

УДК 631.326:620.952

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ УЩІЛЬНЕННЯ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ БІОПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ

В.О. Лук'янець, ст. наук. співр.,

С.В. Субота, наук. співр.

ННЦ «ІМЕСГ»

Отримані теоретичні та експериментальні залежності впливу параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів.

Ключові слова: *рослинна біомаса, брикети, тверде біопаливо, ущільнення.*

Проблема. Дослідження впливу технологічних параметрів процесу ущільнення біомаси на показники якості отриманих компактів (тюків, рулонів, пелет та брикетів) вивчалися багатьма науковцями, зокрема такими як: І.І. Вольф, В.П. Горячкин, Е.М. Гут'ян, М.А. Пустигін, І.П. Скальвейт, І.В. Сахаров, А.А. Тулинов, С.А. Альферов, В.Д. Дутов, Є.І. Храпач, А.А. Григор'єв, М.А. Перегожін, В.І. Особов, В.І. Мельник, Р.О. Бакарджієв та ін. Основним показником, який характеризує якість ущільнення біомаси є щільність отриманих компактів [1]. Однак при виробництві біопаливних брикетів дослідники не враховують міцність отриманих компактів на зламвання, що найбільш адекватно характеризує технологічну придатність їх до подальшого використання (транспортування, порціонування, бункеризації та підготовки до спалювання).

Параметрами, що змінюються і впливають на технологічний процес виробництва біопаливних брикетів у працях [1,2] прийнято: початкову вологість брикетів і ступінь подрібнення матеріалу, вид і вміст зв'язуючого компонента, форму та конусність матриці формуючого пристрою на щільність брикетів і енергетичну щільність, але в роботах відсутній побічний показник якості, а саме міцність Q біопаливних брикетів на зламвання, який нами було визначено

на приладі, розробленому в ННЦ «ІМЕСТ» з подальшими розрахунками за формулою:

$$Q = \frac{P \cdot L}{S}, \quad (1)$$

де P — зусилля, при якому відбувається зламвання, Н; L — відстань від лінії зламвання до площини прикладання зусилля, м; S — площа поперечного перерізу брикета, м².

Мета досліджень — встановити залежності впливу параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів.

Результати досліджень. Рослинна біомаса є переважно трифазною субстанцією, основне рівняння співвідношення фаз соломисто-стеблового матеріалу якої має вигляд [3]:

$$1 = (1 - W) \frac{\rho_H}{\rho_T} + W \rho_H + \varepsilon, \quad (2)$$

де $T = (1 - W) \frac{\rho_H}{\rho_T}$ — тверда фаза; $T = W \rho_H$ — рідка фаза; $\varepsilon = 1 - \frac{\rho_H}{\rho_T} [1 + W(\rho_T - 1)]$ — газоподібна (пористість) фаза; ρ_H — насипна щільність ма-

теріалу, кг/м³; ρ_T — власне щільність основи матеріалу, кг/м³; W — вологість матеріалу, %.

Як показують дослідження [3] об'єм по газовій фазі в 10...20 разів перевищує об'єм, власне, твердої фази і при постійному значенні вологості всяка кількісна зміна газової фази супроводжується деформацією первинних елементів соломисто-стеблового матеріалу і навпаки.

Використання рослинної біомаси в енергетичних цілях за таких умов доцільна лише при її більш компактному вигляді або в ущільненій формі (тюки, рулони, брикети, гранули). При цьому підвищується теплопродуктивність теплотехнічних установок за рахунок сталої стехіометрії процесу горіння, меншої емісії горючих газів у навколишнє середовище.

Проведені нами в 2009–2011 рр. дослідження по брикетуванню паливних брикетів з тирсостружки, солом'яної січки і залишків післязбиральної обробки врожаю показали, що в цілому процес проходить в три етапи.

