

УДК 674:621.928.93

# ВИРОБНИЦТВО БІОПАЛИВА З ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ МЕТОДОМ МІКРОПОДРІБНЕННЯ ТА ВОЛОГОГО ПРЕСУВАННЯ

ВОЙТОВ В. А.<sup>1</sup>, д. т. наук, БУНЕЦЬКИЙ В. О.<sup>1</sup>,  
ГУМЕНТИК М. Я.<sup>2</sup>, к. с.-г. наук, КРАВЦОВА Н. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка.

<sup>2</sup>Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України.

**Б**ільшість європейських країн, зокрема, й Україна в останнє десятиліття починають усвідомлювати обмеженість викопних ресурсів та необхідність їх раціонального використання, тому швидкими темпами розпочали перебудову існуючої енергетики та диверсифікацію поставок енергоресурсів з використанням відновлювальних джерел енергії.

Створення власного джерела біоенергетичної сировини розширення сировинної бази є важливим завданням для існуючих переробних підприємств України. Виробники біопалива для рентабельного виробництва вимушені мобілізувати та використовувати біомасу різного походження.

Перспективною сировиною для паливних гранул та брикетів є відходи сільськогосподарського виробництва (солома зернових злакових культур, ріпаку, гороху, стебла та лушпиння кукурудзи, соняшнику, лузга рису та гречки). Особливого значення та швидкого розповсюдження набуває спеціально вирощена біомаса на основі багаторічних злакових культур міскантусу, свічграсу (проса лозовидного) з періодом продуктивної вегетації 10-15 років, які здатні рости не тільки на родючих полях, а також на землях не придатних для вирощування традиційних культур, що характеризуються високою врожайністю біомаси та підвищеним виходом енергії. Собівартість тепла, отриманого в процесі згоряння паливних гранул, на 30 % нижча від кам'яного вугілля та 50% від природного газу.

Органічна сировина та спеціально вирощена біомаса, яка може використовуватися для виробництва біопалива, має ряд особливостей, що відрізняються від традиційних викопних палив. Найбільш важливою паливно-енергетичною характеристикою сировини є її теплотворна здатність, яка залежить від ряду факторів: генетичних особливостей культури, вмісту целюлози, пектину, полімерних та фенольних смол; умов зберігання сировини; вологості.

Економічно обґрунтованим є виробництво та використання твердого біопалива у вигляді гранул або брикетів в

сільських регіонах України. В зв'язку з тим, що твердопаливні та газові котли можливо модернізувати для використання паливних гранул, це значно зекономить витрати на заміні котельного обладнання, транспортуванні та зберіганні біопалива. І - значною мірою знизить енергетичну залежність від імпортованого викопного палива, дозволить поповнити енергобаланс сільськогосподарських підприємств.

Згідно останніх експертних розрахунків, існуючий потенціал України в сфері відновлювальної енергетики складає 80 млн. тонн умовного палива, з них більше 20 млн. тонн - в галузі біоенергетики. Сьогодні цей потенціал використовується лише на 2%. При повному його використанні це дозволило б щорічно замінити більше 40% первинних енергетичних ресурсів України.

**Метою роботи** є обґрунтування нових підходів підготовки сировини, шляхів зниження енерговитрат та підвищення показника питомої енергомісткості при виробництві твердих видів біопалива на основі органічної сировини за рахунок застосування мікроподрібнення та вологого пресування.

**Результати досліджень.** При виробництві паливних гранул та брикетів значний вплив на вартість кінцевої продукції має початкова вологість сировини. На основі даних літературних джерел, процентне відношення витрат при виробництві твердих видів біопалива складає: [1-5]:

- вартість сировини – 42,8%;
- попередня сушка сировини – 34,2%;
- пресування – 13%;
- персонал – 2,8%;
- подрібнення біомаси – 2,6%;
- загальні витрати – 2%;
- зберігання – 1,6%;

- охолодження – 1,0%.

Аналіз витрат показує, що сушка сировини перед подрібненням і пресуванням займає 34,2% загальних витрат. Крім того, сушка ефективна для подрібненої біомаси.

Типовий технологічний процес виробництва брикетів та гранул, який широко застосовується в Західній Європі та Україні представлений на рис. 1. [3]. Аналіз технологічного процесу дозволяє зробити висновки, що зниження енерговитрат на виробництво одиниці продукції можна досягнути шляхом виключення сушки при одночасному перерозподілі енергії на подрібнення, пресування чи гранулювання.

