

УДК 621.73 (035)

**В. М. Боков, проф., канд. техн. наук, М. І. Попова, доц. канд. техн. наук,  
Р. С. Лисенко, магістрант**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Використання осіннього листя для виготовлення альтернативних видів палива

Розроблено маловитратну технологію пресування брикетів із осіннього листя, та вперше запропоновано, досліджено і розроблено технологію прямого видавлювання із них пеллет. **осіннє листя, пеллети, брикети, здрібнювання, пряме видавлювання, пресування в закрити матрицю, густина листя після пресування, оснащення, випробування на горіння**

**В. М. Боков, М. І. Попова, Р. С. Лисенко**

*Кіровоградский национальный технический университет*

**Использование осенних листьев для изготовления альтернативных видов топлива**

Разработано малозатратную технологию прессования дров из осенних листьев, и впервые предложено, исследовано и разработано технологию прямого выдавливания из них пеллет. **осенние листья, пеллеты, брикеты, измельчение, прямое выдавливание, прессование в закрытую матрицу, плотность листьев после прессования, приспособления, испытание на сгораемость**

**Обґрунтування напрямку дослідження.** Дрова, як паливо, можна отримати із листя шляхом пресування. За даними [1] працює компанія BioFuels International, яка перетворює опале листя в поліна. В кінцевий продукт (перед пресуванням) додають 30 % воску, який є речовиною, що зв'язує та додатковим паливом. В наслідок додавання воску, вартість 10 полінів (12 кг) складає 56 \$. Зрозуміло, що така ціна полінів неприйнятна на Україні.

В роботі розвивається ідея пресування дров із опалого листя без додавання воску. З фізичної точки зору, отримання *твердого* брикету із листя без використання речовин, що з'єднують, означає зближення окремих елементів клітковини до такої відстані, коли починають діяти міжмолекулярні та міжатомні зв'язки. Це можливо здійснити лише методом пресування з використанням відносно великих тисків. При пресування по-суті відбувається безперервне підвищення густини клітковини. В природі густина порід дерев лежить в межах від 0,14 до 1,33 г/см<sup>3</sup> [2, с. 536]. З великою імовірністю можна стверджувати, що для отримання *твердого* брикету із листя треба досягти при пресуванні густини, що відповідає більш твердим породам ( $\rho > 1$  г/см<sup>3</sup>). Доцільність цього підтверджується тим, що твердий брикет з більшою густиною, при рівних розмірах, має більшу масу, отже більшу кількість речовини, що горить.

Крім того, дрова із опалого листя, на нашу думку, можна отримувати у вигляді пеллет. Пеллети принципово відрізняються від твердих брикетів як формою (круглі стержні діаметром 5...10 мм, довжиною 10...50 мм), так і густиною (густина пеллет як правило не перевищує 1 г/см<sup>3</sup>). Пеллети із тирси, тріски, лузги соняшника, соломи зернових є сьогодні альтернативою твердому паливу – вугіллю – в розвинутих країнах, зокрема в країнах Європи. Але інформація, щодо виготовлення пеллет із опалого листя в Україні, в Європі і в світі, відсутня. На нашу думку, це – привабливий напрямок розвитку енергетики.

**Мета роботи:** розробка маловитратної технології виготовлення дров (брикетів та пеллет) із опалого листя без додавання сторонніх речовин, зокрема воску. Це дасть можливість значно (приблизно у 90...100 разів) зменшити ціну дров, що суттєво для центрального регіону України.

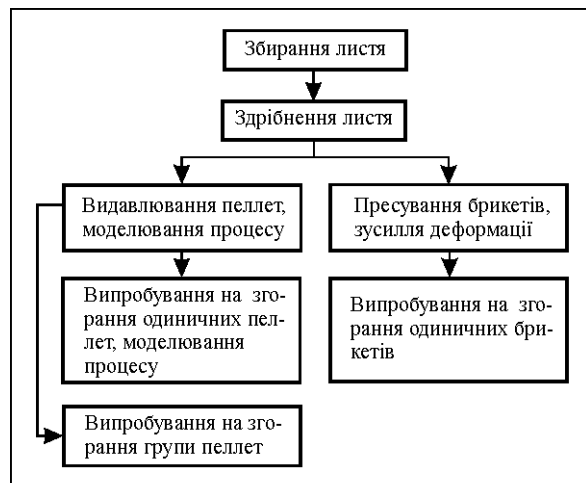
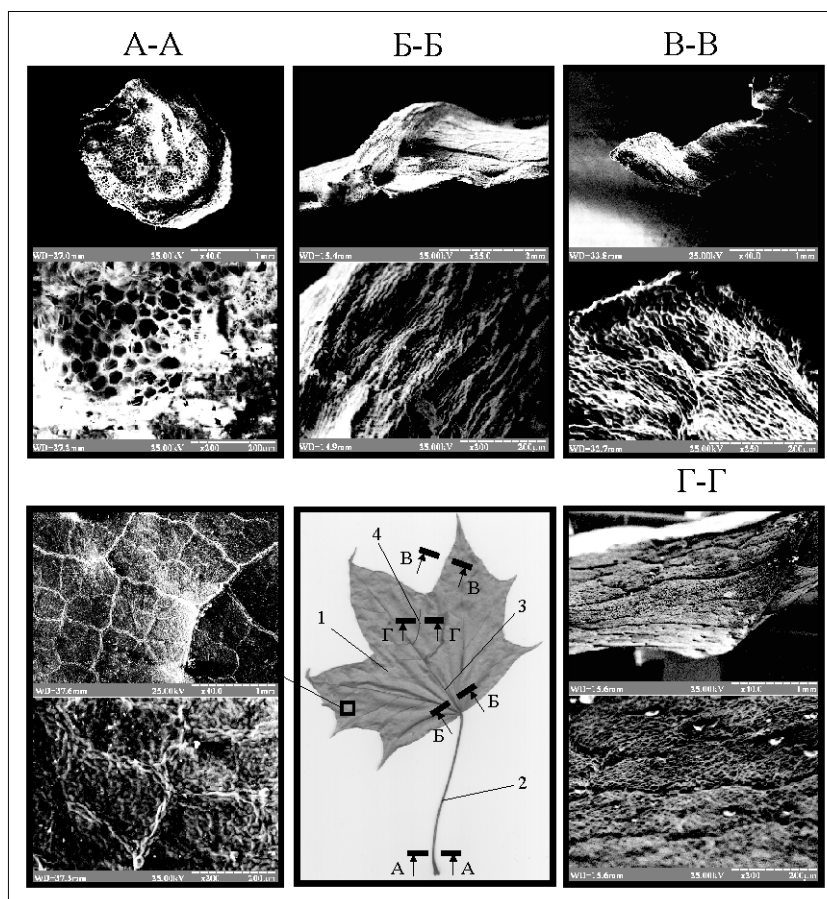


Рисунок 1 - Послідовність дослідження

**Задачі та методика дослідження.** З урахуванням технології виготовлення, методика експериментального дослідження процесу виготовлення дров із опалого листя включає в себе етапи, що наведені на рис. 1.

