях, перерабатывающих лён и техническую коноплю. Это позволит не только сократить отходы, но и получить местное возобновляемое топливо, снижающее зависимость от привозных энергоносителей

Благодарности

Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» за проведение исследований на рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 и анализаторе Euro EA-3000.

Литература

1. Любов В.К., Попов А.Н., Алексеев П.Д. Оценка энергетического и экологического потенциала использования щепы тополя и ольхи серой. *Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология"*, 2024, 4(421), с. 54-67.
2. Любов В.К., Булыгин Ю.В. Энергетическое использование отходов льняного производства. *Материалы международной научно-практической конференции*, 2024, с. 146-148.
3. Любов В.К., Булыгин Ю.В., Алексеев П.Д. Энергетическое использование инвазионных растений на примере биомассы борщевика сосновского. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2025, 18(2), с. 169–175.
4. Копылов А.Ю., Казаков А.В., Симонов А.Д. Золообразующие элементы недревесной биомассы и их влияние на шлакование теплообменных поверхностей. *Энергетик*, 2022, № 8, с. 34—39.
5. Дорохов В.В. Характеристики физико-химических процессов и состав дымовых газов при низкотемпературном сжигании композиционных пеллетированных и жидких топлив из отходов: автореф. дис. канд. техн. наук: 1.3.14. Томск, НИТПУ, 2025, 20 с.
6. Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С., Стрижак П.А. Многофакторный анализ энергетической утилизации угольных, нефтяных и растительных отходов в составе топливных смесей. *Физика горения и взрыва*, 2022, № 4, с. 97-106.
7. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. М.: *Энергоатомиздат*, 1990.
8. Пузырев М.Е. Разработка котельно-топочной техники для утилизации растительных отходов: дис. канд. техн. наук. Бийск, 2025. — 232 с