У таблиці 1. наведено порівняльну характеристику, теплотворну здатність, вміст золи та коефіцієнт переводу натурального палива в умовне у різних видах палива при відповідній вологості [1].

На основі аналізу таблиці 1., паливні брикети та гранули з органічної сировини за теплотворною здатністю та вмістом золи можуть бути економічно-обґрунтованою альтернативою традиційним викопним видам палива.

Після попереднього подрібнення сировини з вологістю 20-30%, без застосування сушки, виконується тонке подрібнення. Такий шлях дозволяє отримати зменшення частки мікроподрібнення до значень 100-50 мкм при одночасній активації сировини перед пресуванням. Мікроподрібнена й одночасно активована сировина з вологістю до 20% потребує в 25 разів менше енергії при пресуванні в шнекових пресах, де реалізується ефект зниження динамічної в'язкості сировини за рахунок наявності великих швидкостей зсуву.

Застосування дезінтегратора дозволяє виключити з ланцюга подрібнення молоткову дробарку. Дезінтегратор може забезпечувати подрібнення до рівня 5...10 мкм. Крім цього, дезінтегратор може виконувати подрібнення сировини з рівнем вологості до 40%, що виключає з технологічного процесу сушку.

Мікроподрібнення органічної сировини буде сприяти активному зрушенню шарів в середині шнекового преса, її саморозігрів до пластичного стану, а, отже, і зниженню енерговитрат на пресування

завдяки зниженню динамічної в'язкості зволоженої та розігрітої маси.

При застосуванні технологічного процесу зволоженого пресування мікроподрібненої органічної сировини, можна рекомендувати наступну структурну схему, рис. 5.

Модуль переробки, в який входить мікроподрібнення, збір пилу, зволоження і пресування, представлений на рис. 6.

На сьогоднішній день більшість паливних брикетів випускається на механічних пресах ударного типу («С. F. Nielsen», Данія), гідравлічних («RUF», Німеччина) та шнекових пресах (Піні-Кей, Росія та країни СНД). Обладнання «RUF» співвідносне за вартістю й експлуатаційними характеристиками з ударно-механічними пресами «С. F. Nielsen» на невеликі потужності, однак воно випускає менш щільний брикет, який має тенденцію до кришення. Щільність брикетів фірми «С. F. Nielsen» 1,2 кг/дм<sup>3</sup>, а брикетів «RUF» зазвичай знаходиться в межах 0,9-1 кг/дм<sup>3</sup>. Це обумовлено технічними обмеженнями гідравлічного способу пресування: прес фірми «RUF» працює під тиском 150 МПа, в той час, як ударно-механічний прес фірми «С. F. Nielsen» - 200 МПа.

Особливістю роботи ударних та гідравлічних пресів є те, що при пресуванні не відбувається значного зсуву одного шару матеріалу відносно іншого, що унеможлиблює використання реологічних властивостей вологої сировини.

По відношенню до інших способів пресування, саме шнековий спосіб дозволяє отримувати найбільш щільний (до 1,4 кг/м<sup>3</sup>) і міцний брикет, що, разом зі зручною для складування формою та доволі низькою ціною, обумовлює відмінні споживчі якості.

На основі аналізу, шнекові преси є найбільш перспективними для отримання твердого палива із вологої біомаси, тому що в них можливо реалізувати (протягом усієї довжини шнеку) значні зсуви шарів матеріалу, що призводить до підвищення температури, розм'якшення і часткового розплаву сировини. Такі процеси впливають на зниження енерговитрат на пресування при одночасному збільшенні щільності та твердості паливного брикету або гранули.

Шнекові преси (екструдери) можуть бути різних типів: одно- та двошнекові; одно- та двошступеневі; універсальні й спеціалізовані; з осцилюючим (вздовж осі) та одночасно оборотним шнеком; з зоною дегазації та без неї; з обертанням шнеків в один і в протилежний боки і т.п. [7 – 9].

Одношнекові преси прості в виготовленні, відносно недорогі, в них існує можливість заміни робочого органу. Регулювання режиму роботи в одношнековому пресі є менш складним, ніж в двошнековому. Також, до переваг одношнекового преса слід віднести добре змішування та простоту в експлуатації. До недоліків можна віднести неефективну заг-

Таблиця 1.