**Результати дослідження.** Для виготовлення пеллет та брикетів використовувалося опале листя клену. Густину мокрого листя у мішку (густину сировини) визначали як середнє арифметичне від густини листя в п'яти мішках. Вона становила 0,14 г/см<sup>3</sup>.



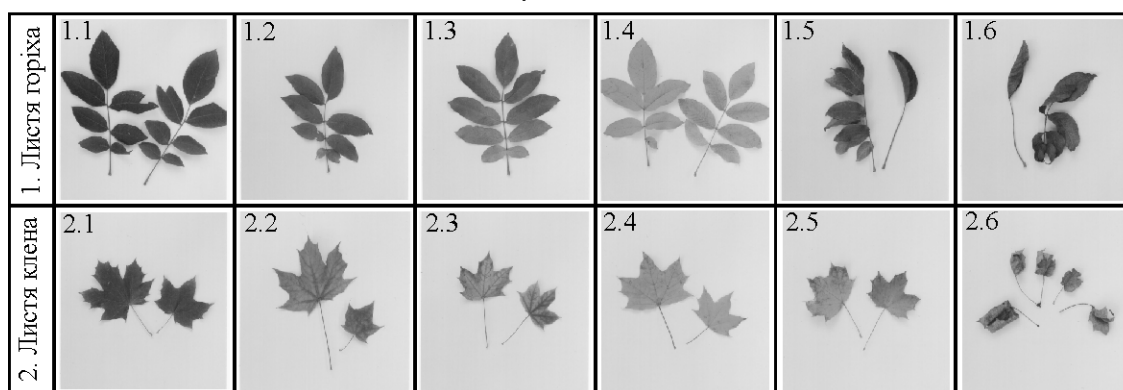
1 - пелена; 2 - ніжка; 3, 4 - капілярні потовщення, відповідно I та II порядку  
Рисунок 2 - Структура осіннього листя клена у фрактографіях його елементів

Як бачимо, некомпактне осіннє листя займає великий об'єм. Крім того, осінній лист, зокрема лист клена, за своєю структурою неоднорідний (рис. 2): плоска пелена, товщина якої не перевищує 0,1 мм; відносно тверда ніжка, діаметр якої лежить в межах від 1 до 2 мм; відносна жорсткість листа, що характеризується відношенням найбільшої

її ширини до товщини пелени, досягає 2000; на пелені листа віялоподібно відходять від ніжки затверділі капілярні потовщення (товщиною до 0,5 мм) для постачання листів рідиною, які надають листу додаткову жорсткість; речовина основи листа – клітковина.

Крім того, як показано в табл. 1, опале осіннє листя не однорідне за ступеню зав'ялості. Тому, для утворення більш міцної структури пеллет та брикетів за рахунок використання однорідної маси сировини, перед пресуванням осіннє листя піддають здрібненню, зокрема з використанням шнекового здрібнювача (перше ущільнення в напрямку підвищення густини). Густина опалого мокрого листа після здрібнення підвищується в 6,5 рази (до 0,92 г/см<sup>3</sup>).

Таблиця 1 - Осіннє листя за ступеню зів'янення



Для прямого видавлювання пеллет та пресування брикетів в закриту матрицю використовувався універсальний експериментальний штамп (рис. 3), що складається з наступних основних деталей: пуансона 1 для видавлювання та пресування; корпус-матриці 2; комплекту змінних матриць 3, 4, 5, 6, 7, 8, які дозволяють дискретно варіювати факторами  $h$  (15, 25, 35 мм) та  $\alpha$  (60°, 90°, 120°); деталі «дно» 9, яка є частиною закритої матриці для пресування.

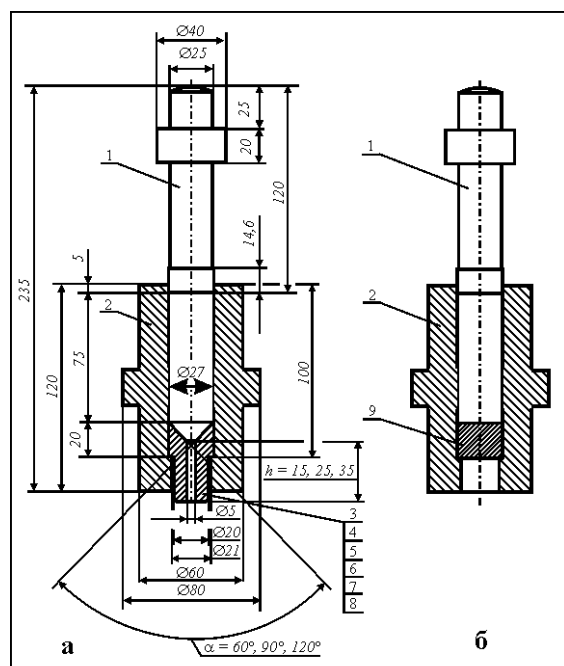


Рисунок 3 - Експериментальний штамп

Для прямого видавлювання пеллет (рис. 3, а), штамп працює таким чином. В робочу порожнину корпус-матриці 2 встановлюється певна змінна (3...8) матриця, що відповідає матриці планування експерименту, та завантажується опале листя після попереднього здрібнення та ущільнення. Далі в цю ж порожнину вставляється пуансон 1. В такому вигляді штамп встановлюється на випробувальну машину УІП-50 та навантажується. При стисненні сировинної маси остання видавлюється із робочого отвору змінної матриці діаметром 5 мм та накопичується в піддоні, який встановлюють під штампом. Зусилля видавлювання пеллет записується на паперовий носій.

