

2. Гелетуха Г. Г. Сучасний стан та перспективирозвиткубіоенергетики в Україні / Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. // Пром. теплотехніка. – 2010. – № 3. – С. 73-79.
3. Клюс С.В. Оценка и прогноз потенциала твердого биотопливаУкраины / С.В. Клюс, Г.Н. Забарный // Компрессорное и энергетическоемашиностроение. – 2011. –№2 (24). – С. 8-13.
4. Корінчук Д.М. Розробка композиційного палива на основі торфу і рослинної біомаси [Текст]:автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.14.06/ Корінчук Дмитро Миколайович. – К., 2010. – 20 с.
5. Атаманюк В.М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. – Дисертація доктора. техн. наук. Львів; 2007.
6. Мосюк М.І. Фільтраційне сушіння “енергетичної” верби / М.І. Мосюк, В.М. Атаманюк, Д.П. Кіндзера // III міжнародний молодіжний фестиваль наук. “Хімія та хімічні технології”. Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених (ССТ – 2011). Україна. Львів. – 2011, – С. 204 – 205.
7. Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Госовський Р.Р. Розрахунок коефіцієнта гідравлічного опору під час руху теплового агента крізь стаціонарний шар подрібнених стебел соящика. Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.9. с.112-118.
8. Нафтопродукты. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. ГОСТ 21261-91.Начало действия: 01.07.1992. –М. :Разработан и внесен Министерством энергетики и электрофикации СССР: МТК 75.080, ОКСТУ 0209, 49 с.
9. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352с.
10. Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М., Михайлик В.А. Композиційні палива на основі торфу і рослинної біомаси. Монографія. – Київ, 2012. –211 с.

УДК 662.62;662.71/.74

## АНАЛІЗ ЕНЕРГОВИТРАТ СТАДІЇ ТЕРМОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

Снежкін Ю.Ф., д-р. техн. наук, чл.-кор. НАНУ, Корінчук Д.М., канд. техн. наук,  
Безгін М.М., аспірант, Степчук І.В., магістрант  
Національна академія наук України «Інститут технічної теплофізики», м.Київ

*Основні енерговитрати в лінії виробництва твердого біопалива: сушіння ≈ 70% та пресування ≈ 17%. Проведення термовологісної обробки біомаси є достатньою для реалізації процесу брикетування грануло утворення при низьких тисках. Проведені дослідження впливу дисперсності біомаси на енерговитрати процесу термовологісної обробки біомаси. Отримані залежності енерговитрат на процес термовологісної обробки можуть бути використані на стадії вибору парогенератора, автоматизації режиму пропарювання та оптимізації схеми термовологісної обробки біомаси.*

*The energy consumption in the production line of solid biofuels consists of drying ≈ 70% and pressing ≈ 17%. Holding the wet thermal processing of biomass is sufficient to perform the pressing process at low pressures. The energy effect by disperse composition of biomass at wet thermal treatment process of biomass was researched. The dependences of energy consumption in the wet thermal treatment process may be used in selecting the steam generator, automation of the steam process and optimization the line of wet thermal treatment process of biomass.*

Ключові слова: енергоефективність, біопаливо, технологічні лінії, брикетування, термовологісна обробка, парогенератор, відновлювані джерела енергії.

Зростання дефіциту традиційних джерел енергії за останні роки в усьому світі постійно підсилює інтерес до пошуку шляхів зниження енерговитрат технологічних процесів з одночасним підвищенням якості продуктів. Використання альтернативних джерел енергії дозволяє зменшити енергетичну залежність підприємств, але потребує суттєвих інвестицій в переобладнанні теплогенеруючих комплексів. Найбільш доступним з усіх альтернативних джерел є енергія біомаси. Розвиток технологій переробки біомаси в паливо за останні роки набуває значних масштабів [1].