## Порівняльна характеристика різних видів палива

Вид палива	Вологість, Wp %	Теплотворна здатність		Вміст золи, %	Коефіцієнт переводу натурального палива в умовне
		МДж/кг	Ккал/кг		
Природний газ	-	38 МДж/м <sup>3</sup>	8570	0	1,2
Дизельне паливо	-	42,5	9000	1,0	1,4
Мазут	-	42	8900	1,5	1,4
Кам'яне вугілля	-	25	6060	20	0,86
Кокс, Антрацит	-	27	6650	20	1
Відходи деревини, щепи	40-45	12,0	2440	2,0	0,40
Стебла та качани кукурудзи	20	12,5	2900	3,0	0,42
Стебла, лущипиння соняшника	20	12,5	2900	3,0	0,42
Солома злакових культур	15	10,5	2700	2,0	0,36
Щепа енергетичної верби	30	14,5	3350	2,0	0,50
Брикет та гранули з соломи	8-10	12,5-14,8	3090 3600	3,0	0,50
Брикет та гранули енергетичних культур	10-12	16,5-18,0	4040 4500	1,0	0,64

рузку (можливе утворення застійних зон), відсутність самоочищення. Перевага двошнекового преса полягає в кращому перемішуванні, плавленні сировини та самоочищенні. Але такі преси споживають на 20-50% більше енергії, а через складності конструкції їх вартість на 60% вища, ніж одношнекових. Також, до недоліків належать трудомісткість в використанні та значний знос робочих органів.

Отже, використання двошнекових пресів може бути доцільним тільки у спеціальних випадках [9]. Провідними фірмами, які випускають шнекові екструдери, є Wenger, Anderson, Sprout-Bauer, Pres-to-Lu Stoker Juel (США),

Clextal, Crezaux-Loire (Франція), Weber, Walter (Німеччина), Pagani (Італія), Lalesse (Швейцарія), Baker Perkins (Великобританія), Cincinnati, Pini+Kaj (Австрія), Toshiba, Takeuchi Machinery (Японія), Valon-Kone (Фінляндія) та інші [7, 10]. У зв'язку з підвищеним попитом та конкуренцією, технології екструзії постійно модернізуються та удосконалюються. На ринку сільськогосподарського та харчового машинобудування існують різні марки екструдерів [12]: 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); ЭКС-ПРО та ін., які мають різні технологічні характеристики і можливості по ефек-

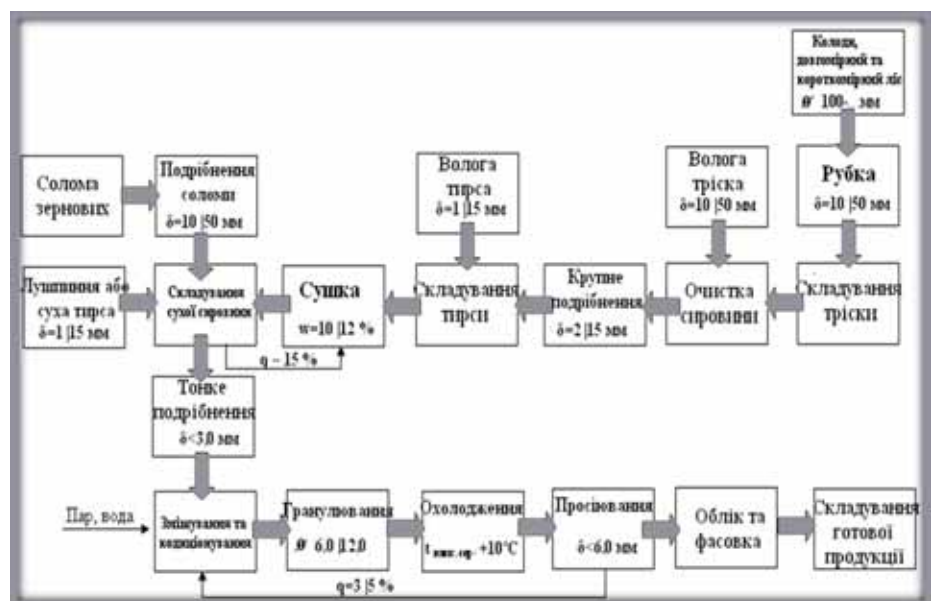


Рис. 1. Типовий технологічний процес отримання твердих видів палива у вигляді паливних брикетів та гранул.