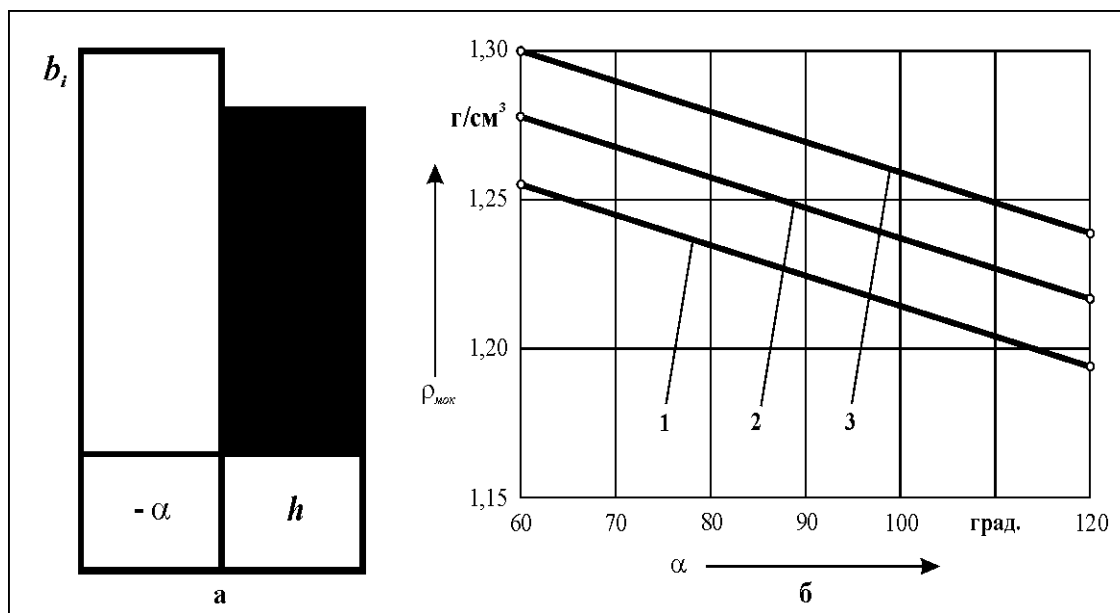
За результатами двофакторного  $[h(x_1), \alpha(x_2)]$  експерименту отримано математичну модель густини мокрих пеллет  $\rho_{мок}(y_1)$  після прямого видавлювання

$$y_1 = 1,247 + 0,0275x_1 - 0,0325x_2, \quad (1)$$

де значення факторів у кодовому ( $x_i$ ) і натуральному ( $X_i$ ) масштабах зв'язані співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 25}{10}; \quad (2) \quad x_2 = \frac{X_2 - 90}{30}. \quad (3)$$

Із моделі (1) виходить, що найбільший вплив на  $\rho_{мок}$  виявляє кут матриці на вході здрібненого листа в робоче вікно  $\alpha$ , із зменшенням якого густина збільшується (рис. 4). Таким чином, кут  $\alpha$  треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив довжини робочого вікна матриці для прямого видавлювання  $h$  на  $\rho_{мок}$  трохи менший, але має суттєве значення. З його підвищенням густина мокрих пеллет збільшується.



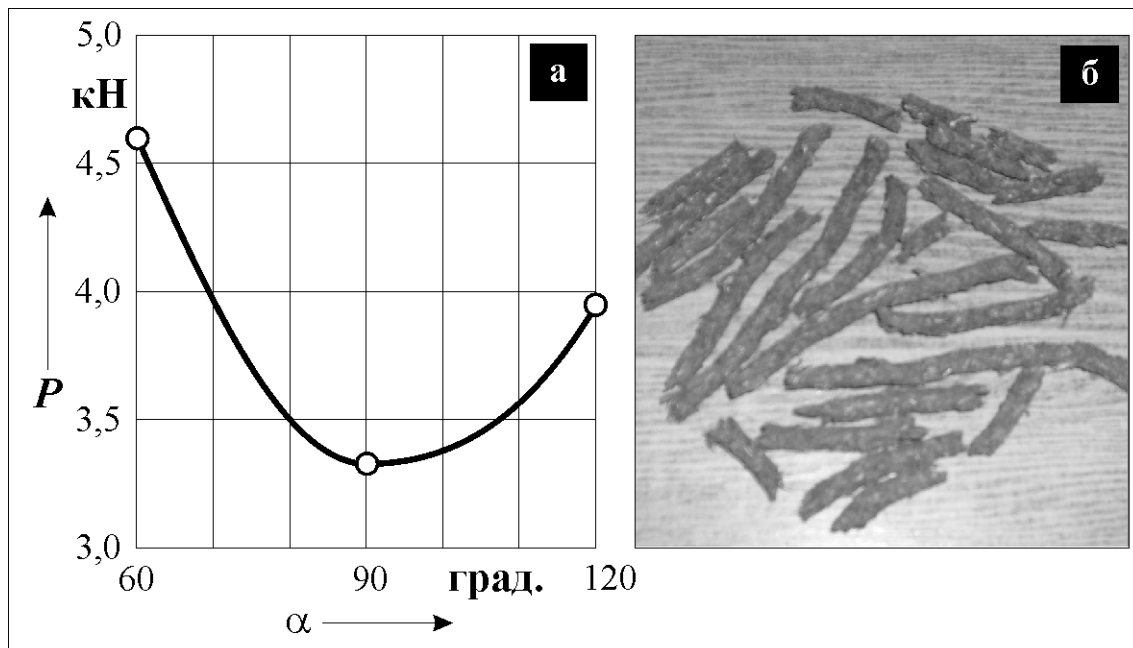
а - ступінь впливу факторів; б - графічна залежність; 1 -  $h = 15$  мм, 2 -  $h = 25$  мм, 3 -  $h = 35$  мм  
Рисунок 4 - Залежність густини мокрих пеллет після прямого видавлювання  $\rho_{мок}$  від  $\alpha$  та  $h$

В рамках експерименту густина мокрих пеллет  $\rho_{мок}$  змінювалася у межах від 1,19 до 1,30  $г/см^3$ , що приблизно в 1,3...1,4 рази перевищує густину опалого мокрого листа після здрібнення та попереднього ущільнення ( $\rho_m = 0,92$   $г/см^3$ ). Останнє підтверджує доцільність використання метода прямого видавлювання для виготовлення пеллет.

