

Использование растительного материала в качестве твердого биотоплива

Фролов Д.И., Родин М.Н.

Аннотация. В работе представлена оценка качества и удельной энергии твердого биотоплива из отобранных растительных материалов. В их производстве использовались пшеничная солома, ржаная солома, кукурузная солома, рапсовая солома и луговое сено. Растительные материалы измельчали с помощью стационарной дробилки с теоретической длиной резания 20 мм перед брикетированием и молотковой дробилки, снабженной ситом с отверстием диаметром 8 мм перед формованием в гранулы. Влажность уплотненного сырья определяли методом высушивания, а их теплотворную способность калориметром. Агломерация растительных материалов включала пресс для гранулирования с неподвижной односторонней плоской матрицей, приводимой в действие уплотняющими валками, и спиральный брикетный пресс с нагреваемой камерой уплотнения. Проведенные исследования охватывали измерения механической прочности и удельной энергии в агломерации применяемых растительных материалов. Полученные результаты испытаний качества и удельной энергии производства биотоплива были подвергнуты статистическому анализу.

Ключевые слова: биотопливо, сырье, механическая прочность, удельная энергия, переработка.

Для цитирования: Фролов Д.И., Родин М.Н. Использование растительного материала в качестве твердого биотоплива // Инновационная техника и технология. 2019. № 4 (21). С. 46–51.

Use of plant material as solid biofuel

Frolov D.I., Rodin M.N.

Abstract. The paper presents an assessment of the quality and specific energy of solid biofuels from selected plant materials. They used wheat straw, rye straw, corn straw, rapeseed straw and meadow hay. Plant materials were crushed using a stationary crusher with a theoretical cutting length of 20 mm before briquetting and a hammer crusher equipped with a sieve with an opening with a diameter of 8 mm before molding into granules. The moisture content of the compacted raw materials was determined by drying, and their calorific value with a calorimeter. Agglomeration of plant materials included a granulation press with a fixed one-sided flat matrix driven by sealing rolls and a spiral briquette press with a heated compaction chamber. The studies covered measurements of mechanical strength and specific energy in the agglomeration of plant materials used. The results of tests of the quality and specific energy of biofuel production were subjected to statistical analysis.

Keywords: biofuels, raw materials, mechanical durability, specific energy, processing.

For citation: Frolov D.I., Rodin M.N. Use of plant material as solid biofuel. Innovative Machinery and Technology. 2019. No.4 (21). pp. 46–51. (In Russ.).

Введение

Вопросы охраны окружающей среды, связанные с эксплуатацией и истощением запасов ископаемого топлива и выбросами загрязняющих веществ, способствуют расширению использования возобновляемых источников энергии. В современной ситуации производства энергии из традиционных видов топлива все большее внимание уделяется

вопросам, связанным с охраной окружающей природной среды. Значительное сокращение выбросов веществ, считающихся вредными для окружающей среды, может быть достигнуто за счет использования биомассы в энергетических целях [1].

Благоприятным явлением, связанным с приобретением биомассы для энергетических целей, является ограничение выбросов двуокиси углерода. Поток CO_2 , выделяемый в процессе сжигания

биомассы, поглощается в процессе фотосинтеза и используется для выращивания растений в процессе вегетации. Это связано с уменьшением негативного воздействия на природную среду в результате использования ископаемых видов топлива (выброс вредных загрязнений, образование отходов, деградация почв и ландшафтов). Растительная биомасса постоянно регенерируется, и ее использование дает возможность увеличить доходы, например, сельского хозяйства и пищевой промышленности. Существует также возможность создания новых рабочих мест для людей, работающих в сфере производства биомассы и устройств для ее переработки, а также биотоплива для энергетики и теплоснабжения.