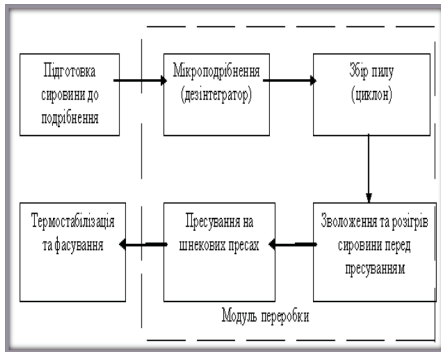


Рис. 5. Структурна схема зволоженого пресування органічної сировини



Рис. 6. Модуль (міні-лінія) переробки та виробництва біопалива на основі зволоженого пресування органічної сировини.

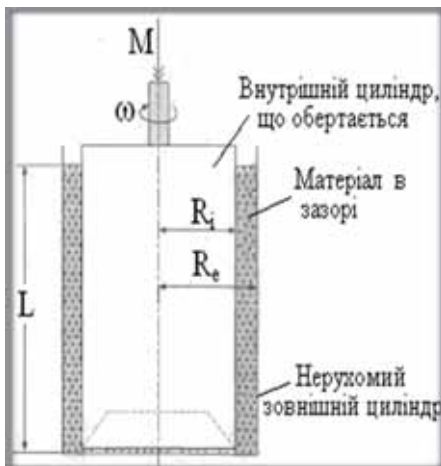


Рис. 7. Схема ротаційного віскозиметра з циліндрами, що обертаються

тивності переробки сировини.

Особливістю та складністю процесу пресування або екструзії є перехід механічної енергії в теплову під дією значних швидкостей зсуву, температури та тиску, що призводить до руйнування та перетворення екструзійної сировини в пластичну масу, яка є в'язкою. У зв'язку з цим, значну увагу необхідно приділяти поведінці матеріалів, які, з точки зору реології, є рідинами. Реологічні характеристики рідин дозволяють розрахувати і оптимізувати конструкцію шнеку та параметри процесу переробки, змодельовати поведінку матеріалу в процесі екструзії з метою зниження енергетичних витрат на отримання готової продукції. До таких характеристик належать: швидкість зсуву, напруження зсуву та динамічна в'язкість.

Для наукового обґрунтування та проектування екструзійного обладнання необхідно враховувати закони поведінки екструдованих продуктів в робочих каналах екструдера, так само, як їх структурно-механічні властивості.

Для визначення швидкості зсуву, напруження зсуву та в'язкості використовують ротаційний віскозиметр з циліндрами, що обертаються, схема якого представлена на рис. 7 [11]. В ротаційному приладі матеріал поміщується в зазор між циліндрами зі спільною віссю обертання. Внутрішній циліндр з радіусом  $R_i$  обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , а зовнішній – з радіусом  $R_e$ , утримується крутним моментом  $M$  в спокої.

З геометричними розмірами приладу та кутовою швидкістю можна визначити швидкість зсуву матеріалу.

Згідно [11], швидкість зсуву визначають як різницю між двома швидкостями, віднесеними до відстані в напрямку, перпендикулярному до течії матеріалу:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\pi R_i \omega}{R_e - R_i}$$

де  $R_i$  – діаметр внутрішнього циліндру, м;

$\omega$  – кутова швидкість внутрішнього циліндру,  $s^{-1}$ ;

$R_e$  – діаметр зовнішнього циліндру, м.

Із формули (6) видно, що зі збільшенням діаметру внутрішнього циліндру, збільшенням швидкості обертання або зменшення коаксіального зазору швидкість зсуву зростає.

Напруження зсуву матеріалу – це напруження, яке необхідне для виникнення деформації зсуву. Воно залежить від крутного моменту, необхідного для обертання:

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_i^2 L}$$

де  $M$  – крутний момент, Н·м;

$L$  – рівень матеріалу в коаксіальному зазорі, м.

Динамічна в'язкість зсуву дорівнює:

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

За даними роботи [14] потужність приводу одношнекового екструдера визначається за формулою:

$$P_a = \frac{\pi^2}{2} D^2 N h_2 p \cdot \operatorname{tg} \alpha + \pi^3 D^2 N^2 \eta L_2 \left( \frac{D}{h_2 \cos \alpha} + \frac{e}{d \operatorname{tg} \alpha} \right)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр шнеку;

$N$  – частота обертання;

$h_2$  – глибина нарізки шнеку;

$p$  – тиск;

$\alpha$  – кут нахилу гвинтової лінії нарізки шнеку;

$h$  – динамічна в'язкість матеріалу, що пресується;

$L_2$  – довжина шнеку;

$e$  – товщина витку;

$d$  – зазор між стінкою циліндру та витком шнеку.

