

Некоторые результаты расчетов остаточных напряжений в покрытии, полученном вакуумно-плазменным напылением при силе тока 80А, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость остаточных напряжений в покрытии от напряжения

Напряжение	200 В	150В	100В	50В
σ_{ou}	$1,9 \cdot 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{-15}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$	$1,1 \cdot 10^{-15}$

На основании предложенной модели и проведенных расчетов можно сделать вывод о принципиальной возможности уменьшения величины остаточных напряжений в покрытиях путем регулирования определенных параметров технологического процесс, влияющих на величину температурного поля системы покрытие-подложка.

Список использованных источников

1. Верешака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верешака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение. пер. с англ / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
3. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В.А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
4. Палатник, Л.С. Механизмы образования и субструктура конденсированных пленок / Л.С. Палатник, М.Я. Фуке, В.М. Косевич. – М.: Наука, 1972. – 320 с.
5. Анциферов, В.Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Д.К. Дружинин. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве: монография / В.А. Лойко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 192 с.: ил. ISBN 978-985-6770-84-8.

УДК 674:621.928.93

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ МЕТОДОМ МИКРОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И ВЛАЖНОГО ПРЕССОВАНИЯ

**Войтов В.А., д.т.н., проф., Буецкий В.А., аспирант,
Кравцова Н.В., аспирант**

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков, Украина

В последние годы все более остро становится проблема, связанная с нехваткой традиционных источников энергии. Одним из актуальных и экономически выгодных направлений решения данной проблемы является изготовление из биомассы твердого топлива в виде брикетов или пеллет.

В качестве сырья, которое используется для производства брикетов или пеллет, можно использовать солому, отходы деревообрабатывающей промышленности, лузгу зерновых культур, риса, кукурузы, подсолнечника и т.д.

На сегодняшний день в Европе около 50% возобновляемых источников энергии производятся из биомассы, что составляет 4% от общего спроса энергетических ресурсов. В мире использование биомассы как топлива находится на четвертом месте после нефти, атомной и гидроэнергетики [1].

В Украине, по данным источника [2], при современном валовом сборе зерна на уровне 50 млн. т для энергетических целей может быть использовано до 24 млн. т соломы, а при увеличении валового сбора до 80 млн. т – эта цифра увеличится до 40 млн. т. Использование соломы в таких объемах позволит сэкономить от 4,5 до 14 млрд. м³ природного газа и уменьшить выбросы CO₂ в атмосферу приблизительно на 12–16 млн. т. В качестве сравнения следует отметить, что в Польше ежегодно используется около 25 млн. т соломы, эквивалентных 11,5 млн. т угля [2]. Таким образом, при изготовлении брикетов или пеллет из биомассы сельскохозяйственного производства Украины, как и большинства европейских стран, превращается из потребителя энергии в ее производителя.

Сельскохозяйственная биомасса, которая может использоваться как топливо, имеет ряд особенностей, которые отличаются от традиционных энергоресурсов.

Наиболее важной топливно-энергетической характеристикой биомассы является ее теплотворная способность, которая зависит от множества факторов: генетических особенностей энергетических растений, влияния окружающей среды, условий хранения, влажности. В таблице 1 приведена средняя теплотворная способность биомассы при влажности на уровне 20% [3].

В таблице 2 приведена сравнительная характеристика разных видов топлива и влияние влажности на теплотворную способность, а также содержание серы и золы [3].

Таблица 1 – Средняя теплотворная способность биомассы [3]

Название биомассы	Теплотворная способность, МДж/кг
Солома зерновых культур	10,5
Стебли кукурузы	12,5
Ветки плодовых деревьев	10,5
Стебли подсолнечника	12,5
Виноградная лоза	14,5

Таблица 2 – Сравнительная характеристика разных видов топлива [3]

Вид топлива	Влажность, %	Теплотворная способность, МДж/кг	Содержание серы, %	Содержание золы, %
Природный газ	–	35–38 МДж/м ³	0	0
Каменный уголь	–	15–25	1–3	10–35
Дизельное топливо	–	42,5	0,2	1,0
Мазут	–	42	1,2	1,5
Отходы дерева, щепа	40–45	10,5–12,0	0	2,0
Брикеты или пеллеты из дерева	7–8	14,8–16,5	0,1	1,0
Брикеты или пеллеты из соломы	8–10	12,5–14,8	0,2	4,0

Как следует из представленных данных таблиц 1 и 2 брикеты или пеллеты из отходов биомассы по теплотворной способности, а также содержанию серы и золы, могут выступать хорошей альтернативой традиционным ископаемым видам топлива.