На першому етапі (рис. 1) з утворюваного компакту (брикетів чи пелетів) витісняється газова складова (повітря, пара води); деформація відбувається при

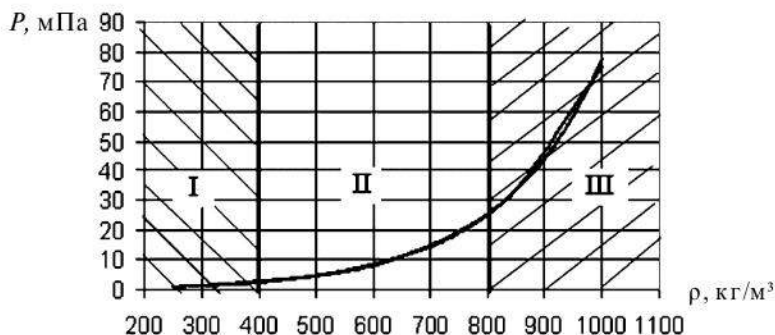


Рис. 1. Залежність прикладеного тиску від щільності паливних брикетів

порівняно низьких навантаженнях (зусиллях) і носить лінійний характер. Після зняття навантаження деформація не змінюється.

Другий етап для брикетів і пелет характеризується остаточним звільненням від внутрішньостеблової газової фази та інтенсивним розвитком пружно-пластичних деформацій із швидким збільшенням тиску пресування. При цьому заповнюються мікропори, частки взаємно уклинюються і за рахунок пластичних властивостей змінюють свою форму, щільніше прилягають одна до одної. Із сипкого матеріалу утворюється компактне пористе тіло, що має достатню механічну міцність. Після зняття навантаження деформації знімаються з деяким запізненням у часі, що пов'язане з наявністю пружної післядії.

На третьому етапі стискається уже сформований моноліт, в якому переважають пружні деформації при різко зростаючому тиску.

Механічна міцність залежить від прикладеного тиску, проте значною мірою на щільність брикетів впливають такі ж характеристики соломисто-стеблового матеріалу, як ступінь подрібнення, вологість та температура формування (для пресів екструдерного типу).

Причому ступінь подрібнення суттєво впливає на кут вкладання θ (компактування) часток, який можна виразити залежністю:

$$\theta = \left[\pi \left(1 - e^{\ln \frac{l_p}{d_{\text{екв}}}} \right) \right], \quad (3)$$

де l_p — середньозважена довжина часток; $d_{\text{екв}}$ — еквівалентний діаметр поперечного перерізу часток.

Якщо відношення $l_p/d_{\text{екв}} = 1$, а $\theta \approx 0$, згідно [4] маємо сипке середовище, якщо $l_p \geq d_{\text{екв}}$, то зв'язне з елементами внутрішнього тертя.

Дослідження умов деформації (зсуву) при пресуванні соломисто-стеблових матеріалів, а також чисельні експериментальні дані [1] дають можливість стверджувати про тісний зв'язок між кутом внутрішнього тертя і напругою зчеплення. Відома залежність Амантона-Кулона, що встановлює зв'язок між зусиллям зсуву і нормальним тиском:

$$\tau_i = \sigma_{ni} \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (4)$$

де τ_i — опір зсуву; σ_{ni} — напруження нормального тиску; φ — кут внутрішнього тертя; C — напруження зчеплення матеріалу під час зсуву.

На практиці для полегшення розрахунків напруження зчеплення, як правило, береться постійним (*const*) для конкретного фізико-механічного стану матеріалу, а кут внутрішнього тертя визначається за кутом природного укосу.

Однак накопичений досвід свідчить, що зі збільшенням ущільнення подрібнених соломисто-стеблових матеріалів сила зсуву змінюється не прямо пропорційно нормальному тиску, а нелінійно. Отже, в цьому випадку кут внутрішнього тертя і напруження зчеплення не є постійними величинами в процесі ущільнення рослинного матеріалу.

Зчеплення як складова частина опору зсуву, що викликана нормальним напруженням, характеризує стан внутрішніх в'язів середовища в поточний момент часу. Взаємозв'язок між напруженням зсуву і нормальними тиском N , а також зміну кута тертя φ і зчеплення C можна визначити за круговою діаграмою Мора. На рис. 2 зображена ця діаграма для рослинних матеріалів, яким властиві релаксаційні ознаки. Лінія DZ є обвідною кривою кругів Мора, тому в кожній точці цієї обвідної дотична AB утворює з віссю абсцис σ_{ni} різні за величиною кути, що свідчить про несталість коефіцієнта тертя. Круг Мора, побудований на головних напруженнях нормальному σ_{ni} і бокового розпору $\sigma_{\delta i}$ мають спільну точку A з обвідної DZ .