Автор роботи [12] вказує, що, при точних розрахунках, другий член правої частини формули (9) потребує корегування, яке пов'язано з тим, що за рахунок інтенсивного зсуву шарів матеріалу в процесі пресування, в'язкість змінюється та не є константою.

З формули (9) випливає, що динамічна в'язкість прямо пропорційна потужності одношнекового екструдера, тобто, для мінімізації витрат енергії на пресування твердого палива із біомаси, динамічна в'язкість матеріалу повинна бути мінімальною.

Як слідує з формули (8), зменшення динамічної в'язкості можна домогтися збільшенням швидкості зсуву шарів матеріалу всередині пресу, що можна виконати різними конструктивними заходами, наприклад, збільшуючи частоту обертання шнека або його діаметр. Отже, змінюючи частоту обертання шнека або його геометричні розміри, за рахунок в'язкого тертя в шарах матеріалу, можна отримувати як збільшення температури, так і зменшення динамічної в'язкості.

Не дивлячись на те, що існує велика кількість робіт по вивченню реологічних властивостей різних матеріалів, в літературних джерелах відсутні відомості про дослідження реологічних властивостей органічної сировини.

З метою вибору оптимальних параметрів процесу екструзії органічної сировини, на ротаційному віскозиметрі були проведені дослідження по визначенню динамічної в'язкості згідно з методикою, наведеною вище. В якості дослідної сировини була обрана тирса хвойних порід марки 250. Дослідження проводились при відносній вологості продукту від 6 до 14% та в діапазоні температур 30-120°C. Це обумовлено тим, що надмірне пересушування сировини призводить до випаровування природного полімеру – лігніну, а при вологості сировини більше 12% в зоні загрузки робочого органу через ви-

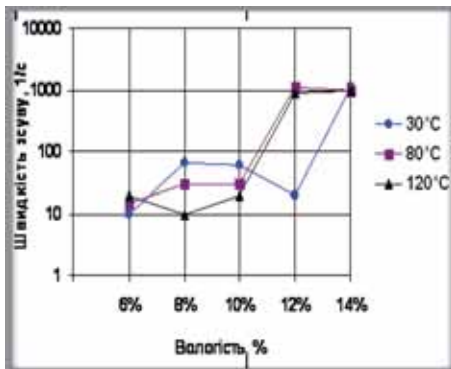


Рис. 8. Залежність зміни швидкості зсуву при різній вологості та температурі сировини

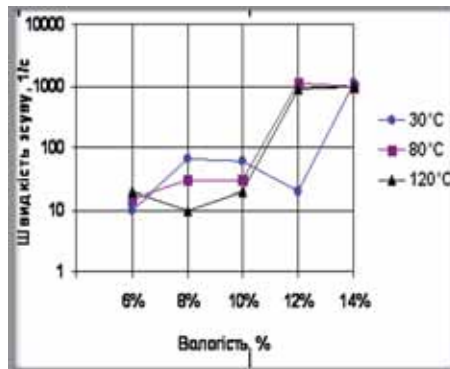


Рис. 9. Залежність зміни напруження зсуву при різній вологості та температурі сировини

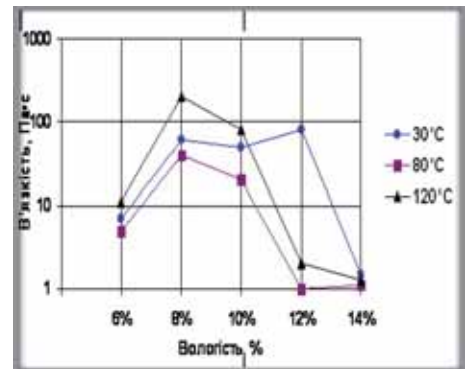


Рис. 10. Залежність зміни динамічної в'язкості при різній вологості та температурі сировини

соку температуру формується «парова пробка», яка призводить до втрати сировини.

