

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАШИН ДЛЯ БРИКЕТУВАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У ВІДКРИТОМУ КАНАЛІ

В. Чучман, аспірант

Львівський національний аграрний університет

Постановка проблеми. В Україні та світі досить актуальним стало питання заміни традиційних, викопних видів палива на альтернативні. Це зумовлено насамперед вичерпністю ресурсів традиційних енергоносіїв, а також необхідністю збереження довкілля [8].

Розвиток біоенергетики є дуже актуальним для України з її значним потенціалом біомаси, основною складовою якого є солома. Кількість доступної для отримання енергії з цього виду сировини становить близько 24 млн т у.п./рік, зокрема із соломи 5 млн т у.п./рік. Відходи біомаси можуть забезпечити понад 10 % загальної потреби України в первинній енергії. Серед альтернативних джерел енергії важливе місце займає тверде біопаливо, зокрема солома сільськогосподарських культур [8].

Під час вирощування ріпаку врожайність соломи складає 6 - 10 т/га, враховуючи те, що незернова частина врожаю недостатньо використовується, тому досить актуальним стає питання застосування соломи як енергетичної сировини. Для України технічний та економічний потенціал використання соломи ріпаку в якості палива становить 2,06 млн т у.п. в рік [8].

Ефективне використання соломи в енергетичних цілях можливе лише за умови її компактного застосування в модифікованому виді [1, 6, 9]. Одним зі способів модифікації соломи як палива є брикетування. Унаслідок брикетування щільність матеріалу підвищується з 40-60 кг/м³ до 800 кг/м³ і більше. Однак для досягнення кінцевої щільності відповідно до вимог стандартів [3] необхідно створити значне зусилля, що у свою чергу призводить до енергозатрат [7]. Тому дослідження механіко-технологічних властивостей рослинних матеріалів, з метою вивчення процесу брикетування, а також аналітичне обґрунтування зміни якісних параметрів щільності є актуальною задачею, розв'язання якої допоможе вивчити способи зниження енергозатрат під час виробництва паливних брикетів та підвищити енергоефективність використання соломи як палива в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Донині питанням визначення реологічних властивостей рослинних матеріалів займалися як вітчизняні, так і зарубіжні вчені. Зокрема, у працях Долгова [4; 10], пропонується реологічна модель Максвелла, яка описує поведінку сіно-соломистих матеріалів під час стиску. Однак ця модель не характеризує даний процес у повному обсязі, оскільки, на нашу думку, після зняття навантаження модель повернеться у попередній стан [2]. А також процес стиску описується досить складними рівняннями, що містять значну кількість емпіричних коефіцієнтів, які досить складно визначити [10].

У працях канадських учених С. Мані, Л. Дж. Табіла [6] наведені залежності тиску відносно щільності, однак не подано аналітичних рівнянь, що характеризують процес пресування.

Виявлені багатьма авторами [4-6;10] закономірності стиску рослинних матеріалів описують залежності щільності, яка є основним стандартизованим параметром якості брикетів [3], а також явище релаксації спресованого матеріалу за рахунок пружних властивостей. Однак це явище описується емпіричними залежностями зі значною кількістю коефіцієнтів, які досить складно визначити. Як відомо, процес брикетування характеризується переходом пружних деформацій у пластичні, на даний момент відсутні теорії, які б аналітично розкривали якісні зміни щільності рослинних матеріалів, за рахунок переходу пружних деформацій у пластичні.

Постановка завдання. Наше завдання отримати математичну модель зміни щільності рослинних матеріалів під час стиску з урахуванням переходу пружних деформацій у пластичні, а також на підставі запропонованої моделі отримати окремі параметри пресувального каналу.

Виклад основного матеріалу. Для якісного аналізу процесу деформації стиску рослинних матеріалів можна застосувати аналогії з механічних систем. Оскільки в даному випадку проявляються пружні властивості матеріалу, які внаслідок стискання переходять у пластичні, то це дозволяє нам представити рослинний матеріал у вигляді моделі квазіпружини (рис. 1). У ній соломистий матеріал зображений у вигляді умовної пружини, яка описує пружні властивості матеріалу, а пластичні характеризуються зламуванням витків. Таким чином модель стиску матеріалу описує перехід від пружних деформацій до пластичних.