Растительная биомасса обладает большим энергетическим потенциалом. Она охватывает отходы сельскохозяйственного производства (например, солома, сено) и деревообрабатывающей промышленности (опилки, стружка). Большая группа в структуре биомассы состоит из сырья, полученного в результате однолетнего и многолетнего сельскохозяйственного выращивания, которое включает быстрорастущие деревья и кустарники (тополь, ива), многолетние растения и травы, а также другие растения. Из-за их низкой плотности и теплотворной способности (по отношению к единице объема), это сырье трудно распределить и использовать в необработанном виде. Для того чтобы повысить их полезность в энергетических целях, необходимо увеличить их плотность; это происходит за счет уплотнения под давлением измельченного сырья в процессе формования в гранулы или брикетирования.

Растительная биомасса, в частности солома зерновых и других пахотных растений в их первоначальном виде, занимает много места для транспортировки и хранения и имеет низкую теплотворную способность в единице объема. В этой ситуации она должна быть надлежащим образом обработана с целью повышения ее энергетической эффективности. Это влечет за собой агломерацию растительного сырья путем его брикетирования или формования в гранулы. Это увеличивает концентрацию массы и энергии в единице объема таких биотоплив и улучшает их распределение и использование.

В последние годы были изучены физические свойства различных культур и сельскохозяйственных материалов. Информация о физических свойствах растительной биомассы необходима для проектирования оборудования для сортировки, переработки и хранения. В последние несколько лет наблюдается значительный рост и развитие применения отходов биомассы для энергетических целей в виде твердого топлива. Одним из способов преобразования биомассы (в том числе растительной биомассы) в энергию является получение твердого топлива в виде гранул или брикетов путем агломерации под давлением.

Целью работы являлась оценка качества и

удельной энергии производства гранул и брикетов из отобранных растительных материалов.

Объекты и методы исследований

Для производства гранул и брикетов используется пшеничная солома, ржаная солома, кукурузная солома, рапсовая солома и луговое сено. Растительные материалы измельчали с помощью стационарной дробилки при теоретической длине резания 20 мм перед брикетированием. Затем их дополнительно измельчали молотковой дробилкой, снабженной решетом с отверстием диаметром 8 мм, перед формированием в гранулы. Относительную влажность растительных материалов определяли методом высушивания, а их теплотворную способность определяли калориметром. Для спекания растительных материалов применяли пресс-гранулятор с неподвижной односторонней плоской матрицей и приводными уплотнительными валками с электрическим двигателем мощностью 7,5 кВт и спиральный брикетный пресс с обогреваемой камерой уплотнения. Агломерирующая спираль брикетного пресса приводилась в действие двигателем мощностью 4,5 кВт, а камера прессования нагревалась электрическими нагревателями мощностью 3 кВт. Значение температуры полученных гранул измеряли с помощью пирометра.

Проведенные исследования охватывали измерения механической прочности и удельной энергии в агломерации применяемых растительных материалов.

Испытания, проведенные в пяти попытках, служили для определения механической прочности полученного твердого биотоплива для испытуемых растительных материалов в соответствии со следующим уравнением (1):

$$D = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100\% \quad (1)$$

где D - механическая прочность (%),

m_A - масса агломератов после испытания на долговечность (г),

m_E - масса агломератов до испытания на долговечность (г).

Объем затрат энергии был установлен с использованием преобразователя мощности, времени и электроэнергии, подключенного к компьютеру. Этот преобразователь регистрирует потребление временной мощности и энергопотребление нейтральной передачи устройства и процесса уплотнения, а также продолжительность процесса уплотнения. Измерения удельной энергии проводились после достижения ожидаемой температуры в камере прессования брикетировочного пресса. Результаты потребления электроэнергии были пересчитаны

Таблица 1 – Физические свойства агломерированных растительных материалов

Вид растительного сырья	Влажность сухого состояния, %	Теплотворная способность сухого состояния, МДж/кг
Пшеничная солома	13,2	16,8
Ржаная солома	12,8	17,1
Кукурузная солома	14,1	17,5
Рапсовая солома	12,3	17,3
Луговое сено	13,5	16,6