В результаті аналізу фіксованого зусилля прямого видавлювання пеллет  $P$  при постійній (середній) довжини робочого вікна  $h$ , отримано графічну залежність  $P$  від кута матриці на вході здрібненого листа в робоче вікно  $\alpha$  (рис. 5). Як бачимо, при  $\alpha = 90^\circ$  вона має екстремум, який характеризується найменшим зусиллям видавлювання пеллет. Таким чином, з точки зору економічності витрачання енергії, кут  $\alpha = 90^\circ$  є оптимальним.

Слід відмітити, що густина отриманих мокрих пеллет в наслідок природного сушіння з часом зменшилася до  $\rho_{сух}$ .

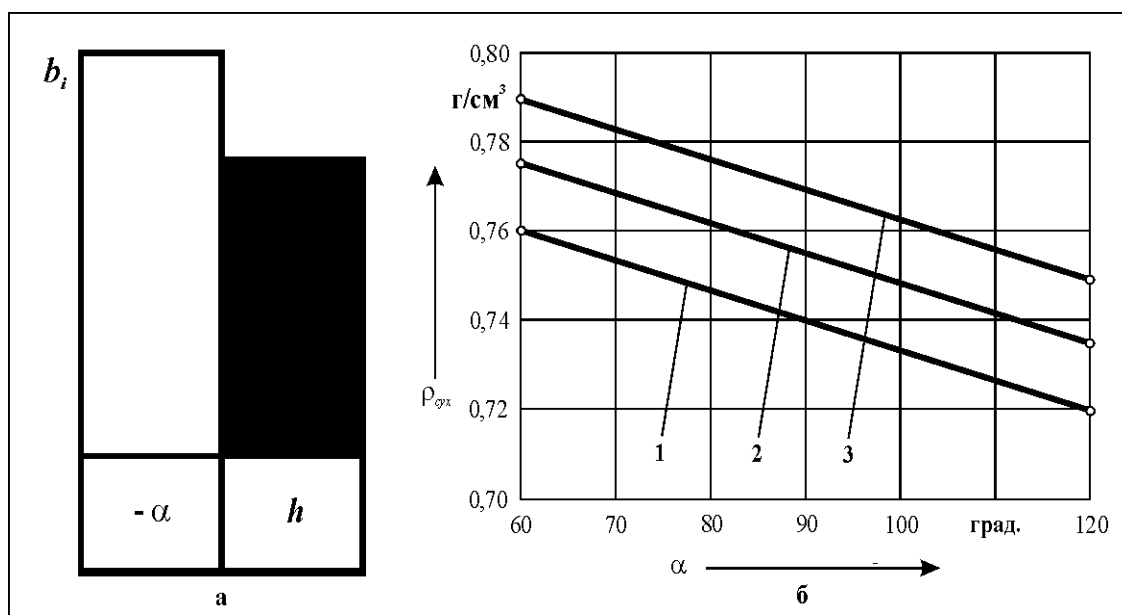
Сухі пеллети, як паливо, є кінцевих продуктом виробництва. Математична модель густини сухих пеллет  $\rho_{сух}(y_2)$  має вигляд:



а - графік залежності; б - пеллети із листя

Рисунок 5 - Залежність зусилля прямого видавлювання пеллет  $P$  від кута  $\alpha$  матриці

$$y_2 = 0,755 + 0,015x_1 - 0,02x_2 \quad (4)$$



а - ступінь впливу факторів; б - графічна залежність; 1 -  $h = 15$  мм, 2 -  $h = 25$  мм, 3 -  $h = 35$  мм

Рисунок 6 - Залежність густини сухих пеллет після прямого видавлювання  $\rho_{\text{сух}}$  від  $\alpha$  та  $h$

Як бачимо (рис. 6), найбільший вплив на  $\rho_{\text{сух}}$  виявляє кут матриці на вході здрібненого листя в робоче вікно  $\alpha$ , із зменшенням якого густина збільшується. Таким чином, кут  $\alpha$  і в даному разі треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив довжини робочого вікна матриці для прямого видавлювання  $h$  на  $\rho_{\text{сух}}$  трохи менший, але має суттєве значення. З його підвищенням густина сухих пеллет збільшується. В рамках експерименту густина сухих пеллет  $\rho_{\text{мок}}$  змінювалася у межах від 0,72 до 0,79

г/см<sup>3</sup>, що відповідає густині компактної деревини клена. Останнє підтверджує можливість використання таких сухих пеллет як палива.

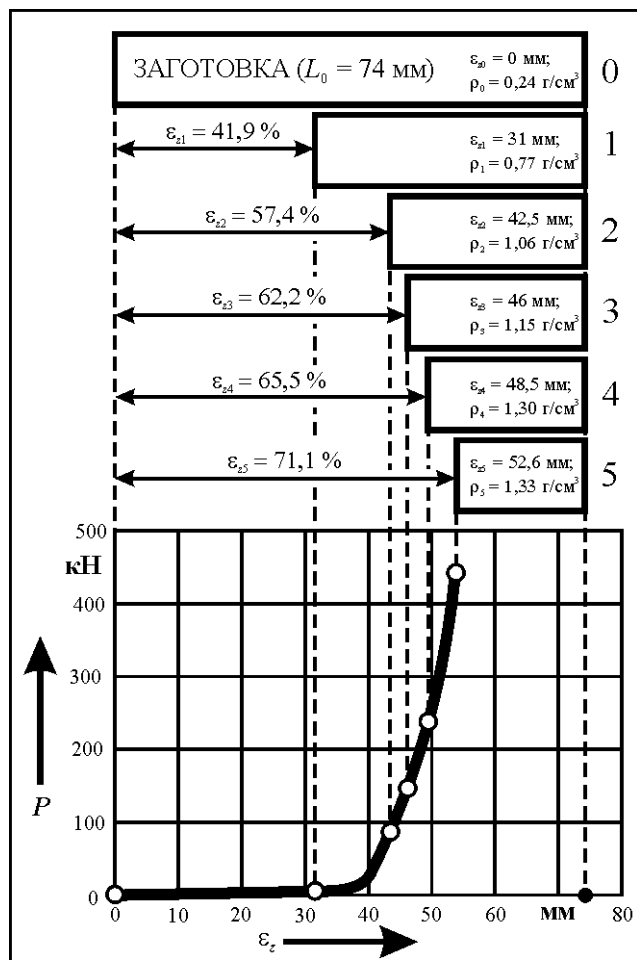


Рисунок 7 - Залежність зусилля пресування в закрити матрицю брикетів із сухого здрібненого листа  $P$  від величини деформації  $\epsilon_z$

робочої поверхні під пуансоном) визначали тиск пресування  $p$  та будували графічну залежність від нього густини брикету (рис. 9).