При виробництві твердого біопалива близько 70 % енергії витрачається на випаровування вологи [1], 17% на пресування, і 4 % на подрібнення. Як видно основні витрати ідуть на процес сушіння. Але енер-

гетичні витрати на пресування є також досить високими. Значно зменшити їх можливо за рахунок зменшення необхідного тиску пресування, який в залежності від технології становить 60-120 МПа. Одночасно зменшиться металоємність конструкції і збільшиться термін експлуатації пресового обладнання. Для реалізації процесу брикетування та гранулоутворення при низьких тисках достатньо перед пресуванням провести термовологісну обробку (ТВО) біомаси. Це дозволяє зменшити опір деформації біомаси та активувати лігнін [4], який виконує функції зв'язуючого. В результаті ТВО біомаси тиск пресування можна зменшити до 10-20 МПа. Метод виділення лігніну шляхом ТВО включає пропарювання деревини насиченою парюю при температурах 120-150°C [4]. Кількість лігніну, що виділиться в результаті процесу є не великою, проте достатньою для того щоб при пресуванні отримати більш щільний та стійкий до механічного впливу брикет. Технологія виготовлення твердого біопалива, запропонована авторами [3], включає стадію ТВО після стадій подрібнення та сушіння у виробництві твердого біопалива. Це дає змогу зменшити тиск пресування, а відповідно і енергозатрати на стадії пресування та підвищити міцність та стійкість готового продукту на виході. В технологічних лініях виробництва твердого біопалива стадія подрібнення біомаси стоїть перед стадією сушіння [3]. Дисперсний склад біомаси після подрібнення суттєво неоднорідний і залежить від багатьох факторів, в тому числі вологості біомаси та стадійності процесу подрібнення. Але саме дисперсний склад визначає основні режимні параметри стадії ТВО та впливає на вибір парогенеруючого обладнання.

**Метою статті** є визначення впливу дисперсності біомаси на енерговитрати процесу термовологісної обробки сировини перед пресуванням у виробництві біопалива.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити дисперсний склад біомаси перед пресуванням;
- дослідити інтенсивність поглинання вологи окремими фракціями біомаси;
- обґрунтувати залежності енерговитрат стадії ТВО від дисперсного складу біомаси.

Було проведено дослідження фракційного складу біомаси після стадії сушіння. За дисперсністю фракції в загальному об'ємі деревної тріски поділяються на фракції: меншого дисперсного складу: від 5 мм до 7 мм та від 2,5 мм до 5 мм, які займають відповідно 24 % та 30 % в загальному об'ємі біомаси та фракції більшого дисперсного складу від 10 мм та від 7 мм до 10 мм – 17 % та 12 % відповідно.

Термовологісна обробка біомаси проводилась окремо для кожної фракції при температурі 120°C та протягом 45 хв. Як видно з (рис.1) для фракцій 2,5 мм, 5 мм, 7 мм, 10 мм характерна схожа кінетика насичення вологою. Протягом зазначеного періоду вологість фракцій дисперсного складу 7-10 мм зростає до 30-35 %, за той же час вологість фракцій дисперсного складу 2,5 – 2,5 мм не перевищує 20 %.

На процес насичення вологою біомаси впливає величина поверхні контакту біомаса-парова фаза, яка визначається поверхнею окремих часток та об'ємом порожнин між частинками. Відповідно при пропарюванні в промислових умовах спосіб завантаження біомаси в ємність для пропарювання та рівномірне розподілення підводу водяної пари по об'єму буде суттєво впливати на ефективність термовологісної обробки.

