

УДК 621.226; 674.81

**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 ТИСКУ РУЙНУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ БРИКЕТІВ ВІД ВМІСТУ ТИРСИ ТА ПАРАМЕТРІВ БРИКЕТУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИМ ПРЕСОМ

Одним з альтернативних джерел енергії є біомаса, включення якої в енергообіг може стати суттєвим внеском у розв'язання проблеми дефіциту первинних енергоносіїв в Україні. Під час процесу деревообробки утворюється значний обсяг відходів, що становлять понад 17 % від енергетичного потенціалу біомаси України. Це дозволяє щорічно включати в енергообіг альтернативні джерела енергії та одержувати при їхньому використанні енергетичний ефект, еквівалентний спалюванню більше ніж 1,5 млн. тонн вугілля.

В статті наведено результати визначення регресійної залежності тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом за допомогою ротатбельного центрального композиційного планування експерименту методом Бокса-Уілсона другого порядку. Отримано адекватну регресійну залежність тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування 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 брикетування. Встановлено, що за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність отриманої регресійної моделі можна вважати правильною з достовірністю 95 %. Коефіцієнт кореляції склав 0,97645, що свідчить про достатню достовірність отриманих результатів. За критерієм Стьюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на тиск руйнування багатокомпонентних брикетів впливає вміст тирси, а найменше – тривалість брикетування. Побудовано поверхні відгуку цільової функції – тиску руйнування багатокомпонентних брикетів в площині параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

Ключові слова: *багатокомпонентний брикет, відходи деревини, тирса, тиск руйнування, параметри брикетування, гідравлічний прес, математичне моделювання, планування експерименту, багатофакторна залежність, фактори впливу, поверхня відгуку.*

Вступ

Одним з альтернативних джерел енергії є біомаса, включення якої в енергообіг може стати суттєвим внеском у розв'язання проблеми дефіциту первинних енергоносіїв в Україні [1]. Під час процесу деревообробки утворюються значний обсяг відходів. Понад 17 % енергетичного потенціалу біомаси України займає деревна біомаса. На сьогодні 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]. На території України 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 тепла віддача палива, яке отримане з деревної біомаси, цілком відповідає традиційному паливу [4]. Наприклад, одна тонна вугілля може бути замінена 4,2 м³ таких відходів.

Постановка проблеми

Положення закону України "Про альтернативні джерела енергії" [5] визначають правові, економічні, екологічні та організаційні засади використання альтернативних джерел енергії та сприяння розширенню їхнього 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. У нашій країні 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. Проте використання деяких матеріалів як джерела енергії неможливе у їхньому первинному стані. Тому ці матеріали потрібно переробити шляхом брикетування, щоб вони були придатні до використання у якості палива. Виробництво багатокомпонентних брикетів (вугільна складова – антрацит, рослинна складова – тирса, рідке в'язуче – лигносульфонат) пов'язано з деякими труднощами із-за суперечливих вимог до технологічних режимів брикетування кожного окремого його компоненту, а також розходження в структурно-механічних властивостях компонентів, зокрема модуля пружності. Знизити негативний ефект цього явища можуть технологічні операції, що переводять пружні деформації частинок рослинних відходів у пластичні. Однією з цих операцій може бути пропарювання рослинної складової шихти (тирси) за підвищеної температури [1]. Тому визначення залежності тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Матеріали статті [6] містять результати досліджень в лабораторних умовах стисливості та міцності на зсув твердих побутових відходів (ТПВ). Випробування на ущільнення і сухе та несухе тривале стиснення проводилися у відновлених зразках відходів великих розмірів і з різними питомими вагами насичених зразків і зразків, випробуваних за природного вмісту вологи.

Регресійну залежність між тиском пресування ТПВ та параметрами процесу: відносною деформацією та насипною густиною без врахування початкової відносної вологості ТПВ, визначено в роботі [7].

У матеріалах наукової статті [8] досліджено вплив відносної вологості ТПВ на процес їхнього пресування. Визначено, що оптимальний вміст вологи під час пресування ТПВ складає 10...12%. В той же час, 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. До переваг низького вологовмісту віднесено: відсутність прилипання частинок ТПВ до стінок матриці та більш однорідний розподіл густини за товщиною брикету, для отримання якого застосовується пресове обладнання з гідроприводом [9, 10].

