

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-26>

УДК 662.8.055:665.3

К. О. Самойчук¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

В. А. Самохвал¹, аспірант

ORCID: 0000-0001-5539-3647

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ВІДХОДІВ ПРОВІЮВАННЯ СОНЯШНИКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗМІННИХ ШНЕКІВ

Анотація. Проведено дослідження процесу ущільнення рослинної біомаси шнековим механізмом із метою виготовлення паливних брикетів. Виявлені закономірності стали підґрунтям для визначення оптимальних параметрів роботи обладнання. У процесі проектування брикетувальних пресів необхідно врахувати особливості деформації біомаси, а також зміну її фізичних властивостей у момент контакту з робочими органами. Шнековий метод брикетування має перевагу завдяки поєднанню процесів транспортування й ущільнення, що забезпечує безперервність роботи за стабільної швидкості. Процес ущільнення біомаси шнековим механізмом відбувається у три стадії, та основним чинником, що впливає на продуктивність преса та якість брикету, є крок витків шнеків. Проведено експериментальні дослідження зі зміною кроків витків шнеків, що дали можливість визначити оптимальні показники пресового обладнання для отримання високої продуктивності та якісного щільного паливного брикету.

Ключові слова: олія, достискання, дослідження, біомаса, брикет, прес, формування.

Постановка проблеми. В Україні щороку формується значний економічно доцільний потенціал вторинної біомаси, який може бути використаний для виготовлення біопалива [1; 2]. Перспективи розвитку біоенергетики в аграрному секторі є стратегічно важливими для зміцнення енергетичної незалежності держави та значного зниження обсягів імпорту енергоносіїв, а також розширення шляхів використання відновлюваних джерел енергії шляхом залучення побічної аграрної продукції до енергетичного циклу [3; 4]. Брикети з оліємістких культур розглядаються як ефективна й екологічно безпечна альтернатива традиційним джерелам теплової енергії, таким як буре вугілля, природний газ або мазут [5]. Брикети, виготовлені з таких культур, як соняшник, соя, рапс, коріандр, мають високу теплотворну здатність, що забезпечує їм конкурентоспроможність на паливному ринку [6]. При цьому екологічні переваги біобрикетів, зокрема дуже низький рівень викидів шкідливих речовин під час згоряння, значно перевищують відповідні показники інших традиційних видів палива. Щільність сформованих брикетів становить 800–1250 кг/м³, що сприяє їх зручному транспортуванню та довготривалому зберіганню без втрати якості. Процес брикетування оліємісткої сировини характеризується відносно низькими енергетичними витратами [7]. Технологія формування паливних брикетів реалізується під дією високого тиску за допомогою машин, шнекових прес-екструдерів. Незважаючи на тривалий період експлуатації шнекових пресів у промислових умовах, сучасна науково-технічна база все ще не забезпечує наявності достатньо обґрунтованих методик для точного розрахунку оптимальних параметрів процесу ущільнення біомаси [8]. Відсутність адекватного фізичного опису процесів, що відбуваються в зоні пресування, призводить до того, що велика кількість брикетувальних машин на практиці працює у нерегламентованих режимах, що негативно позначається на їхній ефективності та ресурсі. Дуже часто завдяки експериментальним дослідженням підвищують продуктивності шнекових прес-екструдерів [9]. Саме тому дана тематика є надзвичайно актуальною й потребує більшого вивчення. Результати