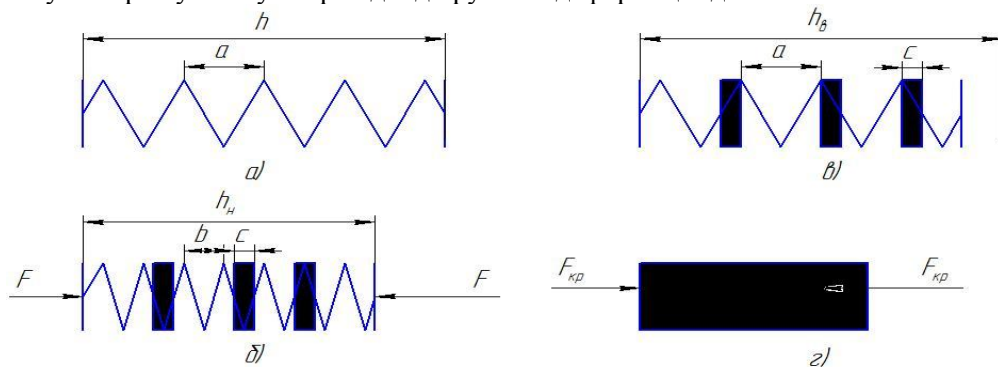


Рис. 1. Схеми можливих станів моделі зміни механіко-технологічних властивостей рослинних матеріалів.

Поетапно розглянемо процес стискання матеріалу. На початковому етапі зобразимо матеріал у вигляді умовної пружини, з висотою витка a (див. рис 1, а). Тоді загальна висота умовної пружини становитиме:

$$h = n \cdot a, \quad (1)$$

де n – загальна кількість витків; a – висота витка умовної пружини у вільному стані.

Припустимо, що прикладено зусилля F , а також забезпечено витримку в стиснутому стані впродовж часу τ , тоді витки стиснуться і крок між ними зменшиться до величини b , а деякі з них зламаються. Таким чином, ми характеризуємо пластичний стан матеріалу (див. рис. 1, б).

Загальну висоту умовної пружини під навантаженням можна визначити з такого співвідношення:

$$h_n = kc + (n - k)b, \quad (2)$$

де n – загальна кількість витків; k – кількість витків, що зламалися; c – висота зламаного витка; b – висота стиснутого витка.

На наступному етапі після зняття прикладеного зусилля F стиснуті витки, крок між якими b , внаслідок пружних властивостей повернуться у попередній стан і висота витка становитиме a , а та частина витків умовної пружини, що зламалися, залишиться в такому ж стані, з висотою витка c див. (рис. 1, в). Отже, загальна висота умовної пружини становитиме:

$$h_b = kc + (n - k)a. \quad (3)$$

Якщо зусилля F досягне критичного значення, то можна припустити, що всі витки умовної пружини зламаються і, таким чином, усі деформації матеріалу з пружних перейдуть у пластичні, а висота стиснутих витків в цьому стані прямує до висоти зламаних $b(F_{кр}) \rightarrow c$. Тому висота даної умовної пружини становитиме:

$$h_{кр} = n \cdot c. \quad (4)$$

Таким чином, ми можемо описати стан матеріалу після брикетування такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} h_n = kc + (n - k)b; \\ h_b = kc + (n - k)a. \end{cases} \quad (5)$$

Поділимо складові системи рівнянь (5) на $h_{кр} = n \cdot c$:

$$\begin{cases} \frac{h_n}{h_{кр}} = \frac{k \cdot c}{n \cdot c} + \frac{(n-k)b}{nc}; \\ \frac{h_b}{h_{кр}} = \frac{k \cdot c}{n \cdot c} + \frac{(n-k)a}{nc}. \end{cases} \quad (6)$$