Таблица 2 – Односторонний анализ дисперсионной таблицы механической прочности

Источник изменчивости	df	SS	MS	F	p
Растительный материал	3	588,8	196,3	10,63	0,000
Ошибка	20	369,2	18,5		

Таблица 3 – Односторонний анализ дисперсионной таблицы для удельной энергии

Источник изменчивости	df	SS	MS	F	p
Растительный материал	3	0,014	0,004	11,71	0,000
Ошибка	20	0,009	0,003		

Таблица 4 – Двусторонний анализ дисперсионной таблицы для механической прочности

Источник изменчивости	df	SS	MS	F	p
Растительный материал (PM)	3	1803,7	602,5	56,78	0
Температура (T)	2	7876,4	3937,7	371,7	0
PM×T	6	41,2	6,6	0,64	0,704
Ошибка	60	634,5	10,4		

Таблица 5 – Двусторонний анализ дисперсионной таблицы для удельной энергии

Источник изменчивости	df	SS	MS	F	p
Растительный материал (PM)	3	0,168	0,056	69,01	0
Температура (T)	2	0,082	0,041	50,1	0
PM×T	6	0,002	0,000	0,34	0,917
Ошибка	60	0,047	0,001		

в единицу массы произведенных пеллет или брикетов.

Полученные результаты испытаний на механическую прочность и удельную энергию производства твердого биотоплива были подвергнуты статистическому анализу с использованием программного обеспечения STATISTICA. Статистический анализ предполагал уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 показаны физические свойства агломерированных растительных материалов. Средняя влажность сухого сырья составляла от 12,3% для рапсовой соломы до 14,1% для кукурузной соломы. Между тем, средняя теплотворная способность была между 16,6 МДж/кг для лугового сена и 17,5 МДж/кг для кукурузной соломы. Температура получаемых гранул из использованного растительного сырья, после выхода из матрицы формования в грануляционную машину, составила в среднем $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Анализ отклонений показал, что используемые в испытаниях растительные материалы влияют на механическую прочность гранул (Таблица 2). Установлены статистически значимые различия в механической прочности гранул, изготовленных из пшеничной соломы, ржаной соломы и рапсовой соломы. При этом не было установлено статистически значимых различий между этими гранулами и гранулами, изготовленными из лугового сена (Рис. 1).

Наименьшая механическая прочность отмечена у пеллет из рапсовой соломы (82,3%), а наибольшая - у пеллет из лугового сена (92,6%).

Проведенный анализ дисперсий показал, что используемые в испытаниях растительные материалы также влияют на расход энергии, используемой в процессе формования в гранулы (табл.3). Установлены статистически значимые различия в удельной энергии гранул из пшеничной соломы, ржаной соломы и рапсовой соломы. При этом не было установлено статистически значимых различий между этими гранулами и гранулами, изготовленными из лугового сена (Рис.2).

Наименьшая удельная энергия отмечена в гранулах из рапсовой соломы (0,458 МДж/кг), а наибольшая в гранулах из лугового сена (0,528 МДж/кг). По отношению к удельной энергии гранул из рапсовой соломы удельный прирост энергии был выше примерно на 5% для гранул из пшеничной соломы и ржаной соломы и примерно на 15% для гранул из лугового сена.

Дисперсионный анализ показал, что как испытываемые растительные материалы, так и температуры, установленные в камере прессования брикетного пресса, оказывают существенное влияние на механическую прочность брикетов и расход энергии на их производство. Статистически