При производстве брикетов или пеллет большое значение на стоимость конечной продукции оказывает начальная влажность сырья. Анализ технической литературы [3, 4, 5] показывает, что сушка сырья перед измельчением и прессованием занимает 34,2% общих затрат, поэтому исключив ее из технологического процесса при одновременном перераспределении энергии на измельчение и прессование можно добиться снижения энергозатрат на производство единицы продукции. Типовой технологический процесс производства брикетов и пеллет, который широко применяется в Западной Европе и Украине представлен на рисунке 1 [3].

Целью работы являлось обоснование путей снижения энергозатрат при производстве твердого топлива из биомассы с учетом ее реологических свойств.

Одним из путей снижения энергозатрат является применение влажного помола биомассы с последующим влажным прессованием, который позволяет исключить из технологического процесса энергозатраты на сушку материала перед прессованием. Технологический процесс увлажненного микроизмельченного прессования биомассы можно представить структурной схемой (рис. 2).

Модуль переработки, в который входит микроизмельчение, сбор пыли, увлажнение и прессования, представлен на рисунке 3.

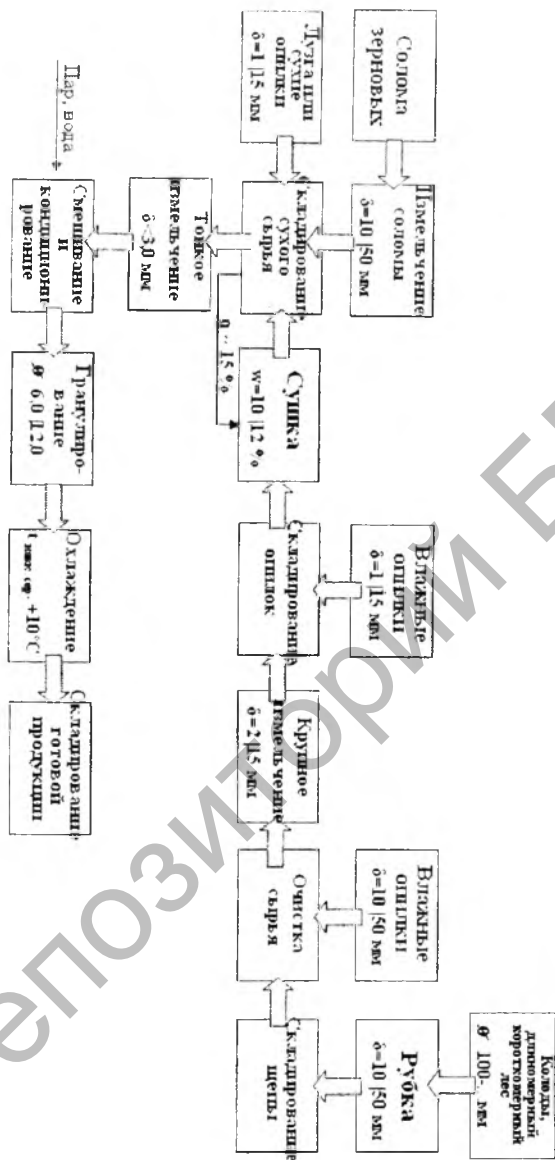


Рис. 1. Типовой технологический процесс получения твердого топлива



Рис. 2. Структурная схема увлажненного прессования

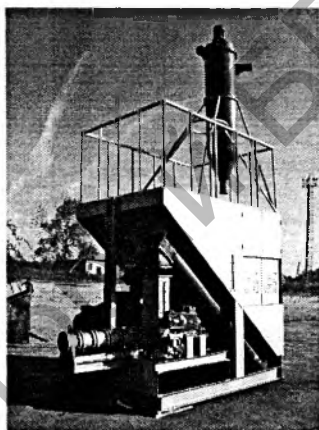


Рис. 3. Модуль переработки биомассы

По технологическому процессу увлажненного микроизмельченного прессования после предварительного измельчения биомассы с влажностью 20–30%, без применения сушки, выполняется тонкое измельчение. В качестве устройства для измельчения биомассы может выступать дезинтегратор [6]. Научные основы применения дезинтегратора для измельчения строительных материалов разработаны Й.О. Хингом, однако для измельчения биомассы, имеющей влажность до 20%, например, соломы, используемый принцип удара – малоэффективен. Поэтому была разработана конструкция дезинтегратора [7], 3 D модель которого представлена на рисунке 4, где используются два принципа измельчения: удар и истирание одновременно. В начале измельчения в большей степени используется удар, на конечной стадии измельчения – в большей степени используется истирание.

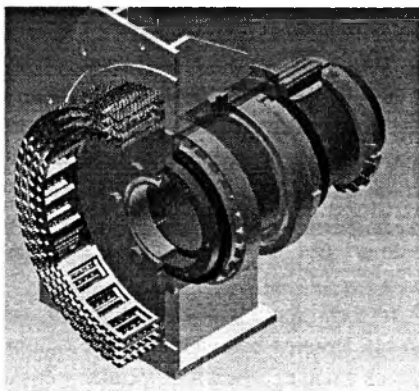


Рис. 4. 3 D модель дезинтегратора

При применении дезинтегратора для измельчения различных видов биомассы средний размер тонины составляет 70 мкм, при производительности 3,6 т/ч, при этом дезинтегратор потребляет мощность 18 кВт. Мелкоизмельченная и одновременно активированная биомасса с влажностью до 20% требует в 25 раз меньшей энергии при прессовании.