досліджень та розробки у цій сфері мають сприяти суттєвому поліпшенню техніко-економічних показників роботи шнекових брикетувальних установок.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень та технологічних підходів до виробництва біопалива з відходів соняшнику свідчить про нагальну потребу у проведенні подальших досліджень, спрямованих на зниження енерговитрат та поліпшення якості готового продукту. Серед пріоритетних завдань також виділяються модернізація машин для ущільнення з метою підвищення їхньої надійності, розширення технологічних можливостей щодо переробки різних видів аграрної сировини, а також оптимізація параметрів сировини для досягнення високої щільності готової продукції [10]. Будь-яка біомаса складається з твердої та газоподібної фаз. Основу дисперсного середовища формують тверді органічні частинки, тоді як дисперсною фазою є мікроскопічні пухирці повітря [11]. Особливості механічних властивостей такої дисперсної маси визначаються тим, що рослинні частинки розділені повітряними прошарками, через які діють сили молекулярного притягання. Саме ці сили забезпечують структурну міцність біомаси в процесі формування паливних брикетів. У процесі зміни дисперсного середовища, наприклад за зменшення об'єму повітряних проміжків між окремими частинками, посилюється їх молекулярне зчеплення між собою, що призводить до підвищення щільності структури та зменшення енергетичних витрат [12]. Щільність паливних брикетів істотно зростає зі збільшенням прикладеного тиску, а також зі зменшенням вологості відходів провіювання соняшнику. Під час пресування оліємісткої біомаси вологість її повинна бути 5–12,5%, за збільшення вологості отримані брикети матимуть низьку щільність, а за зниження виникатимуть надмірне тертя та перегрів обладнання, що теж сприятиме недостатній механічній міцності готового продукту [13]. Під час пресування оліємісткої сировини найкращі результати забезпечуються за температури 75–85°C, оскільки за нижчих та вищих температур механічна міцність паливних брикетів знижується [14].

Для отримання високої якості брикетів необхідно витримувати матеріал у пристрої остаточного формування під дією високого тиску протягом певного часу, що сприяє зменшенню пружних напружень у структурі. Контрольоване підвищення температури біомаси дає змогу знизити необхідний для ущільнення тиск без утрати якості готової продукції.

Вагомий внесок у розвиток теоретичних і практичних основ використання біомаси для виробництва газоподібного, рідкого та твердого палива зробили вітчизняні вчені Г.Г. Гелетука, В.А. Герасимович, В.О. Дубровін, Т.А. Железна та інші дослідники [15]. Їхні праці присвячені вивченню технологічних режимів переробки біосировини, особливостей роботи обладнання та оцінці енергоефективності обладнання. Із досліджень встановлено, що якість процесу пресування рослинної сировини та рівень енергетичних витрат на його реалізацію визначаються комплексом взаємопов'язаних конструктивних і технологічних чинників. До конструктивних чинників належать тип і схема обладнання, геометрія робочих органів та характер взаємодії останніх із масою сировини. Серед технологічних чинників ключовими є вологість і ступінь подрібнення матеріалу, величина прикладеного тиску, тривалість витримки в камері пресування, уміст олійної частки та температурні умови. Процес ущільнення біомаси умовно поділяється на три стадії. На першій стадії здійснюється первинне ущільнення: частинки сировини наближаються одна до одної, частково переміщуються, що сприяє заповненню порожнин. Друга стадія характеризується інтенсивним ущільненням під дією підвищеного тиску: завдяки пружним і пластичним властивостям частинки взаємо проникають і деформуються, наближаючись одна до одної. На третій стадії за умов максимального тиску відбувається остаточне об'ємне ущільнення брикету шляхом переходу пружних деформацій у пластичні. Будь-яке пресування супроводжується інтенсивним виділенням теплової енергії, яка відіграє важливу роль у зміні фізичних властивостей сировини. Контрольоване підвищення температури викликає

розм'якшення лігніну, що міститься у клітинних стінках рослин, сприяючи його переходу у пластичний стан та забезпечуючи склеювання частинок брикету між собою. Водночас процеси полімеризації лігніну призводять до формування суцільної однорідної та міцної структури, що значно підвищує механічну стійкість готових виробів.

Формулювання мети статті. Метою роботи є підвищення продуктивності процесу виготовлення паливних брикетів з оліємісткої сировини, уточнення технологічних закономірностей функціонування шнекових робочих органів, зокрема кроку шнеків, що дасть можливість прогнозувати поведінку сировини в процесі пресування.

