

УДК 621.226; 662.81; 631.572

**О. В. Березюк, д-р техн. наук, доц.; Т. І. Молодецька, канд. техн. наук;
О. В. Сердюк, канд. техн. наук; О. В. Пюнткевич, канд. техн. наук**

ЗАЛЕЖНІСТЬ БОКОВОГО ТИСКУ БРИКЕТУВАННЯ СОЛОМИ РІПАКУ ВІД ЇЇ ВОЛОГОСТІ ТА ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИМ ПРЕСОМ

Одним з альтернативних енергетичних ресурсів є біомаса, використання якої може суттєво допомогти у вирішенні проблеми нестачі первинних енергоносіїв в Україні. Донедавна значна частина стеблових рослинних відходів аграрного виробництва, лісопильної та деревообробної промисловості з багатьох причин не знаходять подальшого технологічного застосування.

Проведення утилізації відходів рослинного походження шляхом виготовлення з них різних видів твердого палива надає можливість економити на традиційних енергоресурсах, що є загальною тенденцією переходу промисловості до використання альтернативних, відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності виробництва в цілому. В статті наведено результати визначення регресійної залежності бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом за допомогою ротатабельного центрального композиційного планування експерименту методом Бокса-Уілсона другого порядку. Отримано адекватну регресійну залежність бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом. Адекватність регресійної моделі перевірялась за критерієм Фішера, а значимість коефіцієнтів регресії – за критерієм Стьюдента. Запропонована математична модель може бути використана для моделювання процесу пресування та під час проєктування привода пресування. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,99949, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів. За критерієм Стьюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на боковий тиск брикетування соломи ріпаку впливає тиск пресування гідравлічним пресом, а найменше – вологість. Побудовано поверхню відгуку цільової функції – бокового тиску брикетування соломи ріпаку в площині параметрів впливу, що дозволяє наглядно проілюструвати вказану залежність.

Ключові слова: *відходи рослинного походження, солома ріпаку, вологість, боковий тиск, брикетування, тиск пресування, гідравлічний прес, математичне моделювання, планування експерименту, багатофакторна залежність, фактори впливу, поверхня відгуку.*

Вступ

Одним з альтернативних енергетичних ресурсів є біомаса, використання якої може суттєво допомогти у вирішенні проблеми нестачі первинних енергоносіїв в Україні [1]. Донедавна значна частина стеблових рослинних відходів аграрного виробництва, лісопильної та деревообробної промисловості з багатьох причин не знаходять подальшого технологічного застосування [2]. Однак в умовах постійного зростання цін на енергоресурси та підвищеного попиту на екологічно чисті відновлювані джерела енергії, проведення утилізації відходів рослинного походження шляхом виготовлення з них різних видів твердого палива надає можливість економити на традиційних енергоресурсах, що є загальною тенденцією переходу промисловості до використання альтернативних, відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності виробництва в цілому [3]. У багатьох країнах відходи рослинного походження використовують для отримання енергії, оскільки теплова віддача палива, яке отримане з такої біомаси, цілком відповідає традиційному паливу. Одна тонна вугілля може бути замінена $4,2 \text{ м}^3$ таких відходів.

Постановка проблеми

Положення закону України "Про альтернативні джерела енергії" [4] визначають правові, економічні, екологічні та організаційні засади використання альтернативних джерел енергії та сприяння розширенню їх використання у паливно-енергетичному комплексі, зокрема зазначають, що енергія біомаси (в тому числі й відходи рослинного походження) є одним із різновидів альтернативних джерел енергії. В Україні потенціал відходів рослинного походження дозволяє щорічно одержувати при їхньому використанні енергетичний ефект, еквівалентний спалюванню більше ніж 1,5 млн. тонн вугілля. Проте використання деяких матеріалів у якості джерела енергії неможливе у їхньому первинному стані. Тому ці матеріали потрібно переробити шляхом брикетування щоб вони були придатні до використання у якості палива. Але неврахування впливу бокового тиску під час формування паливних брикетів із рослинних стеблових матеріалів може призвести до неточностей у розрахунках навантажень, які діють на формувальні робочі органи гідравлічного преса, і відповідно, енергозатрат, внаслідок чого підвищується вартість паливних брикетів [2]. Тому визначення залежності бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У лабораторних умовах досліджено [5] стисливість і міцність на зсув твердих побутових відходів (ТПВ). Випробування на ущільнення і сухе та несухе тривісне стиснення проводилися у відновлених зразках відходів великих розмірів і з різними питомими вагами насичених зразків і зразків, випробуваних при природному вмісті вологи.