Введемо такі позначення: $\frac{a}{c} = \alpha$ – відношення висоти витка умовної пружини у вільному стані до висоти у пластифікованому стані; $\frac{b}{c} = \beta$ – відношення висоти витка умовної пружини у стиснутому стані до висоти витка, що пластифікувався; $\frac{k}{n} = \kappa$ – відношення кількості пластифікованих витків до їх загальної кількості (коефіцієнт пластифікації). Після введення таких позначень та спрощень отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{h_n}{h_{кр}} = \kappa + (1 - \kappa) \cdot \beta; \\ \frac{h_b}{h_{кр}} = \kappa + (1 - \kappa) \cdot \alpha. \end{cases} \quad (7)$$

Щільність матеріалу в каналі γ визначається з такого співвідношення:

$$\gamma = \frac{h \cdot A}{m}, \quad (8)$$

де h – висота зразка матеріалу; A – площа поперечного перерізу каналу пресування; m – маса отриманого зразка.

Звідси:

$$\frac{h}{h_{кр}} = \frac{\frac{h \cdot A}{m}}{\frac{h_{кр} \cdot A}{m}} = \frac{\gamma_{кр}}{\gamma} \quad (9)$$

Підставивши (9) у рівняння (7), отримаємо:

$$\begin{cases} \gamma_H = \frac{\gamma_{кр}}{\kappa + (1-\kappa) \cdot \beta} \\ \gamma_B = \frac{\gamma_{кр}}{\kappa + (1-\kappa) \cdot \alpha} \end{cases} \quad (10)$$

Отримана система рівнянь (10) описує закономірність зміни механіко-технологічних властивостей рослинних матеріалів у процесі брикетування. Нами проведені експериментальні дослідження [3], які показали, що суттєвий вплив на кінцеву щільність брикету мають два чинники: тиск у каналі пресування та час витримки матеріалу під тиском у діапазоні 10 – 30 с. Запропонована модель дає змогу описати зміну щільності під впливом тиску за рахунок зміни коефіцієнта пластифікації κ . У свою чергу на підставі цієї моделі ми маємо змогу отримати значення щільності матеріалу в каналі на будь-якому етапі брикетування, а також зміну щільності матеріалу після зняття навантаження внаслідок релаксації. У подальших дослідженнях необхідно встановити взаємозв'язок коефіцієнтів κ, β з параметрами тиску p та витримкою матеріалу під тиском τ .

На рис. 2 зображено схему пресування елементарної частинки сировини рослинного походження у відкритому циліндричному каналі. Для аналізу розглянемо схему сил, що діють на елементарну частинку матеріалу (див. рис. 2).

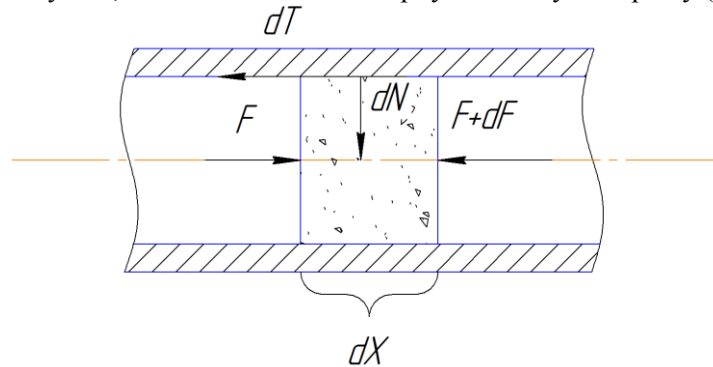


Рис. 2. Схема сил, що діють на елементарну частинку рослинного матеріалу під час брикетування.

Як відомо, сила тертя матеріалу об стінки каналу визначається із залежності

$$dT = dN \cdot f, \quad (11)$$

де dN – нормальна сила реакції стінок каналу; f – коефіцієнт тертя.

Нормальна сила реакції стінки каналу залежить від бокового тиску і площі контакту елементарної частинки:

$$dN = q_x \cdot dx \cdot U, \quad (12),$$

де q_x – боковий тиск; U – периметр каналу.