Основна частина. Рух біомаси всередині шнекового механізму має складну просторову траєкторію, що зумовлюється особливостями геометрії гвинтової поверхні шнека та зеєрної камери. Частинки сировини не переміщуються лінійно вздовж осі обертання, а здійснюють гвинтоподібний рух зі змінними параметрами швидкості як в осьовому, так і в радіальному напрямках. Ці параметри залежать від кількох ключових чинників: відстані окремих частинок до центральної осі шнека, величини прикладеного зусилля до них, коефіцієнта тертя між сировиною та поверхнею робочих органів, а також від протитиску, що виникає у зоні підготовки та формування паливного брикету. Загалом процес брикетування у шнековій робочій камері умовно поділяється на два взаємопов'язані етапи, які водночас і взаємно перетікають один в інший. Перший етап охоплює транспортування біомаси до зони пресування, яке супроводжується поступовим ущільненням сировини, оскільки шнеки мають змінний крок – цей етап поєднує функції переміщення та попереднього ущільнення (транспортна фаза). Другий етап полягає у продавлюванні ущільненої маси через формуючий канал конічної матриці, що відповідає процесу так званої сухої екструзії, тобто формування брикетів без додавання додаткових сполучних рідин чи пари (технологічна фаза). Особливістю шнекового брикетування є тісна інтеграція транспортного та технологічного процесів. На відміну від багатьох інших пресових систем у шнековому механізмі ці процеси відбуваються одночасно й у безперервному режимі. Це забезпечує високу продуктивність системи за відносно компактною конструкцією та дає змогу досягати стабільних параметрів ущільнення і форми готового брикету без проміжних зупинок або зовнішнього регулювання подачі. Такий принцип дії особливо ефективний для великого серійного виробництва паливних брикетів із відходів провіювання таких культур, як соняшник, соя, рапс, коріандр.

Схему робочих органів обладнання зображено на рис. 1 [16].

Удосконалення конструкцій шнекових пресів базується на тривалому досвіді виробництва, який дав змогу накопичити значний емпіричний матеріал щодо особливостей функціонування обладнання в реальних виробничих умовах. Більшість наявних підходів до розрахунку параметрів цього процесу побудовано на теоретичних моделях взаємодії біомаси з робочими органами обладнання.

Проте попри значний обсяг дослідницької роботи сьогодні не існує уніфікованої, загальноприйнятої методики, яка б давала змогу точно визначати режими та параметри роботи шнекових пресів екструдерів під час роботи з оліємісткою сировиною. Це створює серйозні труднощі на виробництвах брикетів. Під час побудови математичної моделі процесу пресування рослинної біомаси шнековим механізмом часто використовується припущення про відсутність зворотних потоків матеріалу між витками шнеків. Це дає змогу спростити аналіз системи сил, що діють на масу під час її транспортування та ущільнення. Серед основних сил, які враховуються у розрахунках (рис. 2), можна виділити такі:

- нормальна сила тиску, що виникає у результаті контакту гвинтової поверхні шнека з біомасою;
- сила гідродинамічного опору, яка виникає через перепад тиску вздовж довжини каналу, що має конкретні геометричні параметри (ширину, глибину);