Припустимо, що Q_i — відстань від початку координати до центра E i -го круга Мора. Координатами точки A є $\tau_i = A_n$ та $\sigma_{ni} = O_n$. Тоді:

$$\left(Q_i - \sigma_{ni}^* \right)^2 + \tau_i^2 - \left(\frac{\sigma_{ni}^* - \sigma_{\delta i}}{2} \right)^2 = u. \quad (5)$$

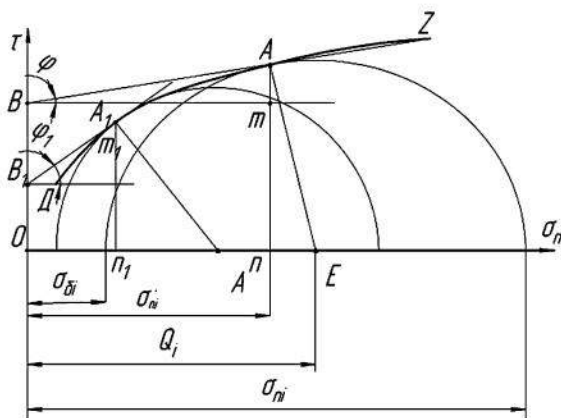


Рис. 2. Схема напруженого стану для ущільнюваних соломисто-стеблових матеріалів

Параметром рівняння є Q_i . Прирівнявши рівняння (5) до нуля, беручи похідну по цьому параметру та виділивши його з рівняння, знаходимо рівняння обвідної:

$$\frac{\partial u}{\partial Q_i} = 2Q_i - 2\sigma_{ni} = 0, \quad (6)$$

$$\tau_i = \frac{\sigma'_{ni} - \sigma_{\delta i}}{2}. \quad (7)$$

Залежність між нормальним тиском σ_{ni} і напруженням бокового розпору $\sigma_{\delta i}$ можна виразити через коефіцієнт поперечної деформації μ , який, в свою чергу, є функцією тиску або зміни щільності матеріалу.

В такому разі рівняння (7) набуде вигляду:

$$\tau_i = \frac{\sigma_{ni}}{2} \left(1 - \frac{\mu'}{1 - \mu'} \right), \quad (8)$$

Отримане рівняння (8) і є рівнянням обвідної лінії DZ . За допомогою його можна визначити зміну коефіцієнта внутрішнього тертя f_{mp} з ростом тиску. Для цього треба взяти похідну τ_i по σ_{ni} . В результаті диференціювання отримаємо:

$$\frac{\partial \tau_i}{\partial \sigma_{ni}} = \operatorname{tg} \varphi = f_{mp} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\mu'}{1 - \mu'} \right) + \frac{\sigma_{ni}}{2} \cdot \frac{\sigma_{ni}}{\partial \sigma_i} \left(1 - \frac{\mu'}{1 - \mu'} \right). \quad (9)$$

Щоб знайти похідну в другій складовій використаємо рівняння (5), що пов'язує коефіцієнт поперечної деформації μ з нормальним напруженням, тобто $\mu = 1/2 - E^2 l_i / 6k \sigma_{ni}$. Підставивши в (5) значення модулів E і k , в кінцевому підсумку знаходимо коефіцієнт внутрішнього тертя:

$$f_{mp} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\sigma_{ni} - E_0 e^{k(\rho - \rho_0)} \cdot l_i (1 - 2\mu)}{\sigma_{ni} + E_0 e^{k(\rho - \rho_0)} \cdot l_i (1 - 2\mu)} \right] - \left[\frac{\sigma_{ni} \cdot l_i E_0 e^{k(\rho - \rho_0)}}{(1 - 2\mu) \cdot \left(\frac{\sigma_{ni}}{1 - 2\mu} + l_i \cdot E_0 e^{k(\rho - \rho_0)} \right)^2} \right], \quad (10)$$

де E_0 — січний модуль пружності, що відповідає початковому значенню щільності ρ_0 матеріалу; k — коефіцієнт, що характеризує збільшення щільності матеріалу і має розмірність, обернену розмірності щільності; l_i — відносна деформація, яка тісно пов'язана з пористістю матеріалу; μ — коефіцієнт Пуассона.