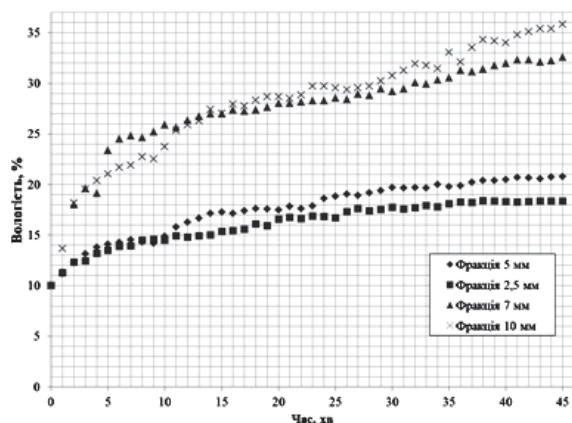


Рис. 1 – Зміна вологості деревини від часу пропарювання

Оптимальна вологість деревини після стадії сушіння коливається в межах 8-10 %. Найкраще пресується сировина з вмістом вологи 10-30 %. При вологості менше 10 % процес брикетування ускладнюється та протікає з використанням великих тисків. При вологості більше 25-30 % якість брикету після процесу пресування погіршується. Для отримання міцного та якісного продукту, процес термовологісної обробки потрібно проводити до досягання деревинною вологості не більше 25-30 %. З рис.1 видно, що час пропарювання фракцій 10 мм та 7 мм до вологості 25-30 % коливається в межах 20-30 хв. Після 25-30 хв частки деревини продовжують набирати вологу, що зумовлено розмірами фракційного складу, більшою величиною поверхні контакту біомаса-парова фаза [5]. Фракції 5 мм та 2,5 мм за 15-25 хв набирають вологу до 15-19 % із середньою швидкістю  $5,05 \cdot 10^{-5}$  кг/с. Після 25 хв інтенсивність процесу поглинання спадає до середньої швидкості  $4,58 \cdot 10^{-5}$  кг/с. Зменшення швидкості в 1,1 рази після 25 хв для фракцій 2,5 мм та 5 мм показує, що дані фракції швидше досягають стану насичення, а отже мають малу в порівнянні з 7 мм та 10 мм

поверхню окремих часток деревини. Для забезпечення якості та міцності брикету процес термовологісної обробки для всіх фракцій достатньо проводити до 20–25 хв.

Площа контакту частинок з паровою фазою залежить від площі поверхні окремої частинки заданої фракції і пов'язана з розміром частинки. Відповідно розмір фракції безпосередньо впливає на інтенсивність процесу. Для визначення об'ємної паропоглинаючої здатності необхідно знати площу поверхні часток в одиниці об'єму біомаси. Площа поверхні часток в 1 кг біомаси розраховується за наступною формулою:

$$F_i = N_i \cdot a_i \cdot b_i \cdot h_i,$$

де  $a_i \cdot b_i \cdot h_i$  – усереднені лінійні розміри окремої частки, відповідно довжина, ширина і висота, м;  $i$  – фракція біомаси,  $i = 10\text{мм}; 7\text{мм}; 5\text{мм}; 2,5\text{мм}$ . В таблиці 1 приведені площі поверхні часток та їх кількість в 1 кг біомаси при різних фракціях та вказана насипна густина кожної фракції.

В виробничих умовах потоки сировини визначаються масовими витратами, тому доцільно знайти залежність між площею поверхні часток та масою яку вони мають. Площа поверхні часток залежить від маси матеріалу, та має вигляд:

$$F_i = A_i \cdot m_i, \tag{1}$$

де  $F_i$  – площа  $i$ -тої фракції в 1 кг,  $m^2$ ;  $m_i$  – маса сировини  $i$ -тої фракції, кг;  $A_i$  – коефіцієнт пропорційності який пов'язує масу часток деревини заданої фракції та площу їх поверхні,  $m^2/\text{кг}$ .

Таблиця 1 – Характеристики фракцій

Фракція	0,0025	0,005	0,007	0,01
Середня площа 1 шт, $m^2$	0,00007509	0,00015088	0,00030382	0,0004419
Насипна густина, $\text{кг}/m^3$	98,675	75,79	41,84	33,741
Кількість часток деревини, шт./кг	142857	55556	41667	38462
Площа поверхні, $m^2/\text{кг}$	10,7	8,4	12,7	17

Коефіцієнт  $A_i$  отримуємо за наступною формулою:

$$A_i = \frac{F_i}{m_i}, \tag{2}$$

Для кожної фракції розраховано коефіцієнт  $A_i$  на основі табл.1. Результати розрахунків представлено в таблиці 2. З таблиць 1 та 2 видно, що найменшу площу поверхні часток має фракція 5мм, яка становить  $8,4 m^2$ .