З умови рівноваги випливає, що $F = dT + F + dF$, отже, $-dF = dT$, тому

$$-dF = dN \cdot f = (q_x \cdot dx \cdot U)f. \quad (13)$$

Як стверджує А. І. Долгов [4], боковий тиск матеріалу залежить від щільності γ та тиску в каналі і визначається з такої залежності:

$$q_x = \varepsilon \cdot p_x + \varepsilon_1 \cdot \gamma^m, \quad (14)$$

де ε – коефіцієнт співвідношень бокового та осевого тисків; p_x – осевий тиск у каналі; γ – щільність матеріалу; ε_1, m – емпіричні коефіцієнти.

Перейдемо від векторів сил до значень тиску через відоме співвідношення $p = \frac{F}{A}$. Тепер, підставивши це співвідношення у рівняння (3), отримаємо загальний вигляд диференціального рівняння:

$$-dp \cdot A = f((\varepsilon \cdot p + \varepsilon_1 \cdot \gamma^m) \cdot dx \cdot U). \quad (15)$$

Для того щоб проінтегрувати це рівняння, необхідно привести його до такого вигляду:

$$\frac{dp \cdot A}{\varepsilon \cdot p + \varepsilon_1 \gamma^m} = -fU dx. \quad (16)$$

Враховуючи те, що щільність матеріалу γ є опосередкованою функцією тиску p , ліву частину цього рівняння ми можемо розв'язати лише числовими методами.

Враховуючи складність взаємозв'язків між різними параметрами процесу, ми пропонуємо це рівняння розв'язувати методом скінченних елементів. Цей метод передбачає числовий розв'язок рівнянь у частинних випадках, з пізнішою інтерполяцією розв'язків до загального випадку. Схема використання методу скінченних елементів представлена на рис. 3.

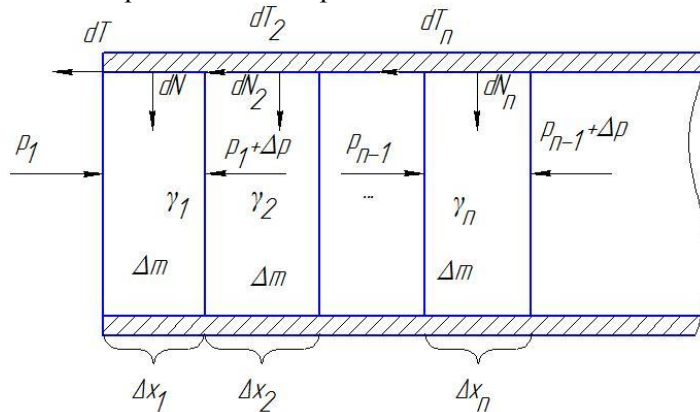


Рис. 3. Схема використання методу скінченних елементів.

Задано значенням тиску p_1 у точці 1 та визначимо коефіцієнт релаксації β_1 , який залежить від тиску, і коефіцієнт пластифікації κ_1 , який залежить від тиску p , витримки.

Встановимо значення щільності матеріалу в точці 1 γ_1 згідно з рівнянням (10):

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_\infty}{\kappa_1 + (1 - \kappa_1) \cdot \beta_1}. \quad (17)$$

Боковий тиск у ділянці 1 згідно з [4] становитиме:

$$q_1 = \varepsilon \cdot p_1 + \varepsilon_1 \cdot \gamma_1^m. \quad (18)$$

Визначаємо приріст тиску у даній точці за виглядом рівняння (15):

$$-\Delta p = \frac{f((\varepsilon \cdot p_1 + \varepsilon_1 \cdot \gamma_1^m) \cdot \Delta x_1 \cdot U)}{A}. \quad (19)$$

Розглянемо рух елементарного об'єму матеріалу ΔV_i в каналі. Прийнемо час переміщення $\Delta \tau_i$ елементарного об'єму між сусідніми точками постійним. Тоді швидкість руху елементарного об'єму по каналу на i -тій ділянці становитиме

$$v_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta \tau_i}, \quad (20)$$

де v_i – лінійна швидкість матеріалу на ділянці "1".