З виразу (10) виходить, що зі збільшенням тиску коефіцієнт тертя f_{mp} зменшується. Рівняння (10) описує залежність коефіцієнта f_{mp} від напруженого стану ущільненого матеріалу та його фізико-механічних властивостей.

Напруження зчеплення C визначаємо з рівняння Кулона з використанням (8) і (10):

$$C = \sigma_{ni}^2 \frac{E \cdot l_i}{(1 - 2\mu) \cdot \left(\frac{\sigma_{ni}}{1 - 2\mu} + E \cdot l_i \right)^2}. \quad (11)$$

Звідси виходить, що зі збільшенням напруження σ_{ni} зростає зчеплення C . Якщо виразити його через січний модуль пружності, отримаємо значення зчеплення від щільності пресування ρ .

$$C = \frac{l_i \cdot \sigma_{ni}^2 \cdot E_0 e^{k(\rho - \rho_0)}}{(1 - 2\mu) \cdot \left(\frac{\sigma_{ni}}{1 - 2\mu} + l_i \cdot E_0 e^{k(\rho - \rho_0)} \right)^2}. \quad (12)$$

На рис. 2 ордината Am зображує напруження зсуву, що відповідає нормальному тиску σ_{ni} . При цьому частинка ординат характеризує силу тертя $\sigma_{ni} \cdot \operatorname{tg} \varphi$, а відрізок mn — зчеплення C . Кут між дотичною BA і горизонтальною лінією Bm відповідає куту тертя в даний момент навантаження.

Таким чином, зі збільшенням нормального тиску σ_{ni} (при умові обмеження бокового розпору в матричному каналі преса-брикетувальника) зчеплення соломисто-стеблової маси зростає, кут внутрішнього тертя зменшується. На основі розрахункових даних за формулами (10) і (11) побудуємо графік розрахункових залежностей (рис. 3) коефіцієнта внутрішнього тертя f_{mp} від щільності матеріалу і напруження зчеплення C від нормального тиску σ_{ni} (рис. 4).

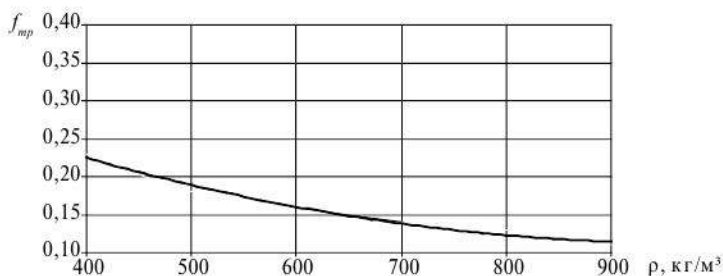


Рис. 3. Розрахункова залежність коефіцієнта внутрішнього тертя f_{mp} від щільності матеріалу

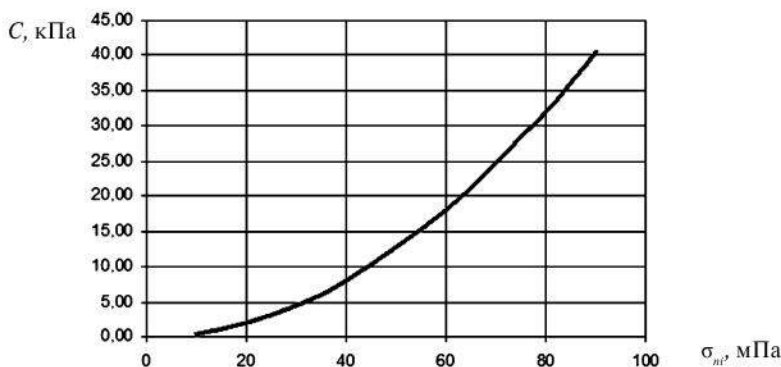


Рис. 4. Розрахункова залежність напруження зчеплення C від нормального тиску σ_{ni}

В цілому деформація (розлом) відбувається миттєво без викришування торців, які залишаються при цьому з усталеними формами. Як видно з рис. 5, момент на зламвання в залежності від щільності брикетів зростає по параболічній залежності і досягає максимуму при щільності 1050-1100 кг/м³. Однак і при щільності 850-950 кг/м³ брикети добре зберігають свою форму і якість при укладанні та транспортуванні в мішках «Big-bag» або в контейнерах чи піддонах. По характеру кривих залежності напруження зчеплення C (рис. 4) та зусилля P (рис. 5) на зламвання від щільності брикетів можна зробити висновок про превалюючий вплив C на міцність та щільність брикетів.