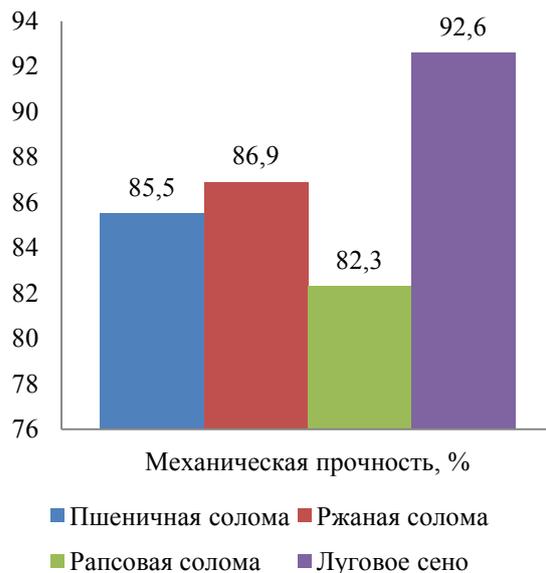


Рис. 1. Влияние вида растительных материалов на механическую прочность

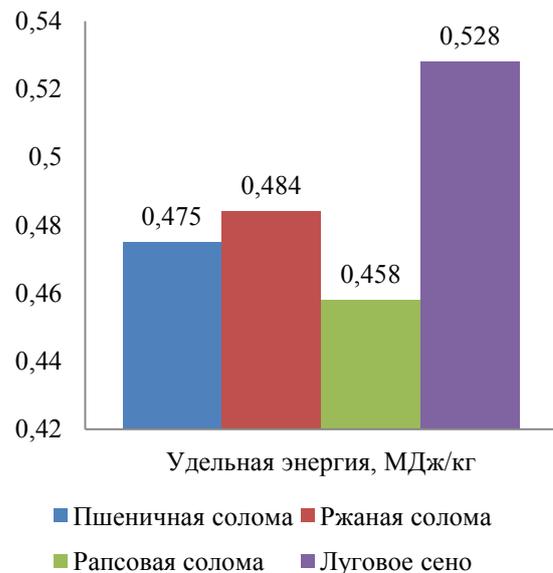


Рис. 2. Влияние вида растительного сырья на удельную энергию

значимые различия были отмечены как по механической прочности, так и по удельной энергии всех агломерированных растительных материалов (табл. 4 и 5).

На рисунке 3 представлены результаты измерения механической прочности брикетов в зависимости от температуры камеры прессования брикетного пресса и используемых растительных материалов. Повышение температуры в камере прессования сопровождалось ростом механической прочности брикетов. Наименьшую механическую прочность имели брикеты из рапсовой соломы, а наибольшую из кукурузной соломы. Повышение температуры от 200 до 250°C привело к повышению механической прочности брикетов в среднем на 24% для рапсовой соломы и на 29% для пшеничной соломы.

На рисунке 4 представлены результаты измерений электропотребления брикетов в зависимости от температуры камеры прессования брикетного пресса и растительных материалов, используемых в процессе брикетирования. Повышение температуры в камере прессования сопровождалось снижением потребления электрической энергии. Наименьшие значения удельной энергии были отмечены при производстве пшенично-соломенных брикетов (0,39-0,45 МДж/кг), тогда как наибольшие значения имели кукурузно-соломенные брикеты (0,50-0,59 МДж/кг). Повышение температуры в камере прессования брикетного пресса с 200 до 250°C привело к снижению расхода электроэнергии на 18-20% для всех выпускаемых брикетов.

Биомасса растительного происхождения имеет относительно высокую теплотворную способность и является ценным энергетическим материалом, который может быть преобразован в биотопливо. Качество получаемого твердого биотоплива и

энергозатраты на агломерацию растительной биомассы (формование в гранулы, брикетирование) зависят от ряда параметров технологического процесса (в том числе от уровня влажности сырья, температуры процесса, размера частиц материала, его химического состава), а также оборудования (типов агломерирующих элементов и устройств, их рабочих параметров, геометрии системы и др.).

Растительные материалы, подвергающиеся агломерации под давлением, должны иметь уровень влажности от 8% до 16%. Большая влажность материала отрицательно сказывается на технологическом процессе и качестве продукта. В основном это касается снижения плотности, прочности и теплотворной способности гранул и брикетов.