Елементарний об'єм визначається з такого співвідношення:

$$\Delta V_i = \Delta x_i \cdot A \quad (21)$$

де A площа поперечного перерізу каналу.

Ця величина буде змінюватися в процесі проходження матеріалу по каналу, внаслідок зміни щільності γ , а отже, змінюватиметься Δx_i і, як наслідок, лінійна швидкість v_i .

Розглянемо масу елементарного об'єму, яка буде постійною для всіх елементарних об'ємів і пов'язаною з ними через щільність:

$$\Delta m_i = \Delta V_i \cdot \gamma_i \rightarrow const. \quad (22)$$

Підставивши рівняння (21), отримаємо:

$$\Delta m_i = \Delta x_i \cdot A \cdot \gamma_i. \quad (23)$$

Відповідно масова подача визначатиметься з такого співвідношення і буде постійною:

$$W = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} = \frac{\Delta x_i}{\Delta \tau_i} \cdot A \cdot \gamma_i. \quad (24)$$

Таким чином, ми можемо замінити

$$\Delta x_i = W \cdot A \cdot \gamma_i \cdot \Delta \tau_i. \quad (25)$$

На ділянці "2" тиск у каналі становитиме:

$$p_2 = p_1 + \Delta p_1. \quad (26)$$

Оскільки коефіцієнт релаксації залежить від тиску, то він визначатиметься із емпіричних залежностей:

$$\beta_2 = \beta(p_2). \quad (27)$$

Коефіцієнт пластифікації визначатиметься також із емпіричних залежностей із урахуванням такої умови:

$$\kappa_2 = \begin{cases} \kappa(p_2; \Delta \tau), \text{ якщо } > \kappa_1; \\ \kappa_1 \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (28)$$

Дана умова показує те, що після пластифікації матеріал уже не може повернутися до попереднього стану.

Щільність матеріалу в точці "2" становитиме:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_\infty}{\kappa_2 + (1 - \kappa_2) \cdot \beta_2}. \quad (29)$$

Боковий тиск у ділянці 1 згідно з [4] становитиме:

$$q_2 = \varepsilon \cdot p_2 + \varepsilon_2 \cdot \gamma_2^m. \quad (30)$$

Приріст тиску на ділянці "2" становитиме відповідно:

$$-\Delta p_2 = \frac{f((\varepsilon \cdot p_2 + \varepsilon_1 \cdot \gamma_2^m) \cdot \Delta x_2 \cdot U)}{A}, \quad (31)$$

де приріст переміщення матеріалу по каналу становить

$$\Delta x_2 = W \cdot A \cdot \gamma_2 \cdot \Delta t. \quad (32)$$

У загальному випадку для i -тої ділянки тиск в каналі становитиме:

$$p_i = p_{i-1} + \Delta p_{i-1} \quad (34)$$

Оскільки коефіцієнт релаксації залежить від тиску, то він визначатиметься емпірично:

$$\beta_i = \beta(p_i). \quad (35)$$

Коефіцієнт пластифікації визначатиметься також із емпіричних залежностей з урахуванням такої умови:

$$\kappa_i = \begin{cases} \kappa(p_i; \Delta \tau), & \text{якщо } > \kappa_{i-1}; \\ \kappa_{i-1} & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (36)$$

Зазначена умова показує те, що після пластифікації матеріал уже не може повернутися до попереднього стану.

