

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

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЩІЛЬНОСТІ ТИРСИ ВІД РОЗМІРІВ ЇЇ ЧАСТИНОК ТА ТИСКУ ПРЕСУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИМ ПРЕСОМ

У процесі переробки деревини утворюються велика кількість відходів, які становлять понад 17 % енергетичного потенціалу біомаси України. Це дозволяє щорічно одержувати при їхньому використанні енергетичний ефект, еквівалентний спалюванню більше ніж 1,5 млн. тонн вугілля. В статті наведено результати визначення регресійної залежності щільності тирси від розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту методом Бокса-Уілсона другого порядку. Отримано адекватну регресійну залежність щільності тирси від розмірів її частинок 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 проектування привода пресування. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з 95 %-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав 0,95829, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів. За критерієм Стьюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на щільність тирси впливає тиск пресування гідравлічним пресом, а найменше – середній розмір частинок тирси. Побудовано поверхню відгуку цільової функції – щільності тирси в площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

Ключові слова: відходи деревини, тирса, щільність, розміри частинок, тиск пресування, гідравлічний прес, математичне моделювання, планування експерименту, багатofакторна залежність, фактори впливу, поверхня відгуку.

Вступ

Біомаса є одним з альтернативних джерел енергії, включення яких в енергообіг може стати вагомим внеском у розв'язання проблеми дефіциту первинних енергоносіїв в Україні [1]. У процесі переробки деревини утворюються велика кількість відходів. Понад 17 % енергетичного потенціалу біомаси України займає деревна біомаса. У сучасних умовах розвиток виробництва біопалива з відходів лісозаготівлі та лісопереробки є пріоритетним напрямком для лісозаготівельної промисловості, що обумовлено не лише прагненням лісозаготівельних підприємств до максимізації прибутку, а й загальною тенденцією переходу промисловості до використання альтернативних, відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності виробництва [2]. В Україні щорічно утворюється близько 50 млн. т відходів деревини, енергія яких еквівалентна 10...20 млрд. м³ природного газу [3]. У багатьох країнах відходи деревообробки використовують для отримання енергії, оскільки теплова віддача палива, яке отримане з деревної біомаси, цілком відповідає традиційному паливу. Одна тонна вугілля може бути замінена 4,2 м³ таких відходів.

Постановка проблеми

Закон України "Про альтернативні джерела енергії" [4] визначає правові, економічні, екологічні та організаційні засади використання альтернативних джерел енергії та сприяння розширенню їх використання у паливно-енергетичному комплексі, зокрема зазначає, що енергія біомаси (в тому числі й відходи та залишки лісового господарства) є одним із різновидів альтернативних джерел енергії. В Україні потенціал відходів деревини складає понад 6 млн. м³, що дозволяє щорічно одержувати при їхньому використанні енергетичний

ефект, еквівалентний спалюванню більше ніж 1,5 млн. тонн вугілля. Але 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. Тому визначення залежності щільності тирси від розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У матеріалах статті [5] в лабораторних умовах досліджено 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 за природного вмісту вологи.

Залежність між тиском пресування ТПВ та параметрами процесу: відносною деформацією та насипною густиною без врахування початкової відносної вологості ТПВ визначено в роботі [6].

У науковій статті [7] досліджено вплив відносної вологості ТПВ на процес їхнього пресування. Визначено оптимальний вміст вологи під час пресування ТПВ – 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, 9].

В матеріалах роботи [10] 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 статті [11] 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 роботі [12] 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 проводилися за кімнатної температури 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.

У статті [13] запропоновано установку для брикетування відходів деревообробної промисловості, що дозволяє підвищити їхню питому теплоємність при використанні як твердого палива. 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.

Дослідження [14] 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.

У статті [1] розглянуті технологічні режими виготовлення паливного брикету з ряду техногенних відходів, які за своїм агрегатним фізичному стану непридатні для безпосереднього використання в технологічних процесах і апаратах. 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.