На сегодняшний день большинство топливных брикетов выпускается на механических прессах ударного типа («С.Ф.Нильсен», Дания), гидравлических («RUF», Германия) и шнековых прессах (Пини-Кей, Россия и страны СНГ). Оборудование «RUF» аналогично по стоимости и эксплуатационным характеристикам с ударно-механическими прессами «С.Ф.Нильсен», однако на нем получается менее плотный брикет, который имеет тенденцию к растрескиванию. Плотность брикетов фирмы «С.Ф.Нильсен» 1,2 кг/дм³, а брикетов «RUF» обычно находится в пределах 0,9–1 кг/дм³. Это обусловлено техническими ограничениями гидравлического способа прессования: пресс фирмы «RUF» работает под давлением 150 МПа, в то время как ударно-механический пресс фирмы «С.Ф.Нильсен» – 200 МПа.

Недостатком работы ударных и гидравлических прессов является то, что невозможно повлиять на реологические свойства влажной биомассы с целью активного сдвига одного слоя материала относительно другого, в результате чего происходит переход механической энергии в тепловую, что приводит к изменению структуры прессуемого сырья и превращения его в пластичную массу.

Для получения твердого топлива из влажной биомассы шнековые presses являются наиболее перспективными, так как в них возможно реализовать (по всей длине шнека) значительные сдвиги слоев материала, что приведет к повышению температуры, размягчению и частичному расплаву биомассы, а следовательно, и снижению энергозатрат на прессование по

причине снижения динамической вязкости увлажненной и разогретой биомассы. По отношению к другим способам прессования шнековый способ позволяет получать наиболее плотный (до 1,4 кг/дм³) и прочный брикет, что вместе с удобной для складирования формой и достаточно низкой ценой обуславливает отличные потребительские качества [8].

Шнековые прессы (экструдеры) могут быть различных типов: одно- и двухшнековые, одно- и двухуровневые; универсальные и специализированные, с осциллирующим (вдоль оси) и одновременно оборотным шнеком; с зоной дегазации и без нее; с вращением шнеков в одну и в противоположные стороны и т.п. [9–11].

Одношнековые прессы просты в изготовлении, относительно недорогие, есть возможность замены рабочего органа. Также к преимуществам одношнекового пресса следует отнести хорошее перемешивание и простоту в эксплуатации. К недостаткам – удовлетворительную загрузку (возможно образование застойных зон), а также отсутствие самоочистки: цилиндр очищается, а основа и стороны лопастей шнека – нет.