Щільність матеріалу в i -тій точці дорівнюватиме :

$$\gamma_i = \frac{\gamma_\infty}{\kappa_i + (1 - \kappa_i) \cdot \beta_i}. \quad (37)$$

Боковий тиск в i -тій ділянці дорівнюватиме:

$$q_i = \varepsilon \cdot p_i + \varepsilon_1 \cdot \gamma_i^m. \quad (38)$$

Приріст тиску на i -тій ділянці становитиме відповідно:

$$-\Delta p_i = \frac{f((\varepsilon \cdot p_i + \varepsilon_1 \cdot \gamma_i^m) \cdot \Delta x_i \cdot U)}{A}. \quad (39)$$

Оскільки приріст переміщення матеріалу по каналу становить

$$\Delta x_i = W \cdot A \cdot \gamma_i \cdot \Delta \tau, \quad (40)$$

то приріст тиску на i -тій ділянці становитиме

$$-\Delta p_i = f((\varepsilon \cdot p_i + \varepsilon_1 \cdot \gamma_i^m) \cdot W \cdot \gamma_i \cdot \Delta \tau \cdot U). \quad (41)$$

Виходячи з наведених теоретичних викладок, нами розроблено імітаційну скінченно-елементну модель процесу брикетування рослинної сировини у відкритому каналі. Ця модель розроблялась у середовищі Mathcad. Вхідними постійними параметрами моделі є тиск на початку каналу p_1 , масова подача матеріалу W , площа поперечного перерізу каналу A , периметр каналу U . Шуканими параметрами цієї моделі є: розподіл поздовжнього p і поперечного q тисків по всій довжині каналу, а також кінцева щільність матеріалу γ та довжина каналу L . Два останні параметри визначаються в такій точці x_i , у якій тиск p_i дорівнюватиме нулю.

Коефіцієнти релаксації β та пластифікації κ залежать від матеріалу, що піддається брикетуванню, та визначались експериментально. Таким чином, модель дає змогу отримати взаємозв'язок між конструктивними та технологічними параметрами машин для брикетування рослинної сировини.

На рис. 4 представлено розподіли тиску та щільності, отримані на підставі запропонованої моделі. Розрахунки проводили для таких конструктивних і

технологічних параметрів: тиск на початку каналу p_1 становив 30 МПа, масова подача матеріалу $W = 0,07$ кг/с, діаметр каналу – 70 мм.

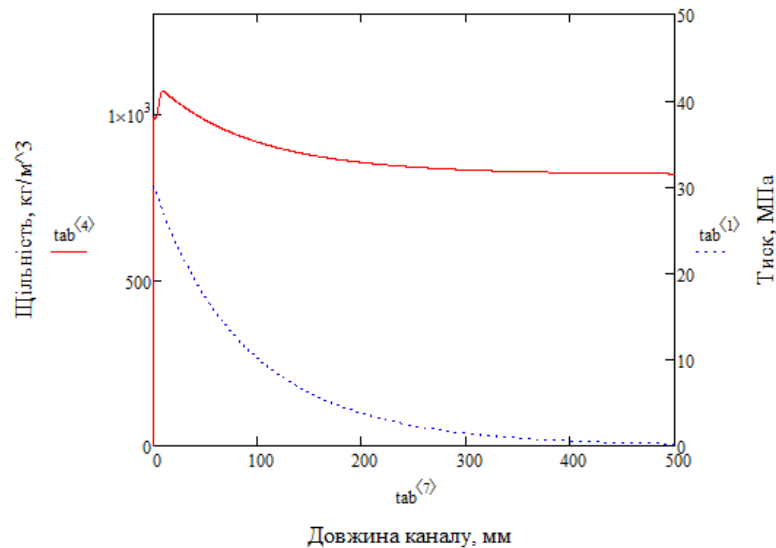


Рис. 4. Розподіли щільності брикетів та тиску за довжиною каналу.

Оскільки під час процесу брикетування енергія тиску по довжині каналу витрачається на тертя, то в точці на графіку, в якій тиск у каналі дорівнюватиме нулю, ми отримуємо значення довжини каналу $L=500$ мм. Щільність брикетів, враховуючи явище релаксації, становитиме 816 кг/м^3 , що відповідає вимогам європейського стандарту [6].

Висновки. 1. Чинні методики не повною мірою описують процес брикетування соломистих матеріалів, оскільки вони або не враховують переходу пружних деформацій у пластичні, або процес брикетування описується залежностями із значною кількістю емпіричних коефіцієнтів, які досить складно визначити.