По мнению многих авторов, некоторые виды отходов в уплотненной смеси могут играть роль природного связующего и делать полученные гранулы более прочными, а также положительно влиять на энергоемкость процесса формования гранул [2, 3, 4].

На механическую прочность получаемых гранул и брикетов существенное влияние оказывают применяемое растительное сырье, типы устройств и параметры агломерации. Наименьшую механическую прочность показали гранулы из рапсовой соломы, а наибольшую гранулы из лугового сена. В свою очередь, наименьшую механическую прочность показали брикеты из рапсовой соломы, а наибольшую брикеты из кукурузной соломы. Результаты проведенных испытаний показывают, что повышение температуры процесса брикетирования сопровождается ростом механической прочности брикетов на 23-25%.

Многочисленные исследователи утверждают, что процессы формирования гранул и

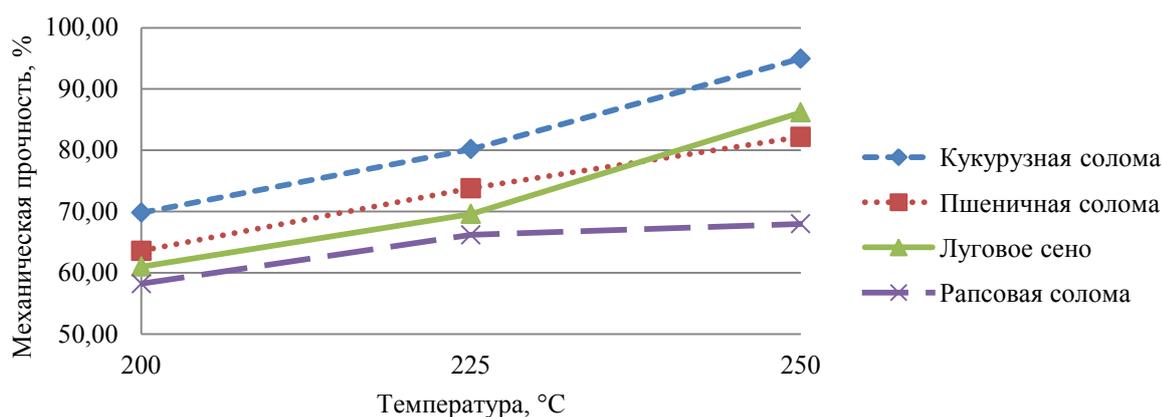


Рис. 3. Влияние температуры на механическую прочность

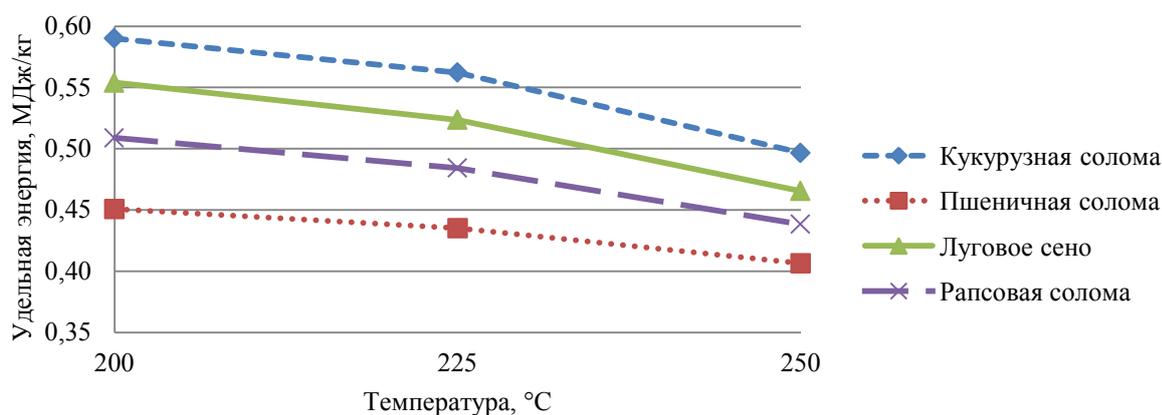


Рис. 4. Влияние температуры на удельную энергию

брикетирования потребляют большое количество энергии в производстве биотоплива [5, 6].