Залежність тиску пресування ТПВ від параметрів процесу: відносної деформації та насипної густини без врахування початкової вологості ТПВ визначено в роботі [6].

Дослідження впливу відносної вологості ТПВ на процес їхнього пресування описано у науковій статті [7]. Визначено, що оптимальний вміст вологи під час пресування ТПВ складає 10...12 %. Більш високий вміст вологи в брикеті призводив до підвищення тривалості процесу пресування, більш низької густини брикету у внутрішньому шарі, більш низької міцності брикету, можливості розшарувань і здуттів. Перевагами низького вологовмісту є: відсутність прилипання частинок ТПВ до стінок матриці та більш однорідний розподіл густини по товщині брикету, для отримання якого використовується пресове обладнання з гідравлічним приводом [8 – 10].

Авторами роботи [11] визначено залежності густини ТПВ від вмісту вологи, сумісного зусилля і сезонних ефектів при ущільненні в лабораторних і польових умовах, а також проаналізовано механізми ущільнення відходів. Тривалість гідратації ТПВ 16...24 год призвела до більш рівномірних кривих ущільнення, ніж для відходів, ущільнених без гідратації.

У матеріалах статті [12] розглянуто можливість утилізації ТПВ на наявних комунальних ТЕЦ з генеруючою потужністю 12 МВт, що можуть працювати на енергетичному паливі (суміші ТПВ, зневоднених до 20 % відносної вологості та кам'яного вугілля з масовою часткою 16 %) із розрахунковою нижчою теплотою згорання 10,99 МДж/кг.

В науковій роботі [13] визначено, що вміст вологи і тиск ущільнення горючих компонентів ТПВ були двома ключовими параметрами для отримання якісних паливних брикетів, які мають теплотворну здатність не менше 20 МДж/кг, еквівалентну теплотворній здатності бурого вугілля, і можуть бути спалені разом із вугіллям на електростанціях. Дослідження проводились при кімнатній температурі без використання в'язучого при тиску 69...138 МПа і відносній вологості ТПВ 6...20 %, і дозволили встановити, що вміст вологи не повинен перевищувати 15 % для отримання високоякісних брикетів з суміші паперу та інших горючих матеріалів у ТПВ.

Установку для брикетування відходів деревообробної промисловості, що дозволяє

підвищити їхню питому теплоємність при використанні як твердого палива, запропоновано у статті [14]. Підвищення ступеня пресування досягається внаслідок застосування в установці вібраційного гідроприводу. Встановлено залежність між тиском пресування тирси та її відносною деформацією в процесі брикетування, яку використано для розробки математичної моделі, що дозволяє адекватно описувати процес вібраційного брикетування тирси і дозволяє визначити необхідну ефективну тривалість цього процесу.

Результати проведеного дослідження [15] показали, що перспективним методом утилізації деревних відходів є їх пресування у паливні брикети із використанням як зв'язуючої речовини натурального походження сульфатного мила – відходу який утворюється в процесі виварювання лізину із деревної маси в целюлозно-паперовому виробництві. Це дозволяє мінімізувати екологічну небезпеку від забруднення довкілля деревними відходами та відходами целюлозно-паперового виробництва, а також отримати якісне біопаливо. Використання зв'язуючої речовини дозволило знизити потужність двигуна на 40 %, а також збільшити густину отриманих паливних брикетів на 10 %. Тиск, завдяки якому відбувалося формування без додавання зв'язуючої речовини, становив понад 1 ГПа, з додаванням зв'язуючої речовини – від 500 до 990 МПа.