Процес термовологісної обробки є процесом насичення вологою біомаси на який впливає величина поверхні окремих часток різних фракцій. Насичення вологою деревини протікає зі зміною її маси у часі. Величина поверхні окремих часток різних фракцій, зміна її маси та час є характеристиками процесу. Для виводу подальших залежностей вводимо узагальнюючий коефіцієнт для всіх характеристик, який є залежністю зміни маси, площі та часу :

$$k_{W_i} = f(\Delta M, F, \tau).$$

Тобто коефіцієнт поглинання вологи, що є залежністю кількості поглинутої вологи біомасою через одиницю площі поверхні частинок деревини різних фракцій за проміжок часу має вигляд (рис.2):

$$k_{W_i} = \frac{\Delta M}{F_i \tau} = \frac{m_i - m_{сух}}{F_i \tau}, \tag{3}$$

де  $m_i$  – маса фракції  $i$ -тої фракції, що набрала вологу ( $i = 2,5\text{мм}, 5\text{мм}, 7\text{мм}, 10\text{мм}$ );  $m_{сух}$  – маса сухої фракції;  $F_i$  – площа поверхні  $i$ -тої фракції,  $m^2$ ;  $\tau$  – час пропарювання в даний момент ( $\tau = 1 \dots 45\text{хв}$ ).

В загальному об'ємі деревної тріски фракція меншого дисперсного складу від 5мм до 7 мм займає 24% і найбільш часто зустрічається у технології виробництва твердого біопалива.

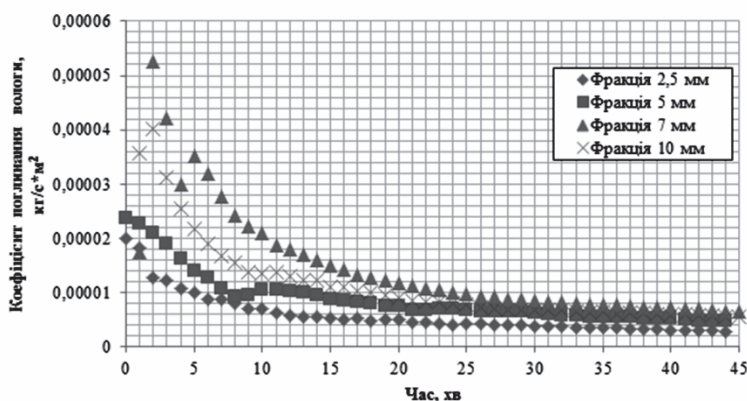


Рис. 2 – Залежність коефіцієнтів  $k_{W_i}$  від часу пропарювання

За результатами досліджень (рис.2) отримана залежність зміни коефіцієнту поглинання вологи в часі для фракції 5 мм,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ :

$$k_{W_5} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^{-0,449}, \quad (4)$$

Орієнтуючись на характеристики фракції 5мм, що найбільш часто зустрічається в об'ємі біомаси, вводимо коефіцієнт  $B_i$ , що характеризує співвідношення коефіцієнтів  $k_{W_i}$  кожної фракції до  $k_{W_5}$  фракції 5 мм:

$$B_i = \frac{k_{W_i}}{k_{W_5}}, \quad (5)$$

де  $k_{W_i}$  – коефіцієнт поглинання вологи для  $i$ -тої фракції в даний момент часу,  $i=10\text{мм}; 7\text{мм}; 5\text{мм}; 2,5\text{мм}$ .

Отримані залежності  $B_i$  для кожної фракції представлені на рисунку 3, з якого видно, що залежності мають лінійну спадаючу форму тому були виведені формули цих коефіцієнтів та подані в табл. 2.