При цьому були використані експериментальні дані [1] початкової щільності ρ_0 і модуля пружності E_0 при початковій щільності найбільш поширених рослинних відходів — соломи озимої пшениці.

Проведені експериментальні дослідження по визначенню міцності паливних брикетів на зламвання і на стиснення (рис. 6 і 7).

Деформація при стисненні характеризувались крихким миттєвим руйнуванням. Це свідчить про значне зниження коефіцієнта внутрішнього тертя, але характер кривої залежності напруження стиснення (руйнування) з врахуванням напруження зчеплення в цілому відповідає загальному перебігові процесу ущільнення соломисто-стеблових матеріалів. На рис. 7 наведено експериментальні залежності коефіцієнта внутрішнього тертя від тиску на матеріал у каналі матриці.

Наведені дані стосуються, в основному, закономірностей механічного напруженого стану.

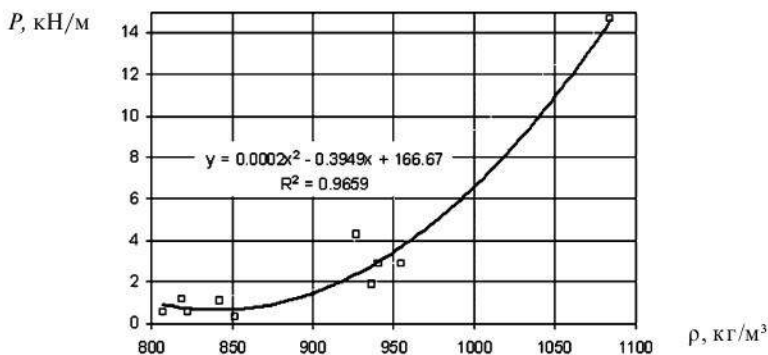


Рис. 5. Експериментальна залежність зусилля на зламвання від щільності біопаливних брикетів

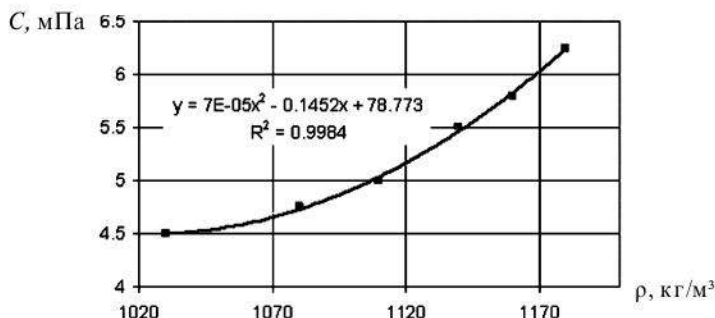


Рис. 6. Експериментальна залежність напруження руйнування на стиснення від щільності біопаливних брикетів

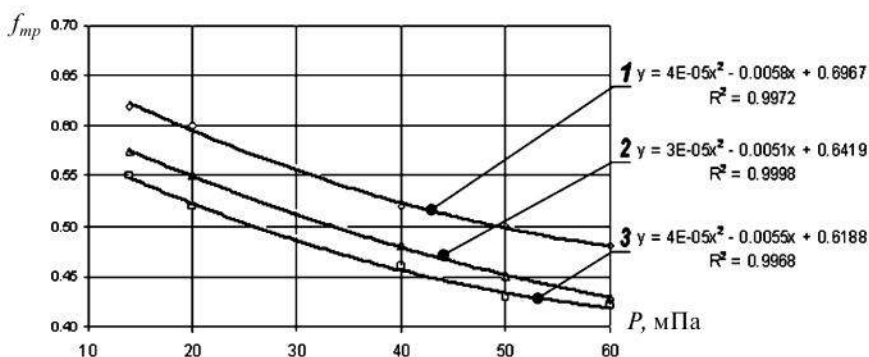


Рис. 7. Експериментальна залежність коефіцієнта внутрішнього тертя f_{tr} від тиску P на матеріал у каналі матриці:

1 — ступінь подрібнення соломи 50-80 мм; 2 — ступінь подрібнення соломи 20-50 мм; 3 — солова

Важливу роль для забезпечення міцності брикетів при їх виготовленні відіграє також температура їх спікання (температура матриці). На рис. 8 показано залежність щільності паливних брикетів від температури матриці, з якої видно, що оптимальною температурою режиму формування є діапазон температур в межах 200-230°C.