Технологічні режими виготовлення паливного брикету з ряду техногенних відходів, які за своїм агрегатним фізичному стану непридатні для безпосереднього використання в технологічних процесах і апаратах, розглянуто у статті [1]. Застосування розглянутої технології на практиці здатне повернути відходи промисловості у вигляді паливних брикетів. Такі брикети можна використовувати для всіх видів топок, в котлах будь-якої потужності – від опалення приватних будинків до великої ТЕЦ. Відзначено, що включення в енергообіг альтернативних джерел енергії може стати вагомим внеском у розв'язання проблеми дефіциту первинних енергоносіїв, поліпшивши при цьому екологічну обстановку країни.

У матеріалах роботи [16] обґрунтовано, що використання вживаної деревини (ВЖД) є альтернативним додатковим ресурсом сировини за умови утилізації та перероблення її на вироби з деревини: заготовки криволінійної форми, меблевий щит, столярну та стружкову плиту, а також паливні гранули та брикети. Розроблено методику розрахунку потенціалу ВЖД та його балансу за категоріями. Розраховано потенціал деревної біомаси – відходів деревини та ВЖД в Україні, який склав у 2012 р. 6,438 млн. т, зокрема ВЖД – 2,0 млн. т. На основі кластерного аналізу здійснено моніторинг ВЖД за обласними центрами України. Визначено основні фізико-механічні властивості отриманої продукції за розробленими технологіями. На основі одержаних математичних моделей встановлено закономірності впливу використання ВЖД на фізико-механічні показники одержаної продукції. Запропоновано режимні параметри для впровадження отриманих результатів досліджень у виробництво.

Авторами наукової статті [17] наведені результати дослідження процесу пресування біомаси з метою отримання паливних гранул, брикетів, зокрема визначено вплив тиску і температури пресування на щільність отриманого продукту. Результати проведених досліджень показали, що підвищення температури пресування вище (90 – 100) °С і тиску вище (120 - 140) МПа є недоцільним, оскільки мало впливає на збільшення щільності біопалива та призводить до збільшення енерговитрат на його виготовлення. Отримані результати можуть використовуватися для визначення оптимальних конструкційно-технологічних параметрів процесу пресування дисперсних матеріалів.

Результати розробки та систематизації технологічних основ виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів та композитів на їх основі узагальнені у монографії [18]. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентного композитного біопалива на основі рослинних відходів. Визначено вплив конструктивних параметрів фільєри матриці на якісні показники виготовленого біопалива та енергетичні характеристики пресового обладнання. Запропоновано та експериментально досліджено технологічні рішення виготовлення пелет поліпшеної якості з опалого листя, композитного палива на основі рослинних відходів і бурого вугілля, рослинних відходів і побутових відходів ПЕТФ.

Авторами статті [19] отримано регресійні залежності тиску пресування відходів деревини від коефіцієнта ущільнення як у вигляді поліномів шостого порядку, так і за допомогою степеневі функції. При цьому встановлено, що степенева функція забезпечує кращу достовірність апроксимації з меншою кількістю коефіцієнтів регресії. Визначено умови утворення брикетів достатньої міцності для транспортування та спалювання в енергетичних установках. Досліджено вплив щільності матеріалу тирси на тиск пресування.

Як свідчать дослідження, проведені в роботі [20], на щільність брикетів впливає в основному тиск пресування, що створюється в робочій камері преса чи формувальній головці, повинен створити зусилля рівне або більше зусиллю виштовхування брикету із формувальної головки. Останнє в основному залежить від форми та довжини робочого каналу, сил тертя, що визначаються зусиллями бокового тиску брикетів на стінки робочих каналів пресу. Із зміною осьового тиску в камері пресування буде змінюватися і боковий тиск, на величину та динаміку зміни якого значний вплив мають фізико-механічні властивості матеріалу.