Перемноживши (4) та (5) отримуємо  $k_{W_i}$  для кожної фракції:

$$k_{W_i} = B_i \cdot k_{W_5}. \quad (6)$$

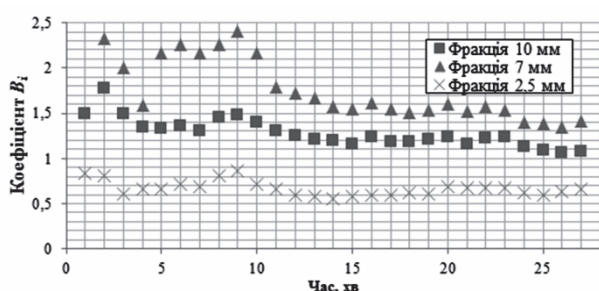


Рис. 3 – Залежність коефіцієнтів  $B_i$  від часу пропарювання

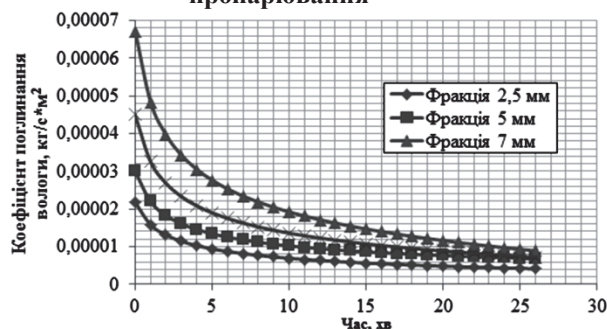


Рис. 4 – Уточнені коефіцієнти  $k_{W_i}$

Отримані уточнені коефіцієнти поглинання вологи  $k_{W_i}$  з урахуванням виведених залежностей  $B_i$  для кожної фракції показані на рис. 4.

Основні режимні параметри стадії ТВО визначаються дисперсним складом біомаси, що впливає на вибір обладнання для генерування пари. Кількість пари, що потрібна на процес пропарювання деревини, залежить від площі поверхні окремої частинки заданої фракції, як площі поверхні контакту біомаса-парова фаза та теплоти пароутворення. Відповідно розмір фракції безпосередньо впливає на інтенсивність процесу генерування пари. Парогенеруюче обладнання можливе для використання у процесі ТВО поділяється на обладнання, що працює на твердому паливі(відходах виробництва твердого біопалива, в даному випадку фракція менше 2,5мм) або від електромережі. Основною характеристикою даного обладнання є номінальна потужність. Вона залежить від енерговитрат, що йдуть на генерування пари для процесу ТВО та залежать від вище зазначених параметрів:

$$Q = f(r, F, \Delta M, \tau),$$

В загальному вигляді енерговитрати на процес ТВО є добутком всіх вище представлених величин:

$$Q_i = k_{W_i} \cdot F_i \cdot r, \quad (7)$$

Підставляючи (1) та (6) в вираз(7) отримуємо:

$$Q_i = B_i \cdot k_{W_5} \cdot A_i \cdot r \cdot m_i, \quad (8)$$

де  $B_i, k_{W_5}, A_i$  – коефіцієнти, що залежать від часу;  $r$  – питома теплота пароутворення за температури процесу пропарювання ( в даному випадку  $t = 120^\circ\text{C}$ ),  $\text{кДж/кг}$ ,  $r = 2201,59 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  [1]. В формулі (8) :

$$B_i, k_{W_5}, A_i = f(\tau).$$

Оскільки всі коефіцієнти є функціями від часу, вводимо коефіцієнт, що включає виведені раніше коефіцієнти і є функцією від часу (рис.5):

$$C_i = B_i \cdot k_{W_5} \cdot A_i, \quad (9)$$



Як видно з рис. 5 коефіцієнт  $C_i$  можна усереднити за фракціями більшого дисперсного складу 10мм та 7мм та меншого дисперсного складу: 5мм та 2,5мм. За результатами досліджень (рис.5) отриманий усереднений коефіцієнт  $C_i$ , залежність якого подана в табл. 2.