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

У науковій статті [12] розглянуто можливість утилізації ТПВ на наявних комунальних ТЕЦ [13] 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.

Авторами роботи [14] встановлено, що вміст вологи та 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 за кімнатної температури без використання в'язучого при тиску 69...138 МПа і відносній вологості ТПВ 6...20 %, і дозволили встановити, що вміст води не повинен перевищувати 15 % для отримання високоякісних брикетів з суміші паперу та інших горючих матеріалів у складі ТПВ.

Установку для брикетування відходів деревообробної промисловості, що дозволяє підвищити їхню питому теплосмність при використанні як твердого палива, запропоновано у статті [15]. Підвищення ступеня пресування досягається застосуванням в установці вібраційного гідроприводу. Встановлено регресійну залежність між тиском пресування тирси та її відносною деформацією в процесі брикетування, яку використано під час розробки математичної моделі, що дозволяє адекватно описувати процес вібраційного брикетування тирси та визначити необхідну ефективну тривалість цього процесу.

Результати дослідження, опубліковані в роботі [16] показали перспективність методу утилізації деревних відходів шляхом їх пресування у паливні брикети із використанням як в'язучої 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 в'язучої речовини дозволило знизити потужність двигуна на 40 %, а також збільшити густину отриманих паливних брикетів на 10 %. Тиск, завдяки якому відбувалося формування брикету без додавання в'язучої речовини, становив понад 1 ГПа, з додаванням в'язучої речовини – 0,5...0,99 ГПа.

Технологічні режими виготовлення паливного брикету з ряду техногенних відходів, які за своїм агрегатним фізичному стану непридатні для безпосереднього використання в технологічних процесах і апаратах, розглянуті 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 України.

У матеріалах роботи [17] обґрунтовано використання вживаної деревини (ВЖД) як альтернативного додаткового ресурсу 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 промислове виробництво.

Результати дослідження процесу пресування біомаси, зокрема відходів деревини, з метою отримання паливних гранул, брикетів, зокрема вплив тиску і температури пресування на щільність отриманого продукту, наведені у статті [18]. 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 під час визначення оптимальних конструкційно-технологічних параметрів процесу пресування дисперсних матеріалів, зокрема у брикети.

У матеріалах монографії [19] узагальнені результати розробки та систематизації технологічних основ виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів та композитів на їхній основі. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентного

композитного біопалива на основі рослинних відходів. Визначено вплив конструктивних параметрів філь'ери 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 поліетилентерефталату (ПЕТФ).

У науковій статті [3] авторами 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, що обумовило проведення подальших досліджень.

У статті [20] 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.

Однак конкретних математичних залежностей тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом в результаті аналізу відомих літературних джерел авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є визначення регресійної залежності тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом, що може бути використано для моделювання процесу брикетування та під час проектування привода брикетування.

Методи і матеріали

Визначення регресійної залежності тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування 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 [7, 23].

Результати досліджень

У таблиці 1 показані значення тиску руйнування багатокомпонентних брикетів на основі антрациту для різних значень вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом, при тиску пресування 25 МПа, що відповідає тиску в промислових вальцьових пресах, та вмісту рідкого в'язучого – лигносульфонату 7,6 % [19].

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

$$p = -2,029C_T + 0,04477t + 0,08669\tau - 0,001943C_T t - 0,01153C_T \tau + 0,001728t\tau + 0,1601C_T^2 - 2,7 \cdot 10^{-5}t^2 - 0,007033\tau^2 \text{ [МПа]}, \quad (1)$$

де p – тиск руйнування, МПа; C_T – вміст тирси, %; t – температура брикетування, °С; τ – тривалість брикетування, хв.