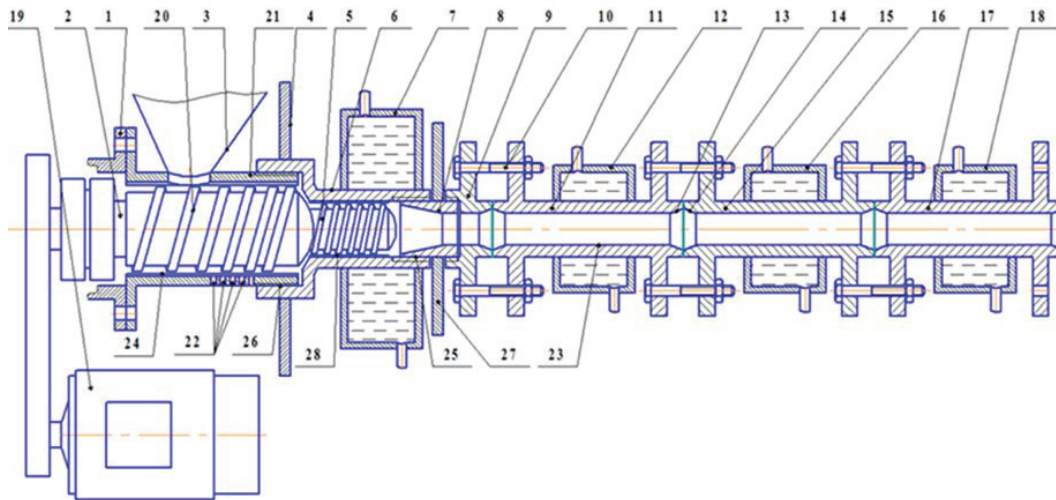


Рис. 1. Схема робочих органів розробленого прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів:

1 – підшипниковий вузол; 2 – вал; 3 – бункер; 4 – фіксатор із рукояткою; 5, 20 – шнеки; 6 – камера дожиму; 7, 12, 16, 18 – система охолодження; 8 – конічна матриця; 9 – формуючий пристрій; 10 – болт; 11, 15, 17 – секції; 13, 14 – фаски для відбору олії; 19 – електродвигун; 21 – пресуюча камера; 22 – аварійні отвори; 23 – труба; 24, 28 зєєрні ребра; 25, 26 – різьбове з’єднання; 27 – рукоятка

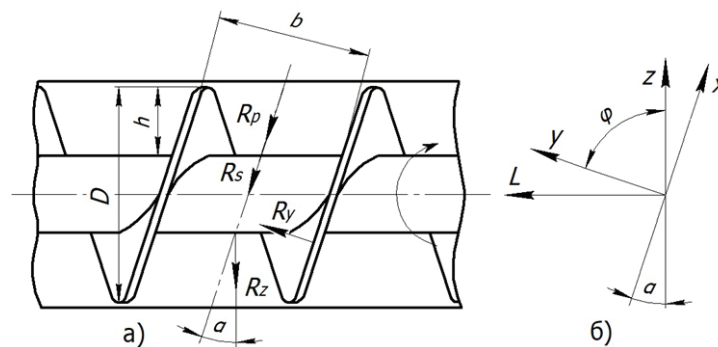


Рис. 2. Схема для розрахунку діючих сил що діють на шнеки: а) розподіл сил; б) векторний аналіз сил на осі x і y

– сила тертя, яка чинить опір просуванню сировини вздовж стінок шнека;
– тангенціальна сила тертя, спрямована уздовж циліндричної поверхні корпусу, яка виникає під час обертання матеріалу навколо осі шнека.

Загальна ефективність роботи преса безпосередньо залежить від збалансованості всіх цих сил, що зумовлює важливість точного інженерного розрахунку конструкційних параметрів і вибору потрібних режимів роботи шнекового прес екструдера. Тільки за комплексного підходу, що враховує як фізичні характеристики матеріалу, так і механіку взаємодії з обладнанням, можна забезпечити високу продуктивність, якість брикетів і довговічність машин.

Рівняння проєкцій сил на осі x і y мають такий вигляд:

$$dR_p + dR_s + (dR_z)_x = 0, \quad (1)$$

$$dR_y + (dR_z)_y = 0, \quad (2)$$

де $(dR_z)_x$, $(dR_z)_y$ – проєкції тангенціальної сили dR_z на осі x і y відповідно.