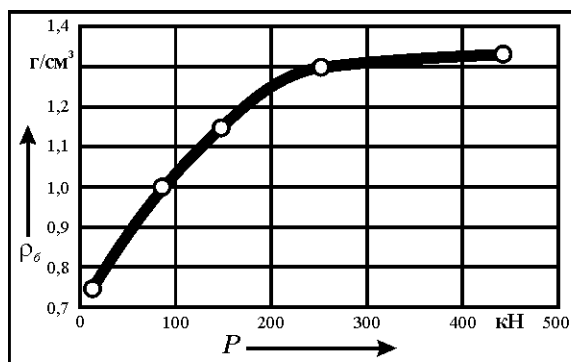


Рисунок 8 - Залежність густини брикетів із сухого здрібненого листа  $\rho_\delta$  від зусилля пресування  $P$

Пресування брикетів здійснювали в закрити матрицю за допомогою експериментального штампа (див. рис. 3, б). В якості сировини використовувалося здрібнене, попередньо ущільнене сухе листя клена, густиною 0,24 г/см<sup>3</sup>. Метою дослідження є визначення оптимального тиску пресування брикетів (твердого тіла) із осіннього листя без додавання будь-яких домішок.

В циліндричну матрицю завантажували сировину та пресували брикети з різною ступеню деформації  $\epsilon$  (рис. 7), яка дискретно змінювалася в межах від 41,9 % до 71,1 %. За фіксованими значеннями зусилля пресування  $P$  та розрахунковими значіннями густини брикетів  $\rho$  будували залежність  $\rho_\delta = f(P)$ , що наведено на рис. 8.

Як бачимо, підвищувати зусилля пресування вище 440 кН недоцільно, так як густина брикетів практично не підвищується вище 1,33 г/см<sup>3</sup>. Слід відмітити, що найбільша природна густина дерева, як показано в роботі [2, с. 536], також не перевищує 1,33 г/см<sup>3</sup>.

Далі за результатами досліджень зусилля пресування та з урахуванням площі перерізу закритої матриці (площі

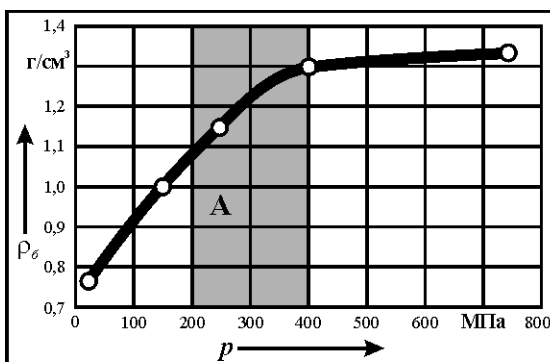
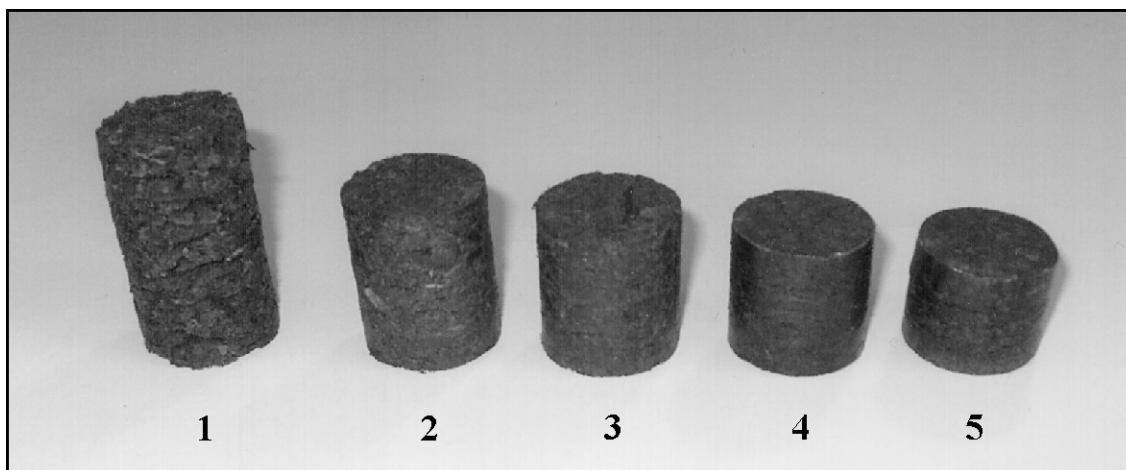


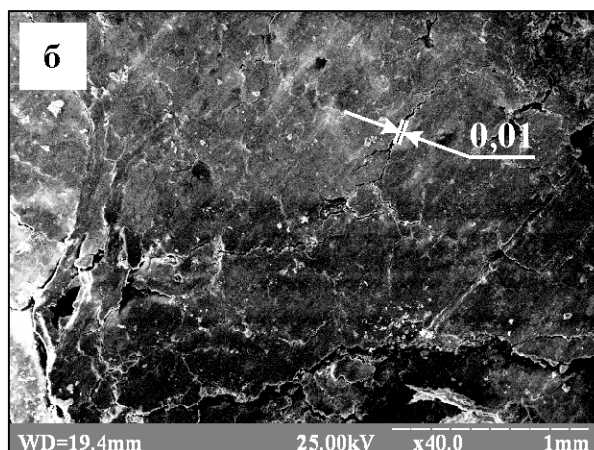
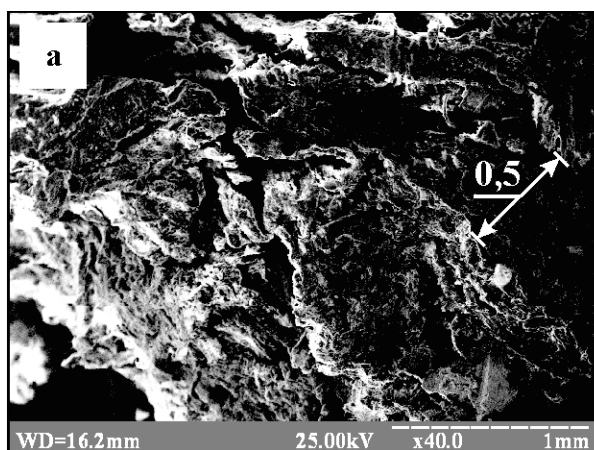
Рисунок 9 - Залежність густини брикетів із сухого здрібненого листа  $\rho_\delta$  від тиску пресування  $p$

Для визначення зони оптимальних тисків пресування брикетів із сухого здрібненого листя вивчалася структура брикетів різної густини (рис. 10) на предмет отримання достатньо міцного твердого тіла. Фрактографії їх поверхонь наведено на рис. 3.11).