Міцність характеристики паливних брикетів з відходів рослинництва тісно пов'язана з їх щільністю, а значить і теплотворною здатністю, що в кінцевому підсумку впливає на процес горіння (рис. 9).

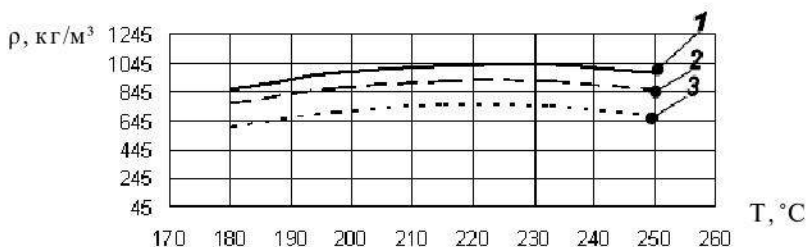


Рис. 8. Залежність щільності паливних брикетів від температури формуючого пристрою:

1 — вологість матеріалу 8 %; 2 — вологість матеріалу 12 %; 3 — вологість матеріалу 14 %

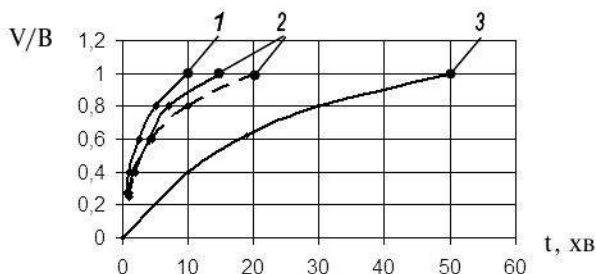


Рис. 9. Характер горіння соломі різної щільності (V/B — відносна кількість спаленої рослинної біомаси (наважка 23 кг):

t — тривалість горіння наважки, хв; 1 — солом'яна січка щільністю 50 кг/м³; 2 — солом'яні тюки або рулони щільністю 80...110 кг/м³; 3 — солом'яні брикети щільністю 500 кг/м³

Висновки. В результаті теоретичних досліджень впливу параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники міцності паливних брикетів за допомогою геометричної побудови лінії межі текучості (кругової діаграми Мора) було отримано аналітичні залежності коефіцієнта внутрішнього тертя $f_{тр}$ від щільності матеріалу і напруження зчеплення C від нормального тиску σ_{ni} як основних факторів протидії деформації стиснення і зламвання. Отримані експериментальні залежності опору брикетного масиву на зламвання та стиснення підтвердили характер вказаних залежностей.

Бібліографія

1. Особов В.И., Васильев Г.К., Гоняновский А.В. Машины и оборудование для уплотнения сено-соломистых материалов. — М.: Машиностроение, 1974. — 230 с.
2. Бакарджиев Р. О. Кращі режими виготовлення паливних брикетів/ Техніка АПК. — 1997. — № 1. — С. 18-20.
3. Колтушкин И.С. Исследование растительных материалов в связи с требованиями механической технологии заготовки грубых кормов и силоса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Алма-Ата, 1966. — 20 с.
4. Мельник В.И. Предельное равновесие сплошных неупругих сред: монография. — Харьков: КП «Типография №13», 2006. — 368 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА БИОТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ

Приведены теоретические и экспериментальные зависимости влияния параметров уплотнения растительной биомассы на показатели качества биотопливных брикетов.

Ключевые слова: *растительная биомасса, брикеты, твёрдое биотопливо, уплотнение.*

INFLUENCE OF PARAMETERS OF PLANT BIOMASS COMPACTION ON QUALITY INDICATORS OF BIOFUEL BRIQUETTES

The theoretical and experimental relationships of influence of compaction parameters of plant biomass on biofuel briquette quality indicators.

Key words: *herbaceous biomass, briquettes, solid biofuel, compaction.*