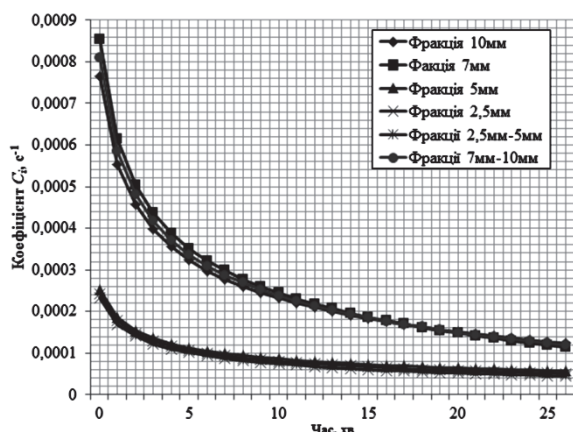


Рис. 5 – Залежність коефіцієнтів  $C_i$  від часу пропарювання

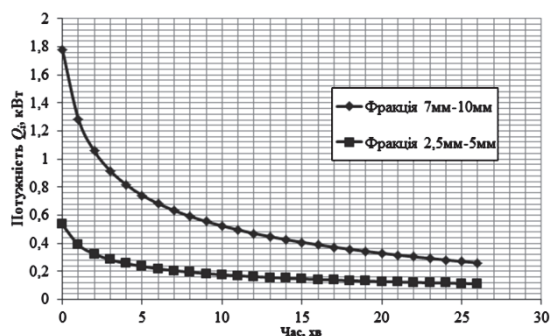


Рис. 6 – Залежність енерговитрат на процес пропарювання від часу пропарювання

Таблиця 2 – Отримані коефіцієнти

Коефіцієнт $A_i, \text{м}^2/\text{кг}$	Коефіцієнт $B_i$	Коефіцієнт $C_i, 1/с$
$A_{10} = 17,$ $A_7 = 12,7,$ $A_5 = 8,4,$ $A_{2,5} = 10,7.$	$B_{10} = -0,0168 \cdot \tau + 1,5162,$ $B_7 = -0,0359 \cdot \tau + 2,2769,$ $B_5 = 1,$ $B_{10} = -0,0046 \cdot \tau + 0,7298.$	$C_{7-10} = 0,0009 \cdot \tau^{-0,5993},$ $C_{2,5-5} = 0,0002 \cdot \tau^{-0,477}.$

З урахуванням отриманого коефіцієнту  $C_i$  загальна формула енерговитрат на процес ТВО для 1 кг біомаси має вигляд:

$$Q_i = C_i \cdot r \cdot m_i. \quad (10)$$

Вирази енерговитрат на процес ТВО для 1 кг біомаси фракцій більшого та меншого дисперсного складу:

$$Q_{7-10} = C_{7-10} \cdot r \cdot m_i = 0,0009 \cdot \tau^{-0,5993} \cdot r \cdot m_i, \quad (11)$$

$$Q_{2,5-5} = C_{2,5-5} \cdot r \cdot m_i = 0,0002 \cdot \tau^{-0,477} \cdot r \cdot m_i.$$

На рисунку 6 представлені теоретично розраховані криві залежності енерговитрат на процес пропарювання для різних фракцій.

Вираз (10) отриманий для розрахунку енерговитрат на процес пропарювання при різних фракціях на 1 кг біомаси. Отримані криві залежностей мають не лінійний характер та відрізняються швидкостями спадання. З рис. 5 видно, що отримана залежність для менших фракцій (2,5мм-5мм) має дві ділянки спадання за часом. Від 0 до 5хв залежність спадає зі середньою швидкістю  $\frac{dQ}{d\tau} = 0,0011 \frac{\text{кВт}}{\text{с}}$ . На другій ділянці від 5 і до 27хв - має майже лінійний характер та швидкість становить  $\frac{dQ}{d\tau} = 9,09 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кВт}}{\text{с}}$ . Залежність енерговитрат на процес пропарювання в той же час для більших фракцій (7мм-10мм) поділяється на три ділянки інтенсивності спадання енерговитрат. Перша ділянка від 0 до 3 хв із середньою швидкістю спадання  $\frac{dQ}{d\tau} = 0,0048 \frac{\text{кВт}}{\text{с}}$ , друга від 3 до 10хв  $\frac{dQ}{d\tau} = 9,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кВт}}{\text{с}}$  та третя від 10 до 27хв із середньою швидкістю  $\frac{dQ}{d\tau} = 1,77 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кВт}}{\text{с}}$ . В той же час кількість затраченої енергії на пропарювання 1кг біомаси за годину для більших фракцій - 37,24 кВт/год, для менших – 9,44 кВт/год, що в 4 рази менше від енергозатрат на пропарювання більших фракцій. Проводячи аналіз отриманих даних середніх швидкостей спадання і енергозатрат на пропарювання 1 кг біомаси було виявлено, що при пропарюванні більших фракцій (7мм-10мм) доцільно для зменшення енерговитрат використовувати парогенератор з пристроєм для регулювання потужності або комбінацію з двох парогенераторів, як можливий варіант: електричного та парогенератора на твердому паливі. Для фракцій (2,5мм-5мм) можна використовувати один парогенератор, що задовольняє потужність на ділянці від 5 до 27хв при цьому час пропарювання до 5хв збільшується