Преимущество двухшнекового пресса заключается в лучшем перемешивании, плавлении продукта и самоочистке. Но такие прессы потребляют на 20–50% больше энергии, а из-за сложности конструкции их стоимость на 60% выше, чем одношнековых. Также к недостаткам относятся трудоемкость в использовании и значительный износ рабочих органов, следовательно, использование двухшнековых прессов может быть целесообразным только в специальных случаях [11].

Ведущими фирмами, которые выпускают шнековые экструдеры, являются Wenger, Anderson, Sprout-Bauer, Pres-to-Lu Stoker Juel (США), Cletral, Crezoux-Loire (Франция), Weber, Walter (Германия), Pagani (Италия), Lalesse (Швейцария), Baker Perkins (Великобритания), Cincinatti, Pini+Kaj (Австрия), Toshiba, Takeuchi Machinery (Япония), Valon-Kone (Финляндия) и др. [9, 12].

В связи с повышенным спросом и конкуренцией технологии экструзии постоянно модернизируются и совершенствуются. На рынке сельскохозяйственного и пищевого машиностроения появились различные марки экструдеров [13]: КМЗ-2У, ПЭМ-2У; ПЭМ-2УТ; Е-150; Е-250; Е-500; Е-1000; УЭЗ-Ф-800У; ЭУ-500; НЭК-125х8С (40х5 В); Insta-Pro 2000R; ШТАК-50 (80); ЭКСПРО и др., имеющие различные технологические характеристики и возможности по эффективности переработки сырья.

По данным работы [14] мощность привода одношнекового экструдера определяется по формуле

$$P_a = \frac{\pi^2}{2} D^2 N h_2 p \cdot \operatorname{tg} \alpha + \pi^4 D^2 N^2 \eta L_2 \left(\frac{D}{h_2 \cos \alpha} + \frac{c}{\delta \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (1)$$

где D – внешний диаметр шнека; N – частота вращения; h_2 – глубина нарезки шнека; p – давление; α – угол наклона винтовой линии нарезки шнека; η – динамическая вязкость прессуемого материала; L_2 – длина шнека; e – толщина витка; δ – зазор между стенкой цилиндра и витком шнека.

Автор работы [14] указывает, что при точных расчетах второй член правой части формулы (1) нуждается в корректировке, которая связана с тем, что за счет интенсивного сдвига слоев материала в процессе прессования вязкость изменяется и не является константой.

Из формулы (1) следует, что динамическая вязкость прямо пропорциональна мощности одношнекового экструдера, т.е. для минимизации затрат энергии на прессование твердого топлива из биомассы динамическая вязкость материала должна быть минимальной.

Для определения реологических характеристик биомассы – скорости сдвига, напряжения сдвига и вязкости – используют ротационный вискозиметр с вращающимися цилиндрами, схема которого представлена на рисунке 5 [15]. В ротационном приборе материал помещают в зазор между цилиндрами с общей осью вращения. Внутренний цилиндр, с радиусом R_1 , вращается с угловой скоростью ω , а внешний, с радиусом R_2 , удерживается крутящим моментом M в покое.

По геометрическим размерам прибора, угловой скорости и крутящему моменту можно определить динамическую вязкость сдвига [15]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{M(R_2 - R_1)}{4\pi^2 R_1 L \omega} \quad (2)$$

Как следует из формулы (2), уменьшения динамической вязкости можно добиться увеличением скорости сдвига слоев материала внутри пресса, что можно реализовать различными конструктивными мерами, например, увеличивая частоту вращения шнека или его диаметр. Следовательно, изменяя частоту вращения шнека или его геометрические размеры, за счет вязкого трения в слоях материала, можно получать как увеличение температуры, так и уменьшение динамической вязкости.



Рис. 5. Схема ротационного вискозиметра с вращающимися цилиндрами

Несмотря на то, что существует большое количество работ по изучению реологических свойств различных материалов, в литературных источниках отсутствуют сведения об исследовании реологических свойств биомассы.