1 -  $\rho_6 = 0,77 \text{ г/см}^3$ ; 2 -  $\rho_6 = 1,06 \text{ г/см}^3$ ; 3 -  $\rho_6 = 1,15 \text{ г/см}^3$ ; 4 -  $\rho_6 = 1,30 \text{ г/см}^3$ ; 5 -  $\rho_6 = 1,33 \text{ г/см}^3$

Рисунок 10 - Брикети із сухого здібленого листя різної густини



а - зразок 1,  $\rho_6 = 0,7 \text{ г/см}^3$ ; б - зразок 5,  $\rho_6 = 1,33 \text{ г/см}^3$   
Рисунок 11 - Фрактографії поверхонь брикетів різної густини із сухого здібленого листя

Як бачимо, із підвищенням густини пресування брикетів  $\rho$  ширина тріщин на поверхні зменшується у напрямку від 0,5 мм (див. зразок 1) до 0,01 мм (див. зразок 5). Крім того, зменшується і кількість тріщин. Зрозуміло, що при цьому міцність брикету збільшується. Більш того, в результаті дослідження встановлено, що достатню міцність мають брикети із листя, густина яких є не менш  $1,0 \text{ г/см}^3$ . Верхня межа густини брикетів обумовлена раціональним витрачанням енергії на їх пресування та обмежена величиною  $1,30 \text{ г/см}^3$ .

Таким чином, встановлено, що оптимальний тиск пресування брикетів (твердого тіла) із осіннього листя без додавання будь-яких домішок лежить у межах від 200 до 400 МПа (див. рис. 9, зона А) та забезпечує отримання брикетів густиною від  $1,0$  до  $1,3 \text{ г/см}^3$ .

Для випробування пеллет на горіння розроблено пристрій. На металевий стіл симетрично та радіально відносно центрального отвору

розкладаються одночасно п'ять пеллет, що попередньо отримані в дослідах 1, 2, 3, 4, 0 та зважені. Далі запалюють знизу по центру отвору спиртовий пальник 1. Тривалість горіння для усіх пеллет – однакова та складає три хвилини. Після того пальник гасять та вимірюють залишкову масу кожної пеллети.

За показники інтенсивності горіння пеллети прийнято:

- коефіцієнт зменшення маси  $\lambda_n$ , що відповідає долі (у відсотках) маси, яка втрачена під час примусового горіння протягом трьох хвилин:

$$\lambda_n = \frac{(m_{до} - m_{після}) \cdot 100}{m_{до}} = \frac{\Delta m \cdot 100}{m_{до}}, \quad (5)$$

де  $m_{до}$ ,  $m_{після}$  – маса пеллети, відповідно, до та після горіння, г;

$\Delta m$  – маса пеллети, що втрачена під час горіння, г;

- швидкість горіння  $V_n$ , що характеризує масу пеллети, яка згоріла в одиницю часу:

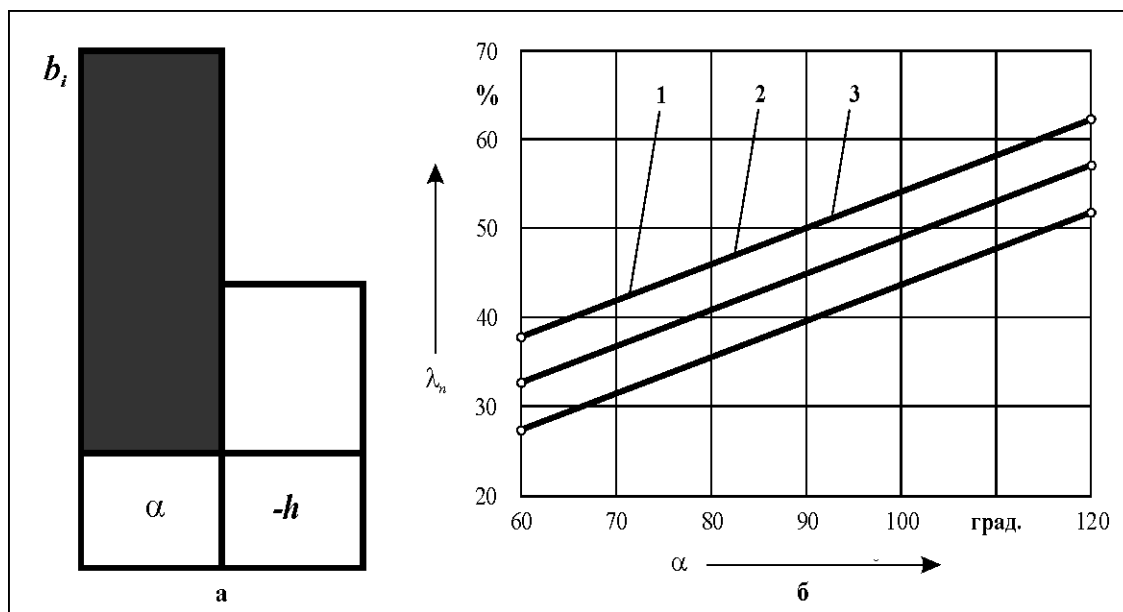
$$V_n = \frac{m_{до} - m_{після}}{t}, \quad (6)$$

де  $t$  – час горіння пеллети, хв. В експерименті  $t = 3$  хв.