Стаття [2] присвячена визначенню бокового тиску стеблових рослинних матеріалів на стінки камери пресування гідравлічним пресом. Описана методика проведення експериментальних досліджень та подані результати, встановлені залежності коефіцієнта бокового тиску для різних видів рослинних матеріалів, зокрема соломи ріпаку.

Однак конкретних багатofакторних регресійних залежностей бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є визначення регресійної бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом, що може бути використано для моделювання процесу пресування та під час проєктування привода пресування.

Методи і матеріали

Визначення регресійної залежності бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом проводилось за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уілсона [21]. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалась за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [22] і детально описана в роботах [23, 24].

Результати досліджень

У таблиці 1 показані значення бокового тиску брикетування соломи ріпаку для різних значень її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом, отриманих для розмірів частинок до 10 мм [2].

Таблиця 1

Значення бокового тиску брикетування соломи ріпаку для різних значень її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом [2]

Тиск пресування гідравлічним пресом, МПа	Боковий тиск, МПа, для різних значень вологості соломи ріпаку, %			
	9	12	16	20
10	5,18	4,66	3,67	3,47
30	14,55	13,17	11,96	11,64

Використовуючи планування експерименту за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, отримано таку регресійну залежність:

$$p_o = 1,531p - 0,5127w - 0,004652pw - 0,02588p^2 + 0,01351w^2 - 3,484 \quad [\text{МПа}], \quad (1)$$

де ρ – боковий тиск брикетування, МПа; p – тиск пресування гідравлічним пресом, МПа; w – вологість соломи ріпаку, %.

Перевірка адекватності регресійної моделі (1) проводилась за критерієм Фішера, за яким встановлено, що гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю.

Коефіцієнт кореляції склав 0,99949, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на боковий тиск брикетування соломи ріпаку впливає тиск пресування гідравлічним пресом, а найменше – вологість.

На рис. 1 показано поверхню відгуку цільової функції – бокового тиску брикетування соломи ріпаку p_{σ} в площині параметрів впливу, що дозволяє наглядно проілюструвати вказану залежність.

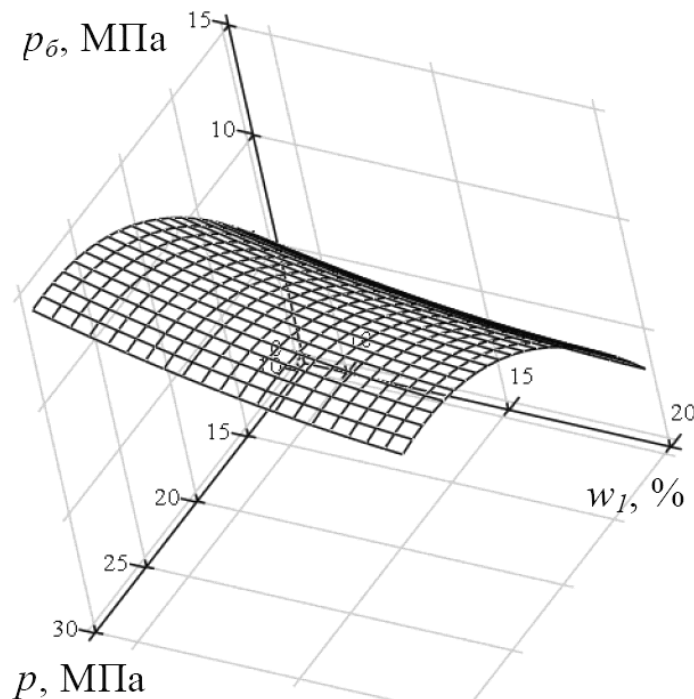


Рис. 1. Поверхня відгуку цільової функції – бокового тиску брикетування соломи ріпаку p_{σ} в площині параметрів впливу $p_{\sigma} = f(p, w)$

Висновки

Отримано адекватну регресійну залежність бокового тиску брикетування соломи ріпаку від її вологості та тиску пресування гідравлічним пресом, що може бути використана для моделювання процесу пресування та під час проектування привода пресування.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на боковий тиск брикетування соломи ріпаку впливає тиск пресування гідравлічним пресом, а найменше – вологість.