Отримані результати досліджень представлені у вигляді залежностей зміни швидкості зсуву, напруження зсуву  $t$  та динамічної в'язкості  $h$  при різній відносній вологості сировини та різних температурах.

Представлені на рис. 8 – 10 залежності свідчать про зменшення динамічної в'язкості органічної сировини та спеціаль-

но вирощеної біомаси при збільшенні швидкості зсуву та зменшенні напруження зсуву, що дає змогу вибрати оптимальні параметри, необхідні для розрахунку режимів роботи шнекового екструдера.

**Висновок.** Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що оптимальними параметрами для проведення процесу екструзії органічної сировини є температура 80°C та вологість 12%.

Отримані експериментальні дані підтверджують вплив реологічних власти-

востей органічної сировини та спеціально вирощеної біомаси, що пресується, на енерговитрати при отриманні твердого палива і, в подальшому, дадуть змогу оптимізувати процес екструзії, вибрати оптимальні параметри шнекового преса та збільшити теплотворну здатність біопалива.

Техніко-економічне обґрунтування підтверджує доцільність розвитку біоенергетичної галузі України.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Біопалива: Технології, машини, обладнання / В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло та інші – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.
2. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетука, І.П. Григорюк та інші – К.: «Аграр Медіа Груп», 2010. – 326 с.
3. Бунецький В.О. Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пеллет або брикетів / В.О. Бунецький // Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, Вісник центру наукового забезпечення АПВ Харківської області, випуск 10, 2011. – с. 328-340.
4. Гументик М.Я. Перспективи вирощування багаторічних злакових культур для виробництва біопалива. // Цукрові буряки. – 2010. – № 4. – С. 21-22.
5. Курило В.Л., Гументик М.Я., Квав В.М., Міскантус-перспективна культура для виробництва біопалива // Агробіологія – №4 (80). – 2010. – С. 62-66.
6. Технології та обладнання для використання поновлюваних джерел енергії в сільськогосподарському виробництві / Під ред. Кравчука

В.І., Дубровіна В.О. // Укр.НДІПВТ ім. Л. Погорілого, Дослідницьке, 2010, - 184 с.

6. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 2 // Под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 2000. – 162 с.
7. Экструзия в пищевой технологии / А.Н. Остриков, О.В. Обромов, А.С. Рудометкин – СПб.: ГИОРД, 2004. – 288 с.
8. Герман Х. Шнековые машины в технологии / Пер. с нем. Л.Г. - Веденяпиной. – Л.: Химия, 1975. – 232 с.
9. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс / Пер. с нем. Г.П. - Делекторского. – Л.: ГХИ 1962. – 467 с.
10. Гомонай М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: монография. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. – 68 с.
11. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
12. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий: монография / М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев, В.Г. Однолинько. – М.: «Издательства Машиностроение – 1», 2007. – 292 с.

#### АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто основні енергетичні показники палива та органічної сировини, процес виробництва твердих видів біопалива у вигляді брикетів та гранул. Проведено економічне та енергетичне обґрунтування застосування нових підходів підготовки сировини за рахунок зниження енерговитрат, шляхом мікроподрібнення біомаси та вологого пресування. Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що оптимальними параметрами для проведення процесу екструзії органічної сировини є температура 80°C та вологість 12%.

#### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные энергетические показатели топлива и органического сырья, процесс производства твердых видов биотоплива в виде брикетов и гранул. Проведено экономическое и энергетическое обоснования применения новых подходов подготовки сырья за счет снижения энергозатрат, путем микроизмельчения биомассы и влажного прессования. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что оптимальными параметрами для проведения

процесса экструзии органического сырья являются температура 80°C и влажность 12%.

#### ANNOTATION

Economically reasonable is the production and usage of solid biofuel in the form of pellets or briquettes in rural areas of Ukraine. Due to the fact that the solid and gas boilers can upgrade for usage fuel pellets, it greatly saves the cost of replacing the boiler, transport and storage of biofuel. And - significantly reduce energy dependence on imported fossil fuels, will replenish energy balance of agricultural enterprises.

In the article the main fuel and energy performance of organic raw materials, production process of solid biofuel in the form of briquettes and pellets are reviewed. An economic and energy study of new approaches training materials by reducing energy consumption by microparcelling biomass and damp pressing were conducted investigation. Analysis of the results suggests that the optimal parameters for the process of extrusion of organic raw materials are temperature 80° C and humidity is 12%.