Після підстановки визначених параметрів у аналітичні вирази, що описують дію сил на елемент біомаси в каналі шнекового механізму, а також у результаті відповідних алгебраїчних і диференціальних перетворень, отримано узагальнене диференціальне рівняння, яке описує зміну тиску вздовж довжини робочого каналу шнека:

$$\frac{dp}{p} = \frac{f_s(2h + b + f_z b \sin \alpha) - f_z b \cos \alpha}{bh \sin \varphi} dL, \quad (3)$$

де p – тиск між витками шнека, Па; $b = \pi D \sin \varphi$ – ширина між витками шнеку, м;

L – довжина шнека, м;

D – діаметр витка, м;

φ – кут гвинтової лінії шнека, град.;

α – кут між площиною, яка перпендикулярна осі шнека, та між напрямком переміщення маси, град.;

f_s – коефіцієнт тертя біомаси об шнек;

f_z – коефіцієнт тертя біомаси об корпус.

Виконавши інтегрування обох частин отриманого диференціального рівняння за відповідними змінними, тобто інтегруючи ліву частину за координатою уздовж каналу шнека, а праву – за функцією тиску, з урахуванням заданих граничних умов можна отримати аналітичний вираз, що описує залежність тиску від довжини шнекового механізму.

$$p = p_0 \exp \left(\frac{f_s(2h + b + f_z b \sin \alpha) - f_z b \cos \alpha}{bh \sin \varphi} L \right), \quad (4)$$

Отримані рівняння встановлюють математичну залежність між тиском у робочому каналі шнекового механізму та його геометричною довжиною. Згідно з аналітичним розв'язанням, тиск у каналі має експоненційно зростаючий характер у напрямку від зони завантаження (бункера) до вихідного отвору (матриці), де формується брикет. Така залежність достовірна в рамках заданої моделі та прийнятих спрощень. При цьому продуктивність шнекових прес екструдерів прямо пропорційна низці конструктивно-технологічних параметрів, серед яких: лінійна швидкість транспортування біомаси витком шнеку, діаметр шнека, частота обертання валу, площі шагу витка, кут підйому спіралі, а також геометрична форма шнеку.

Було проведено серію дослідів із застосуванням змінних забірних шнеків із різним кроком витків, при цьому частота їх обертання становила 80 об/хв. Отримані результати занесли в табл. 1.

Таблиця 1

Результати досліджень показників якості брикетів

Маса брикету за 10 хв, кг.	29	24,3	17,1	12,5
Шаг шнеку, мм	90	70	50	40
Щільність брикету, т/м ³	0,9	1,2	1,23	1,28

Із досліджень бачимо, що спостерігається складна взаємозалежність між параметрами, що відповідають за якість і кількість продукції. Дослідно доказано, що за зміни геометричної параметрів каналу шнеку спостерігається зворотно-пропорційна тенденція: підвищення одного з параметрів сприяє збільшенню продуктивності, але водночас негативно впливає на якість брикету.