Отримано математичну модель коефіцієнта зменшення маси пеллети після горіння  $\lambda_n$  ( $y_3$ ):

$$y_3 = 45,05 - 5,6x_1 + 11,85x_2. \quad (7)$$

Як бачимо (рис. 12), коефіцієнт  $\lambda_n$  залежить, головним чином, від кута матриці на вході здрібненого листа в робоче вікно  $\alpha$ , причому, із зменшенням  $\alpha$  коефіцієнт  $\lambda_n$  зменшується. Таким чином, фактор  $\alpha$  треба розглядати як головний, керуючий. Вплив довжини робочого вікна матриці для прямого видавлювання  $h$  на  $\lambda_n$  приблизно в 2 рази менший. Із підвищенням  $h$  коефіцієнт  $\lambda_n$  зменшується. В умовах експерименту коефіцієнт зменшення маси пеллети після горіння  $\lambda_n$  змінювався у межах від 28,9 до 63,8 %.



а - ступінь впливу факторів; б - графічна залежність; 1 -  $h = 35$  мм; 2 -  $h = 25$  мм; 3 -  $h = 15$  мм

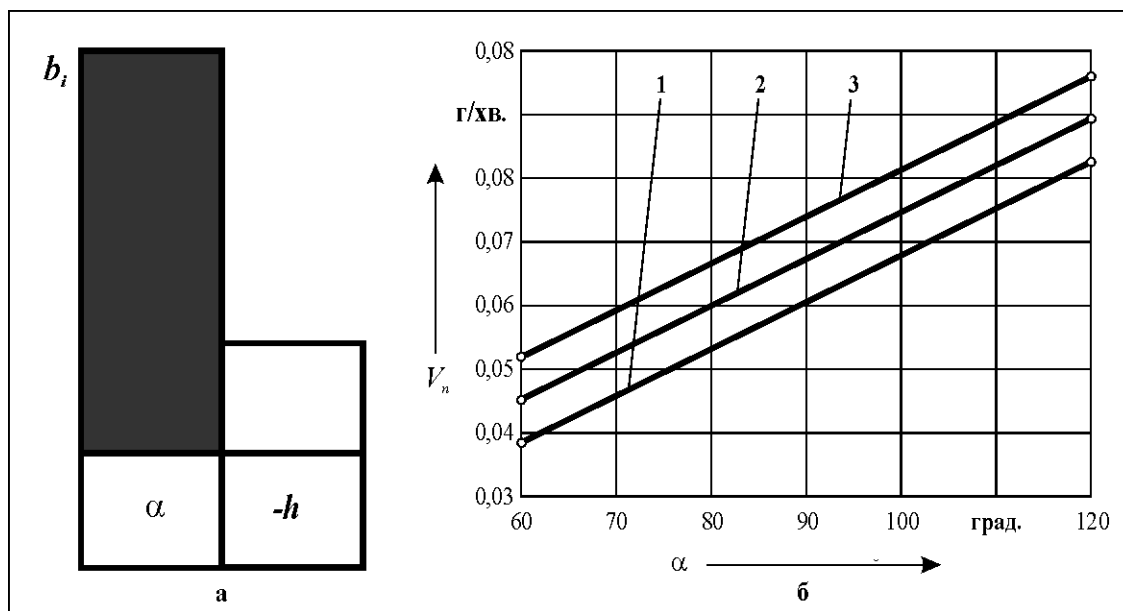
Рисунок 12 - Залежність коефіцієнта зменшення маси пеллети після горіння  $\lambda_n$  від  $\alpha$  та  $h$

Отримано математичну модель швидкості горіння пеллети  $V_n$  ( $y_4$ ):

$$y_4 = 0,068 - 0,00675x_1 + 0,02175x_2. \quad (8)$$



Із моделі (8) виходить (рис. 13), що швидкість горіння  $V_n$  залежить, головним чином, від кута матриці на вході здрібненого листа в робоче вікно  $\alpha$ , причому, із зменшенням  $\alpha$  швидкість  $V_n$  зменшується. Таким чином, фактор  $\alpha$  треба розглядати як головний, керуючий. Вплив довжини робочого вікна матриці для прямого видавлювання  $h$  на  $\lambda_n$  приблизно в 3,2 рази менший. Із підвищенням  $h$  коефіцієнт  $\lambda_n$  зменшується. В умовах експерименту швидкість горіння пеллети  $V_n$  змінювалася у межах від 0,043 до 0,1 г/хв.



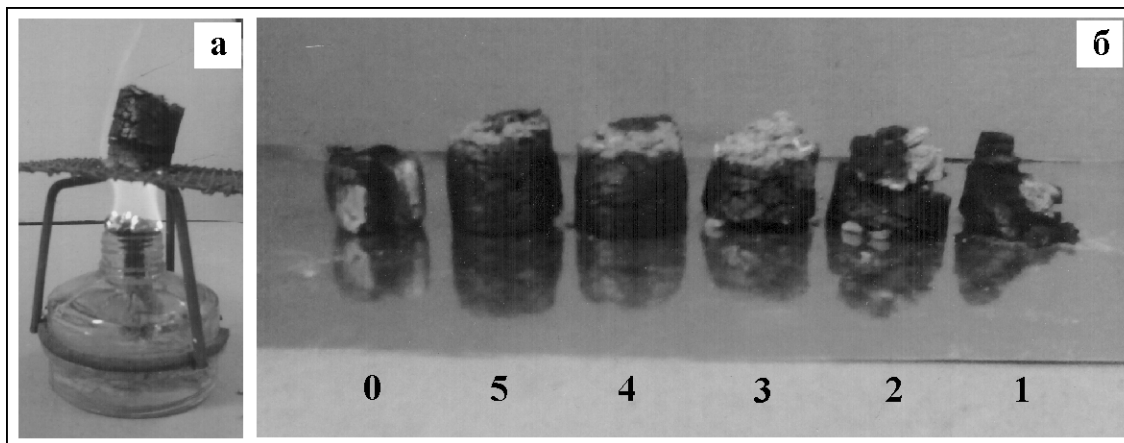
а - ступінь впливу факторів; б - графічна залежність; 1 -  $h = 35$  мм; 2 -  $h = 25$  мм; 3 -  $h = 15$  мм  
Рисунок 13 - Залежність швидкості горіння пеллети  $V_n$  від  $\alpha$  та  $h$

За результатами проведених додаткових випробувань на згорання групи сухих пеллет, густиною  $\rho_{\text{сух}} = 0,76$  г/см<sup>3</sup>, встановлено, що коефіцієнт зменшення маси пеллет після восьмихвилинного горіння  $\lambda_n$  склав 73,07 %, а швидкість горіння групи пеллет  $V_n$  була зафіксована на рівні 0,66 г/хв.