В роботі [15] 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.

У статті [16] наведені результати дослідження процесу пресування біомаси, зокрема відходів деревини, 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.

У монографії [17] узагальнені результати розробки та систематизації технологічних основ виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів та композитів на їх основі. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентного композитного біопалива на основі рослинних відходів. Визначено вплив конструктивних параметрів філь'єри 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 [3] 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, однак вплив розмірів частинок тирси при цьому не враховувався.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є визначення регресійної залежності щільності тирси від розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом, що може бути використано для моделювання процесу пресування та під час проектування привода пресування.

Методи і матеріали

Визначення регресійної залежності щільності тирси від розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом проводилось за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту другого порядку методом Бокса-Уілсона [18]. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалась за допомогою розробленої комп'ютерної програми "PlanExp", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [19] і детально описана в роботах [20, 21].

Результати досліджень

У таблиці 1 показані значення щільності тирси сосни для різних розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом, отриманих за вологості сировини 7...10 % [2].

Таблиця 1

Значення щільності тирси сосни для різних розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом [2]

Тиск пресування гідравлічним пресом, МПа	Щільність тирси сосни, г/см ³ , для різних розмірів її частинок, мм				
	>5	3...5	2...3	0,5...2	<0,5
0	0,18	0,19	0,19	0,21	0,20
50	0,54	0,70	0,75	0,73	0,54
75	0,75	0,90	1,00	0,90	0,75
100	0,80	1,00	1,10	1,05	0,80
125	0,86	1,10	1,20	1,08	0,86
137,5	0,93	1,14	1,25	1,16	0,93
150	0,96	1,20	1,38	1,20	1,10

Використовуючи планування експерименту за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, після відкидання за критерієм Стюдента незначимого ефекту взаємодії, отримано таку регресійну залежність

$$\rho = 0,1479 + 0,01027 p + 0,06349d - 2,845 \cdot 10^{-5} p^2 - 0,01243d^2 \text{ [г/см}^3\text{]}, \quad (1)$$

де ρ – щільність тирси, г/см³; p – тиск пресування гідравлічним пресом, МПа; d – середній розмір частинок тирси, мм.

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 0,95829, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на щільність тирси впливає тиск пресування гідравлічним пресом, а найменше – середній розмір частинок тирси.

На рис. 1 показано поверхню відгуку цільової функції – щільності тирси ρ в площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

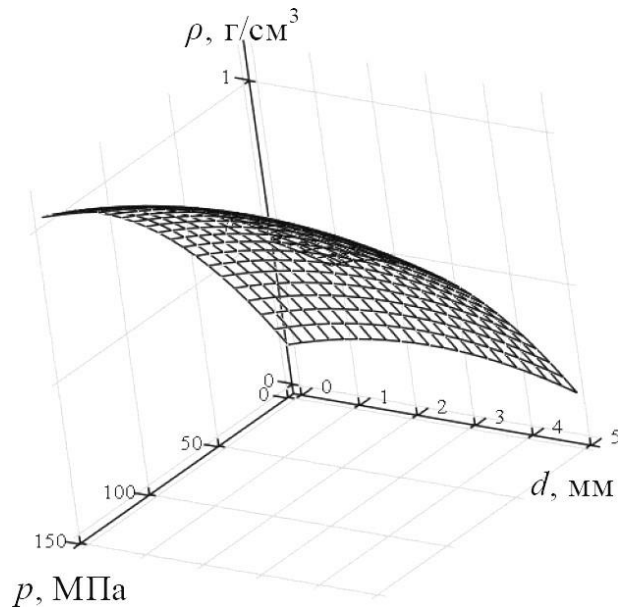


Рис. 1. Поверхня відгуку цільової функції – щільності тирси ρ в площині параметрів впливу $\rho = f(p, d)$

Висновки

Отримано адекватну регресійну залежність щільності тирси від розмірів її частинок та тиску пресування гідравлічним пресом, що може бути використано для моделювання процесу пресування та під час проектування привода пресування.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на щільність тирси впливає тиск пресування гідравлічним пресом, а найменше – середній розмір частинок тирси.