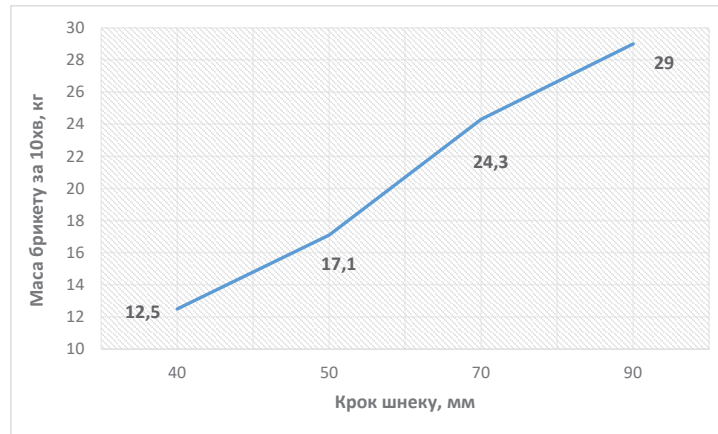


Рис. 3. Залежність продуктивності брикету від кроку завантажувального шнека

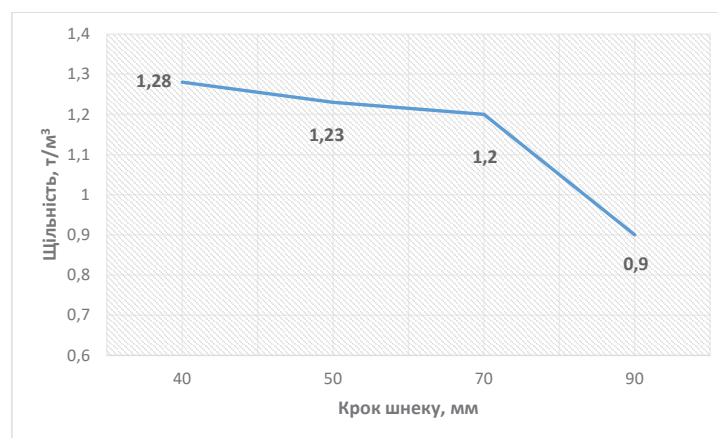


Рис. 4. Залежність щільності брикету від кроку завантажувального шнека

Таким чином, у конструктивній оптимізації важливо знайти баланс між часом, за який сировина проходить повний цикл, та якісними характеристиками кінцевого продукту. Із просуванням біомаси вздовж каналу шнека, що супроводжується поступовим зростанням контактної площі, відбувається нарощування загального стримуючого моменту. Такий ефект диференціації обертального руху спричиняє внутрішнє тертя між шарами біомаси та створює додатковий опір. Зокрема, у разі використання сировини з надмірним умістом олій можливе часткове ковзання маси по гвинтовій лінії шнека або навіть її реверсне зміщення. Це явище ускладнює стабільне ущільнення матеріалу та потребує оптимізації кроку витка шнеку. Із досліджень бачимо, що під час роботи з оліємісткою сировиною на розробленому нами пресовому обладнанні найкращий результат за співвідношенням якості та продуктивності був досягнутий за використання шнеку з кроком 70 мм.

Висновки. Із проведених досліджень можна зробити висновок, що в процесі шнекового брикетування оліємістка сировина захоплюється витком шнека і переміщується вздовж осі вала. Унаслідок цього виникає тертя між частинками біомаси та поверхнею зерної камери, а також обертовою поверхнею вала шнека. Однак продовження обертового руху обмежується силами тертя, які діють між біомасою та стінками корпусу. Це призводить до формування утримуючого моменту, що протидіє моменту, переданому від витка шнека, і забезпечує поступове ущільнення сировини. Таким чином, одним із головних чинників, що впливає на продуктивність та якість брикетів, є крок витків шнека преса.

Результати експериментальних досліджень доводять, що продуктивність та якість готового продукту напряму залежать від кроку шнека. Як показали дослідження для розробленого пресового обладнання, за використання як сировини відходів провіювання соняшнику найкращий результат за співвідношення якості та продуктивності отримано під час використання завантажувального шнеку з кроком 70 мм. Під час використання шнеків із більшим кроком відбувалося різке падіння щільності брикету до показника 0,9 т/м³, а за зменшення кроку – різке зниження продуктивності.