Побудовано поверхню відгуку цільової функції – бокового тиску брикетування соломи ріпаку в площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корчевський О. М., Сурженко А. М., Садовой М. І. Визначення раціональних параметрів для отримання багатокомпонентних брикетів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2014. № 2 (35). С. 9-15.
2. Кузенко Д. В., Левко С. І. Методика та результати експериментальних досліджень коефіцієнта бокового тиску рослинних матеріалів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2014. № 4, Т. 2. С. 174-182.

3. Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment / J. Vlasov et al. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2019. № 19 (3.2). P. 829-834.
4. Верховна Рада України. Закон України № 555-IV "Про альтернативні джерела енергії" 20 лютого 2003. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 23.10.2024).
5. Vilar O. M., Carvalhod M. F. Mechanical properties of municipal solid waste. *Journal of Testing and Evaluation*. 2004. Vol. 32, № 6. P. 438-449. <https://doi.org/10.1520/JTE11945>.
6. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 6. С. 23-28.
7. Gonopolsky A. M., Ermakova L. S., Patrikeev I. A. The influence of humidity on the process of pressing solid waste with a binder. *Natural and mathematical sciences in the modern world*. 2014. № 19. P. 82-84.
8. Піонткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 2. С. 83-90.
9. Іскович-Лотоцький Р. Д., Міськов В. П., Слабкий А. В. Динамічна та математична моделі вібропрес-молота з електрогідролічним керуванням. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2014. № 48. С. 3-10.
10. Піонткевич О. В. Вплив параметрів системи керування гідроприводом мобільної робочої машини на динамічні характеристики. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 2. С. 68-76.
11. Compaction characteristics of municipal solid waste / J. L. Hanson et al. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2010. Vol. 136, № 8. P. 1095-1102. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000324](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000324).
12. Рижий В. К., Римар Т. І., Тимофеев І. Л. Утилізація твердих побутових відходів на наявних комунальних ТЕЦ. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2011. № 712 : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. С. 17-22.
13. Li Y., Liu H., Zhang O. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel. *Fuel Processing Technology*. 2001. Vol. 74, № 2. P. 81-91. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00218-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00218-1).
14. Березюк О. В. Установка із вібраційним гідроприводом для брикетування відходів деревообробної промисловості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2007. № 4. С. 149-152.
15. Використання зв'язуючого натурального походження для удосконалення технології створення паливних брикетів із деревних відходів / М. С. Мальований та ін. *Водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* : колективна монографія. Київ : Яроченко Я. В., 2023. С. 91-105.
16. Гайда С. В. Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть* : міжвід. наук.-техн. зб. 2013. Вип. 39.1. С. 48-67.
17. Костюнін М., Карманов В., Михайлик В. Дослідження процесу пресування дисперсних матеріалів з метою отримання паливних гранул, брикетів. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарства України*. 2013. № 17 (2). С. 341-345.
18. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів : монографія / В. В. Клименко та ін. Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 162 с.
19. Експериментальне визначення необхідних умов і параметрів процесу та приводу пресування паливних брикетів з відходів деревини / В. І. Савуляк та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 5. С. 96-99.
20. Левко С. І. Огляд теорій процесу пресування. *Вісник Львів. НАУ «Агроінженерні дослідження»*. 2010. №15. С. 458-467.
21. Andersson O. *Experiment!: planning, implementing and interpreting*. John Wiley & Sons, 2012. 288 p.
22. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp"). Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 46876. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 21.12.2012.
23. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 6. С. 23-28.
24. Березюк О. В. Планування багатofакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 3 (55). С. 92-97.

Стаття надійшла до редакції 22.10.2024.

Стаття пройшла рецензування 24.12.2024.

Березюк Олег Володимирович – д-р техн. наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua.

Молодецька Тетяна Ігорівна – канд. техн. наук, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки.

Сердюк Ольга Валентинівна – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

Піонткевич Олег Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

Вінницький національний технічний університет.