Таблиця 1

Значення тиску руйнування багатокомпонентних брикетів на основі антрациту для різних значень вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом [19]

№	Вміст тирси 5 %			Вміст тирси 10 %		
	Параметри брикетування		Тиск руйнування, МПа	Параметри брикетування		Тиск руйнування, МПа
	температура, °С	час, хв		температура, °С	час, хв	
1	175	10	1,80	175	10	1,50
2		15	2,43		15	1,75
3		20	3,12		20	1,95
4	200	10	2,85	200	10	1,89
5		15	3,74		15	3,08
6		20	4,66		20	3,62
7	225	10	3,81	225	10	3,12
8		15	5,59		15	4,25
9		20	5,38		20	4,09

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

Коефіцієнт кореляції склав 0,97645, що свідчить про достатню достовірність одержаних результатів.

За критерієм Стюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на тиск руйнування багатокомпонентних брикетів впливає вміст тирси, а найменше – тривалість брикетування.

На рис. 1 показано поверхні відгуку цільової функції – тиску руйнування багатокомпонентних брикетів p в площинах параметрів впливу, що дозволяє наочно проілюструвати вказану залежність.

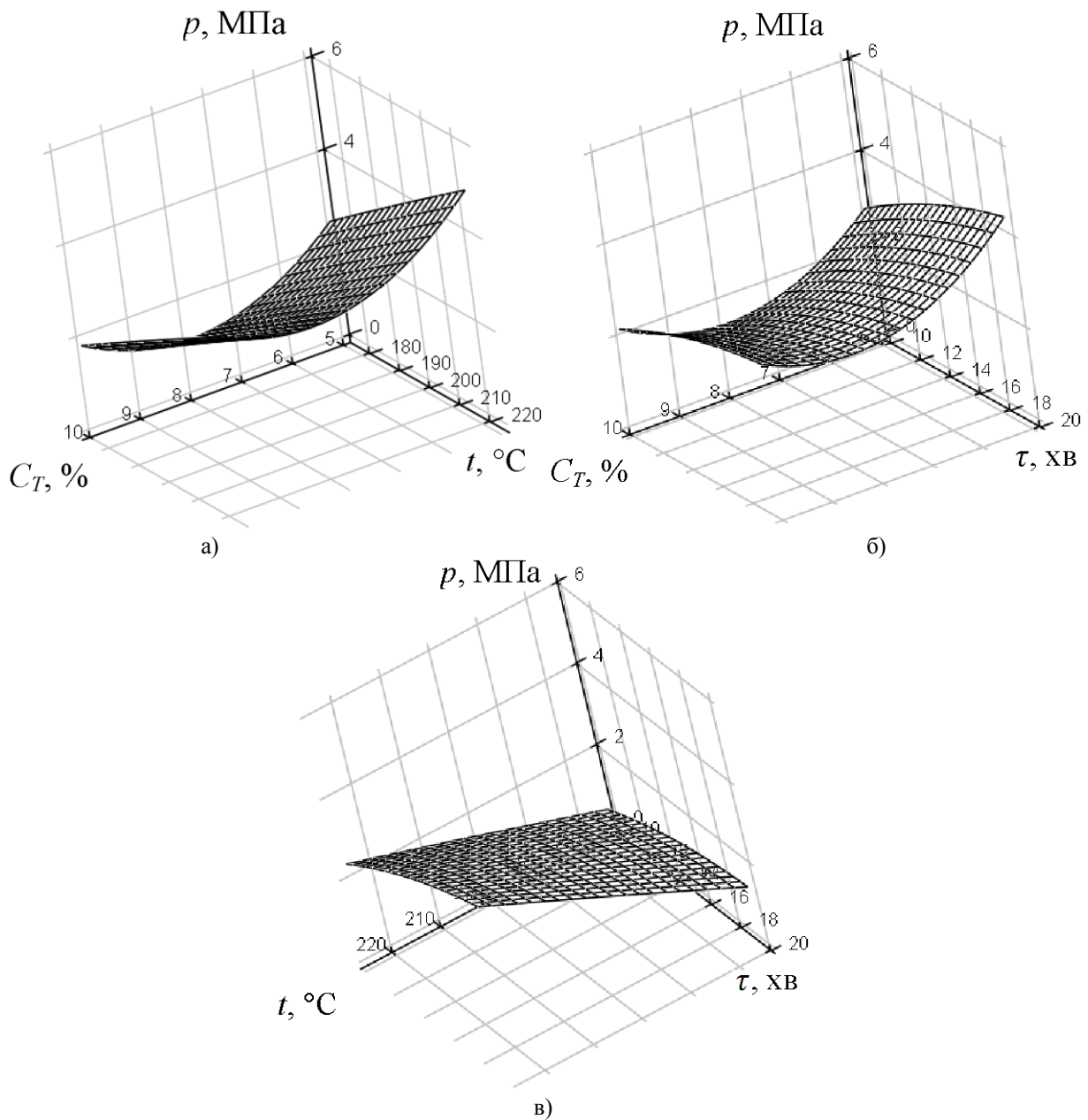


Рис. 1. Поверхні відгуку цільової функції – тиску руйнування багатокомпонентних брикетів p в площинах параметрів впливу: а) $p = f(C_T, t)$; б) $p = f(C_T, \tau)$; в) $p = f(t, \tau)$

Висновки

Отримано адекватну регресійну залежність тиску руйнування багатокомпонентних брикетів від вмісту тирси та параметрів брикетування гідравлічним пресом, яка може бути використана для моделювання процесу брикетування та під час проектування привода брикетування.

За критерієм Стьюдента визначено, що серед досліджених факторів впливу найбільше на тиск руйнування багатокомпонентних брикетів впливає вміст тирси, а найменше – тривалість брикетування.

Побудовано поверхні відгуку цільової функції – тиску руйнування багатокомпонентних брикетів 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. Study of briquetting of woodworking waste with industrial press equipment / J. Vlasov, E. Bogatova, D. Pliushenko [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. – 2019. – № 19 (3.2). – P. 829 – 834.
3. Експериментальне визначення необхідних умов і параметрів процесу та приводу пресування паливних брикетів з відходів деревини / В. І. Савуляк, О. В. Березюк, В. П. Пурдик [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 96 – 99.
4. Березюк О. В. Поширеність спалювання твердих побутових відходів з утилізацією енергії / О. В. Березюк, М. С. Лемешев // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві : науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2017. – № 2 (23). – С. 128 – 132.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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.