Выводы

Статистический анализ показал существенные отличия в механической прочности полученных гранул из растительных материалов. Самые низкие значения механической прочности были получены в случае гранул из рапсовой соломы (около 81%), а самые высокие для гранул из лугового сена (около 90%).

Дисперсионный анализ показал, что как используемые растительные материалы, так и температура в камере прессования брикетных прессов оказывают статистически значимое влияние на механическую прочность получаемых брикетов. Наименьшая механическая прочность отмечена

при прессовании брикетов из рапсовой соломы при температуре 200°C (около 57%), а наибольшая для брикетов из кукурузной соломы при температуре 250°C (около 94%).

Анализируя результаты исследования установлено, что удельная энергия процесса производства гранул зависит от вида агломерированного растительного сырья. Наименьшая удельная энергия была при формировании рапсовой соломы в гранулы (0,46 МДж/кг), а наибольшая при получении гранул из лугового сена (0,53 МДж/кг).

Удельная энергия производства брикетов зависела как от вида растительного сырья, так и от температуры в камере прессования брикетных прессов. Самые низкие значения удельной энергии отмечены для брикетов из пшеничной соломы (0,39–0,45 МДж/кг), а самые высокие для брикетов из кукурузной соломы (0,50–0,59 МДж/кг).

Список литературы

- [1] Wisz, J. and A. Matwiejew, 2005. Biomass – laboratory research in terms of suitability for energetic combustion. *Energetyka*, 9 (615): 631–636 (Pl).
- [2] Franke, M. and A. Rey, 2006. Pelleting quality. *World Grain*, 5: 78–79.
- [3] Hejft, R., 2011. Energy consumption of briquetting and pelletting process. *Czysta Energia*, 6 (118): 40–41 (Pl).
- [4] Судакова И.Г., Руденко Н.Б. Получение твердых биотоплив из растительных отходов (обзор) // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Химия. 2015. Т. 8. № 4. С. 499–513.

- [5] Zarajczyk, J., 2013. Technical and technology conditions of plant biomass pellets for energy purposes. Monografie i rozprawy. Inżynieria Rolnicza, 1 (142), T.2: pp. 81 (Pl).
- [6] Булаткин Г.А. Производство биотоплива второго поколения из растительного сырья // Вестник Российской Академии Наук. 2010. Т. 80. № 5–6. С. 522–527.

References

- [1] Wisz, J. and A. Matwiejew, 2005. Biomass – laboratory research in terms of suitability for energetic combustion. Energetyka, 9 (615): 631–636 (Pl).
- [2] Franke, M. and A. Rey, 2006. Pelleting quality. World Grain, 5: 78–79.
- [3] Hejft, R., 2011. Energy consumption of briquetting and pelleting process. Czysza Energia, 6 (118): 40–41 (Pl).
- [4] Sudakova I.G., Rudenko N.B. Poluchenie tverdykh biotopliv iz rastitel'nykh otkhodov (obzor), Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Seriya: Khimiya. 2015. Vol. 8. No. 4. pp. 499–513.
- [5] Zarajczyk, J., 2013. Technical and technology conditions of plant biomass pellets for energy purposes. Monografie i rozprawy. Inżynieria Rolnicza, 1 (142), Vol.2: pp. 81 (Pl).
- [6] Bulatkin G.A. Proizvodstvo biotopliva vtorogo pokoleniya iz rastitel'nogo syr'ya, Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk. 2010. Vol. 80. No. 5–6. pp. 522–527.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Родин Максим Николаевич магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Rodin Maksim Nikolaevich undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University E-mail: surr@bk.ru</p>