С целью выбора оптимальных параметров процесса экструзии растительного сырья на ротационном вискозиметре были проведены исследования по определению динамической вязкости согласно методике, приведенной выше. В качестве исследовательского сырья была выбрана древесная мука хвойных пород марки 250. Исследования проводились при относительной влажности продукта от 6 до 14% и в диапазоне температур 30–120 °С. Это обусловлено тем, что чрезмерное пересушивание сырья приводит к выпариванию природного полимера – лигнина, а при влажности сырья более 12% в зоне загрузки рабочего органа из-за высокой температуры формируется «паровая пробка», которая приводит к выстреливанию сырья из рабочего органа.

Полученные результаты исследований представлены в виде зависимости изменения скорости сдвига $\dot{\gamma}$, напряжения сдвига τ и динамической вязкости η при разной относительной влажности сырья и различных температурах.

Представленные на рисунках 6–8 зависимости свидетельствуют об уменьшении динамической вязкости биомассы при увеличении скорости сдвига и уменьшении напряжения сдвига, что подтверждает влияние реологических свойств прессуемой биомассы на энергозатраты и позволяет выбрать оптимальные параметры, необходимые для расчета режимов работы одношнекового экструдера.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что оптимальными параметрами для проведения процесса прессования древесной муки является температура 80 °С и влажность 12%.

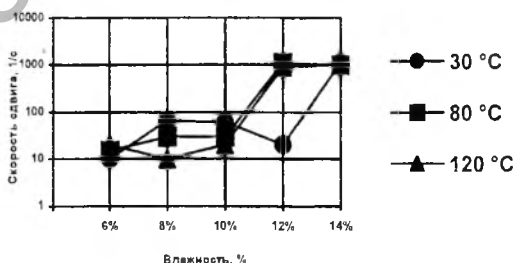


Рис. 6. Зависимость изменения скорости сдвига при разной влажности и температуре древесной муки

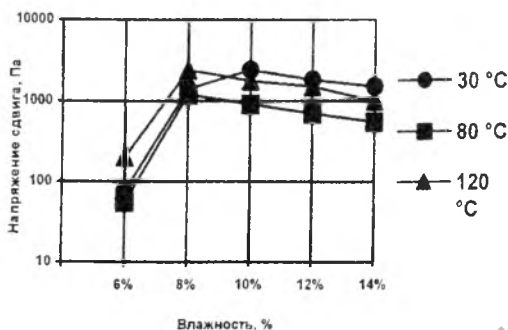


Рис. 7. Зависимость изменения напряжения сдвига при разной влажности и температуре древесной муки

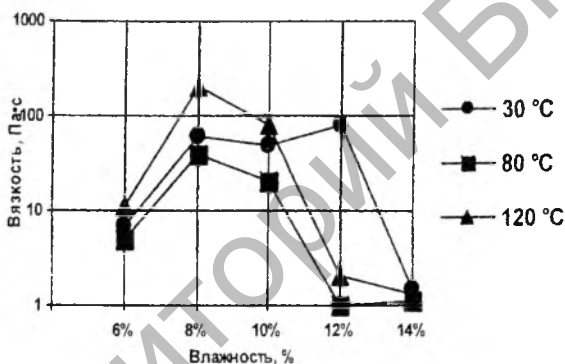


Рис. 8. Зависимость изменения динамической вязкости при разной влажности и температуре древесной муки

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что применение влажного помола биомассы с последующим влажным прессованием позволяют снизить энергозатраты при получении твердого топлива и в дальнейшем позволяют оптимизировать процесс прессования.

Список использованных источников

1. Семірненко, Ю.І. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від її характеристик / Ю.І. Семірненко, С.І. Семірненко // Вісник СНАУ. – Випуск 1 (21). – 2010. – С. 86–91.
2. Титко, Р. Солома як джерело енергії / Р. Титко, В.М. Калініченко, Р.С. Кордубан, Н.М. Панченко // Вісник ХНТУСГ: Економічні науки. Вип. 104. – Харків: ХНТУСГ. – 2010. – С. 72–81.
3. Біопалива: Технології, машини, обладнання / В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло та інші. – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація». 2004. – 256 с.