ся не суттєво. Даний парогенератор дозволяє зменшити енергозатрати в 4 рази в порівнянні з більшими фракціями та є більш дешевим обладнанням, оскільки не має пристрою для регулювання потужності. В умовах багатотоннажного виробництва визначення найбільш вагомої фракції у масовому співвідношенні пропонується робити методом ситового аналізу. За рахунок цього методу визначається вагова фракція з фракцій 10мм, 7мм, 5мм, 2,5мм. Ця фракція приймається як основна для розрахунків в подальшому.

#### Висновки:

1. Вологість фракцій дисперсного складу 7-10мм зростає до 30-35 % за 45 хв процесу пропарювання, за той же час вологість фракцій дисперсного складу 2,5- 2,5мм не перевищує 20 %. Для отримання міцного та якісного продукту, процес термовологісної обробки потрібно проводити до досягання деревинною вологістю не більше 25-30 % тому що час пропарювання фракцій 10мм та 7мм до вологості 25-30% коливається в межах 20-30 хв, а фракції 5мм та 2,5мм за 15-25хв набирають вологу до 15-19 % із середньою швидкістю  $5,05 \cdot 10^{-5}$  кг/с. Після 25хв інтенсивність процесу поглинання спадає до середньої швидкості  $4,58 \cdot 10^{-5}$  кг/с. Зменшення швидкості в 1,1 рази після 25 хв для фракцій 2,5мм та 5мм показує що дані фракції мають малу в порівнянні з 7мм та 10мм поверхню окремих часток деревини тому швидше досягають стану насичення. Для забезпечення якості та міцності брикету процес термовологісної обробки для всіх фракцій достатньо проводити до 20-25 хв.

2. Енерговитрати на процес пропарювання при різних фракціях на 1 кг біомаси можуть бути розраховані за залежностями (11).

3. Отримані залежності можуть бути використанні на стадії вибору парогенератора, автоматизації режиму пропарювання та оптимізації схеми термовологісної обробки біомаси.

#### Література

1. Енергетичний аналіз технологій виробництва твердого біопалива./ Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М., Безгін М.М., Степчук І.В./ XV Міжнародна наукова конференція " Удосконалення процесів обладнання харчових та хімічних виробництв" (8-12 вересня 2014 року): Одеса. – ОНАХТ,2014р.
2. Оптимизация процесса прессования кормов в гранулы и брикеты по критерию энергетических затрат/И.Я. Федоренко, В.В. Садов/УДК 631.363.28/ Технологии и средства механизации сельского хозяйства/Вестник АГАУ №2(112), 2014.
3. Звіт НДР / Розробка технологічної лінії виготовлення композиційного палива на основі торфу/ Д.М. Корінчук, М.М. Безгін, І.В. Степчук та ін./ УДК 662.73.-№ держреєстрації 0113U004555.
4. Древесина(химия,ультраструктура,реакции): Пер.с англ./Д. Фенгел, Г. Вегенер; Предисл. А. А. Леонтовича// Под ред.д-ра техн. наук проф. А. А. ЛеонтовичаМ.:Лесная пром-сть,1988.512с.ISBN57120-00806.
5. ГОСТ 16588-91/ Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности.
6. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии/К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков-10-е изд., перераб. и доп.-Л.: Химия, 1987.-576с.