8. The influence of humidity on the process of pressing solid waste with a binder / A. M. Gonopolsky, L. S. Ermakova, I. A. Patrikeev [et al.] // Natural and mathematical sciences in the modern world. – 2014. – № 19. – P. 82 – 84.
9. Поліщук Л. К. Аналіз впливу параметрів системи керування на динамічні процеси гідропривода стрічкового конвеєра / Л. К. Поліщук, О. В. Піонткевич, О. О. Коваль // Промислова гідраліка і пневматика. – 2016. – №2 (52). – С. 37 – 48.
10. Піонткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном / О. В. Піонткевич // Вісник машинобудування та транспорту, 2015. – № 2. – С. 83 – 90.
11. Compaction characteristics of municipal solid waste / J. L. Hanson, N. Yesiller, S. A. Von Stockhausen [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. 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.
13. Ковальський В. П. Дослідження перспективи використання золи виносу в будівництві / В. П. Ковальський, В. О. Тимошенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2023. – № 34 (1). – С. 36 – 42.
14. 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).
15. Березюк О. В. Установка із вібраційним гідроприводом для брикетування відходів деревообробної промисловості / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 4. – С. 149 – 152.
16. Використання звязуючого натурального походження для удосконалення технології створення паливних брикетів із деревних відходів / М. С. Мальований, Н. Ю. Вронська, І. С. Тимчук [та ін.] // Водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг : колективна монографія. – Київ : Яроченко Я. В., 2023. – С. 91 – 105.
17. 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.
18. 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.
19. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія / [В. В. Клименко, В. І. Кравченко, В. М. Боков, В. І. Гуцул]. – Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 162 с.
20. Сурженко А. М. Визначення раціональних параметрів для отримання багатокомпонентних брикетів / А. М. Сурженко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2014. – № 1-2. – С. 28 – 34.

21. Andersson O. Experiment!: planning, implementing and interpreting / O. Andersson. – John Wiley & Sons, 2012. – 288 p.
22. 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.
23. 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 06.09.2024.

Стаття пройшла рецензування 28.09.2024.

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.