Побудовано поверхню відгуку цільової функції – щільності тирси в площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корчевський О. М. Визначення раціональних параметрів для отримання багатокомпонентних брикетів / О. М. Корчевський, А. М. Сурженко, М. І. Садовой // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2014. – № 2 (35). – С. 9 – 15.
2. Vlasov J., Bogatova E., Iliushenko D. [et al.] Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. – 2019. – № 19 (3.2). – P. 829 – 834.
3. Савуляк В. І., Березюк О. В., Пурдик В. П. [та ін.] Експериментальне визначення необхідних умов і параметрів процесу та привода пресування паливних брикетів з відходів деревини / // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 96 – 99.
4. Верховна Рада України. Закон України № 555-IV "Про альтернативні джерела енергії" [Електронний ресурс] 20 лютого 2003. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>.
5. Vilar O. M. Mechanical properties of municipal solid waste / O. M. Vilar, M. F. Carvalhod // 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" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 23 – 28.
7. Gonopolsky A. M. The influence of humidity on the process of pressing solid waste with a binder / A. M. Gonopolsky, L. S. Ermakova, I. A. Patrikeev // 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 / О. В. Піонткевич // Вісник машинобудування та транспорту, 2015. – № 2. – С. 83 – 90.
9. Kozlov L., Polishchuk L., Piontkevych O. [et al.] Optimization of Design Parameters of a Counterbalance Valve for a Hydraulic Drive Invariant to Reversal Loads // Mechatronic Systems, W. Wójcik, S. Pavlov and M. Kalimoldayev, eds. – Vol. 1. – Routledge, London, 2021. – P. 137 - 148. – DOI: 10.1201/9781003224136-12.

10. Hanson J. L., Yesiller N., Stockhausen S. A. Von [et al.] Compaction characteristics of municipal solid waste // 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).
11. Рижий В. К. Утилізація твердих побутових відходів на наявних комунальних ТЕЦ / В. К. Рижий, Т. І. Римар, І. Л. Тимофєєв // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 712 : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – С. 17 – 22.
12. Li Y. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel / Y. Li, H. Liu, O. Zhang // 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).
13. Березюк О. В. Установка із вібраційним гідроприводом для брикетування відходів деревообробної промисловості / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 4. – С. 149 – 152.
14. Мальований М. С., Вронська Н. Ю., Тимчук І. С. [та ін.] Використання звязуючого натурального походження для удосконалення технології створення паливних брикетів із деревних відходів // Водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг : колективна монографія. – Київ : Яроченко Я. В., 2023. – С. 91 – 105.
15. Гайда С. В. Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні / С. В. Гайда // Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть: міжвід. наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 39.1. – С. 48 – 67.
16. Костюнін М. Дослідження процесу пресування дисперсних матеріалів з метою отримання паливних гранул, брикетів / М. Костюнін, В. Карманов, В. Михайлик // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – 2013. – № 17 (2). – С. 341 – 345.
17. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія / [В. В. Клименко, В. І. Кравченко, В. М. Боков та ін.]. – Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 162 с.
18. Andersson O. Experiment!: planning, implementing and interpreting / O. Andersson. – John Wiley & Sons, 2012. – 288 p.
19. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Планування експерименту" ("PlanExp") / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 46876 // власник свідоцтва О. В. Березюк. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації: 21.12.2012.
20. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми "PlanExp" / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 23 – 28.
21. Березюк О. В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 3 (55). – С. 92 – 97.

Стаття надійшла до редакції 09.06.2024.

Стаття пройшла рецензування 24.06.2024.

Березюк Олег Володимирович – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: [berezukoleg@i.ua](mailto:berezyukoleg@i.ua).

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

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

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

Вінницький національний технічний університет.