2. Запропонована математична модель закономірностей зміни механіко-технологічних властивостей рослинних матеріалів під час брикетування описує перехід від пружних до пластичних деформацій, що дає змогу однозначно описати стан соломистих матеріалів на будь-якому етапі пресування.

3. На підставі отриманих залежностей отримані диференціальні рівняння, що описують процес стиску, які є підставою для встановлення взаємозв'язків між конструктивними та технологічними параметрами технологічного обладнання для брикетування соломистого матеріалу.

4. Отримана модель процесу брикетування дає змогу визначати окремі параметри пресувального каналу, кінцеву щільність матеріалу для заданих конструктивних рішень.

Бібліографічний список

1. Боярчук В. Економічна та енергетична ефективність виробництва ріпаку озимого, пшениці озимої, кукурудзи, цукрового буряку та біопалива на їх основі / В. Боярчук, О. Фтома, О. Боярчук // Аграрна економіка. – 2012. – Т. 5, № 1–2. – С. 102–110.
2. Боярчук В. Особенности механико-технологических свойств соломы рапса во время прессования. В Боярчук., В Чучман., А Татомир.//MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. – Vol.16, No. 4. – P. 14 – 19.
3. Боярчук В. Оцінка енергоефективності технологій використання соломи ріпаку в енергетичних цілях / В. Боярчук, В. Чучман // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2012.– Vol.14, No.4. – P. 11-15.
4. Долгов И. А. Закономерности сжатия сено-соломистых материалов / И. А Долгов – Мех. и электр. соц. сельск. хоз-ва. – , 1972. – № 10. – С. 8 – 11.
5. Долгов И. А. Сжатие сено-соломистых материалов в поршневых прессах / И. А Долгов // Мех. и электр. соц. сельск. хоз-ва. – 1973. – № 5. – С. 11 – 16
6. Європейський стандарт EN 14961-1:2010 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.en-standard.eu/csn-en-14961-1-solid-biofuels-fuel-specifications-and-classes-part-1-general-requirements/>.
7. Кравчук В. Технології та обладнання для використання поновлювальних джерел в сільськогосподарському виробництві : посібник / В. І. Кравчук, В. О. Дубровін – Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2010. – 184 с.
8. Мироненко В. Г. Тверде біопаливо в теплозабезпеченні села [Електронний ресурс] / В. Г. Мироненко, В. О. Глотова, А. В. Філатова. – Режим доступу : http://www.nbu.gov.ua/Portal/chem_biol/nvnau_bbe.pdf/.
9. Dobek T. Ocena efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji pszenicy ozimej i rzepaku ozimego wykorzystanych do produkcji biopaliw / Dobek T., Dobek M., Śařec O. // Inżynieria Rolnicza. – 2010. – Nr 1 (119). – S. 161-168.
10. Mani S. Effects of compressive force, size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses / Mani S., Tabil L., Sokhanshaj S. // Biomass and Bioenergy. – 2006. – № 30. – С. 648 – 654.

Чучман В. Теоретичні передумови обґрунтування параметрів машин для брикетування рослинної сировини у відкритому каналі

У статті розглядається пресування соломи ріпаку, а також вплив параметрів часу та тиску на щільність отриманих зразків. Запропоновано реологічну модель лінійного стиску рослинних матеріалів.

Ключові слова. Біопаливо, брикетування, механіко-технологічні властивості, солома, щільність, коефіцієнт пластифікації.

Chuchman V. Theoretical background justification parameters of machinery for briquetting plant material in an open channel

The article deals with pressing rape straw, and the impact parameters of time and pressure on the density of the samples. A rheological model of linear compression plant materials.

Keywords: biofuels, press-tion, mechanical-technological properties.

Чучман В. Теоретические предпосылки обоснования параметров машин для брикетирования растительного сырья в открытом канале

В статье рассматривается прессование соломы рапса, а также влияние параметров времени и давления на плотность полученных образцов. Предложена реологическая модель линейного сжатия растительных материалов.

Ключевые слова: биотопливо, брикетирование, механико-технологические свойства, солома, плотность, коэффициент пластификации.