Список використаних джерел

1. Руденко Д.Т., Єременко О.І., Василенков В.Є. Дослідження в процесі брикетування рослинної біомаси шнековим механізмом. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3(17). С. 15–22.
2. Самохвал В.А., Самойчук К.О. Виготовлення паливних брикетів на пресі екструдерного типу. *Науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»*, 24 лютого 2023 р. ТДАТУ, 2023. С. 11.
3. Полянський О.С., Д'яконов В.І., Д'яконов О.В. Комплексна оцінка енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2018. Вип. 190. С. 192–202.
4. Гелетука Г.Г., Железна Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Ч. 1. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 3. № 3. С. 73–79.
5. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Перспективи використання біопалива з рослинної сировини. *Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової 34 індустрії»*, 3–4 листопада 2022 р. Черкаси, 2022. С. 158–161.
6. Alonge A.F. Extraction of vegetable oils from agricultural materials: A review. In *Proceedings of the 12th CIGR Section VI International Symposium. CIGR – International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering*, 2019. 1184–1206.
7. Palamarchuk I., Mushtruk M., Gudzenko M., Vasylyv V., Slobodyanyuk N., Kuts A., Nychyk O., Bober A., Salavor O. Mathematical modeling, of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. 14. 937–944. <https://doi.org/10.5219/1436>
8. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси / В.С. Бойко та ін. Київ : Проф. книга, 2021. С. 468.
9. Indartono Y.S., Heriawan H., Kartika I.A. Innovative and flexible single screw press for the oil extraction of Calophyllum seeds. *Research in Agricultural Engineering*. 2019. 65. 91–97.
10. Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Мотіль І.М., Госовський Р.Р. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. С. 138–146.
11. Єременко О.І., Лук'янець В.О. Дослідження та вдосконалення живильного пристрою перспективного брикетного преса. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 4. Т. 2. С. 146–156.
12. Лук'янець В.О., Субота С.В. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
13. Bălăţatu C., Mateescu M., Anghelache D., Tăbăraşu A. The importance of moisture in extracting oils from oilseeds. A review. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*. 2022. 2. 167–170.
14. Самохвал В.А., Самойчук К.О. Підвищення ефективності виробництва паливних брикетів з оліємістких сировин у шнекових прес-екструдерах. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2023»*, 18–19 травня 2023 р. Київ : Національний університет біоресурсів та природокористування України, 2023. С. 56–59.
15. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В. Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2018. № 20. С. 48.



16. Патент а202007249. Україна, МПК(2006): В30В.11/00, В30В 9/00, В27N 5/00 Шнековий прес-екструдер для виготовлення брикетів / патентовласник Самохвал Віталій Анатолійович – u202007249: заявлено. 13.11.2020: опубліковано. 18.05.2022. Бюл. № 20.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025

K. Samoichuk¹, V. Samokhval¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

STUDY OF THE PROCESS OF COMPACTION OF SUNFLOWER HULLING WASTE USING A SCREW PRESS EXTRUDER

Summary

A study of the process of compaction of plant biomass with a screw mechanism for the production of fuel briquettes was conducted. The identified patterns became the basis for determining the optimal parameters of the equipment. In the process of designing briquetting presses, it is necessary to take into account the peculiarities of biomass deformation, as well as changes in its physical properties at the moment of contact with the working bodies. The screw briquetting method has the advantage of combining the processes of transportation and compaction, which ensures continuous operation at a stable speed. An important factor is the time spent by the briquetted material in the molding chamber at a constant temperature. At the initial stage of the compaction process, stresses are formed in the raw material, which cause complex, nonlinear deformations. These deformations are accompanied by displacement and reorientation of biomass particles without significant changes in their internal structure. At the second stage, as the load increases, a critical combination of stresses is reached, at which an equilibrium is established between the internal resistance forces of the material and the external forces applied by the working bodies of the equipment. This equilibrium is unstable and precedes a phase transition in the briquette structure. At the final third stage, a further increase in load causes the development of plastic deformations, as a result of which biomass particles change their shape and fit tightly together, which ensures final compaction and the formation of a strong briquette structure. The theoretical analysis of the process made it possible to establish the dependence of pressure on the length of the working body. It was found that the pressure increases in the direction from the feed hopper to the forming section. The disadvantage of most screw equipment is that its throughput capacity decreases with increasing briquette density.

Keywords: oil, ripening, research, biomass, briquette, press, molding.