Випробування однакового об'єму і форми брикетів із осіннього листа на згорання здійснювали з використанням пристрою, що показано на рис. 14, а. Інтенсивність горіння брикетів оцінювали: за коефіцієнтом зменшення маси  $\lambda_b$ , що відповідає долі (у відсотках) маси, яка втрачена під час примусового горіння протягом восьми хвилин; за швидкістю горіння  $V_b$ , що характеризує масу брикету, яка згоріла в одиницю часу. Для порівняння інтенсивності горіння брикетів використовувався «зразок 0» із дерева «Клен». Результати випробування зведено в таблицю 2.

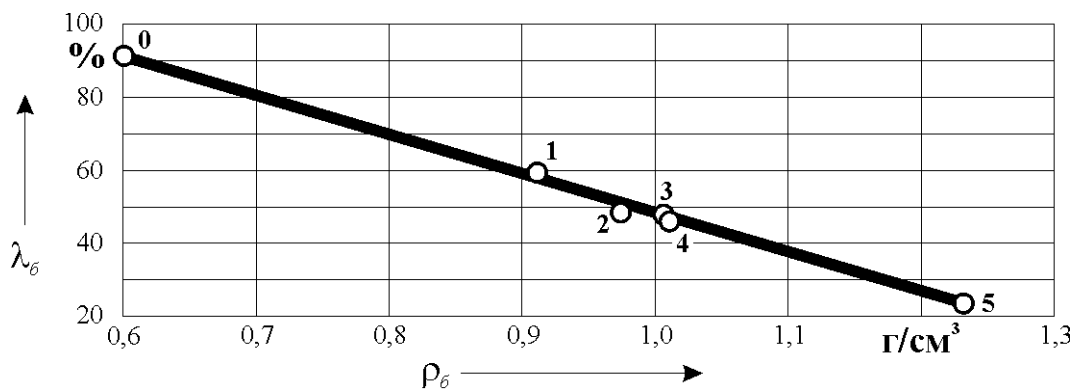
Таблиця 2 - Результати випробування сухих брикетів із осіннього листа на згорання

Показники	Зразок 0 із дерева	Брикет				
		Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5
$\rho_{\text{сух}}$ , г/см <sup>3</sup>	0,6	0,92	0,97	1,01	1,07	1,23
$\lambda_b$ , %	91,2	59,5	49,0	48,4	47,8	23,0
$V_b$ , г/хв.	1,1	0,8	0,71	0,65	0,61	0,38



а - пристрій; б - брикети після згорання (0 - зразок із дерева; 1...5 - зразки брикетів із листя)  
Рисунок 14 - Випробування брикетів із осіннього листя на згорання

Як бачимо із таблиці 2, із підвищенням густини брикету  $\rho_b$  показники інтенсивності горіння  $\lambda_b$  та  $V_b$  знижуються. Останнє підтверджується лінійною графічною залежністю коефіцієнта зменшення маси брикету із листя  $\lambda_b$  від  $\rho_b$ , що наведена на рис. 15.



0 - зразок із дерева; 1...5 - зразки брикетів із листя  
Рисунок 15 – Залежність коефіцієнта зменшення маси брикету  $\lambda_b$  від густини брикету  $\rho_b$

Показано, що брикети з густиною 1,23 г/см<sup>3</sup> горять в 3 рази довше, порівняно з зразком із дерева «Клен». Отже, брикети із листя за інтенсивністю горіння можна порівнювати з м'яким вугіллям.

**Висновок.** В результаті виконання роботи:

- удосконалено технологію пресування брикетів із осіннього листя за рахунок розробки маловитратної технології їх пресування без додавання сторонніх речовин, зокрема воску;
- вперше запропоновано, досліджено та розроблено технологію прямого видавлювання пеллет із осіннього листя.

### Список літератури

1. Газета «Бизнес» №38 (817), 22 сентября 2008 года
2. Гофман Ю. В. Законы, формулы, задачи физики. Справочник / Юрий Владимирович Гофман. – К.: Наукова думка, 1977. – 576 с.

**V. Bokov, M. Popova, R. Lysenko**

*Kirovograd National Technical University*

### **Usage of autumn leaves for production of alternative types of fuel**

The objective of the work is the elaboration of low-cost technology of making firewood (briquettes and pellets) of fallen leaves without adding other material, particularly wax.

The article presents the results of experimental research of the process of production of firewood using fallen leaves, which include the following stages:

- for producing pellets: collection of leaves; grinding leaves; pressing-out pellets and modeling the process; test on burning of some pellets and modeling the process; test on burning of the group of pellets;
- for briquettes: collection of leaves; grinding leaves; pressing briquettes and determination of effort of deformation; test on burning of some briquettes.

Conclusion:

- the technology of pressing briquettes of autumn leaves was improved due to the development of low-cost technology of pressing without adding other material, particularly wax, which allows to lower the price in 90...100 times;
- the technology of direct pressing-out of pellets of autumn leaves was suggested, studied and developed for the first time.

**autumn leaves, pellets, briquettes, direct pressing-out, pressing**

Одержано 16.04.13

**УДК 681.5**

**О.В. Козлов, асп.**

*Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова*

## **Автоматизація процесів керування технологічним комплексом екопірогенезису**

В статті наведені результати аналізу основних задач керування технологічним процесом екопірогенезису (ЕПГ), на основі якого проведений синтез функціональної структури та селективних технологічних параметрів (як керованих координат) ієрархічної комп'ютеризованої системи автоматичного керування (ІКСАК) комплексу ЕПГ. Застосування ІКСАК з запропонованою функціональною структурою дає змогу значно підвищити точність керування основними технологічними параметрами, ефективність роботи та економічні показники комплексу ЕПГ.

**екопірогенезис, система автоматичного керування, технологічний комплекс**

**А.В. Козлов**

*Національный университет кораблестроения им. адм. Макарова*

**Задачи и структурная организация системы управления технологическим комплексом экопирогенезиса**

В статье приведены результаты анализа основных задач управления технологическим процессом экопирогенезиса (ЭПГ), на основе которого проведен синтез функциональной структуры и селективных технологических параметров как управляемых координат иерархической компьютеризированной системы автоматического управления (ИКСАУ) комплекса ЭПГ. Применение ИКСАУ с предложенной функциональной структурой позволяет значительно повысить точность управления основными технологическими параметрами, эффективность работы и экономические показатели комплекса ЭПГ.

**экопирогенезис, система автоматического управления, технологический комплекс**