

А. П. Ранський¹
Б. В. Коріненко^{1,2}
О. А. Гордієнко¹
В. О. Євдокименко²

АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА: ОТРИМАННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ ІЗ ПІРОКАРБОНУ ТЕРМОДЕСТРУКЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України, Київ

Проведено аналіз можливостей використання відновлюваних джерел енергії та біомаси в Україні для виробництва альтернативного палива — паливних брикетів. Показано, що Україна має великі запаси відновлюваних джерел енергії та біомаси: потенціал енергії з біомаси складає 23 млн т нафтового еквіваленту, що достатньо для заміщення всього імпорту газу, вугілля та бензину. Наведена калорійність (теплота згоряння) деяких різновидів паливних брикетів, палив та твердих побутових відходів. Зазначено, що для отримання паливних брикетів можуть бути використанні різні комбінації промислових та побутових відходів: відходи деревообробки, паперові відходи, гофрокартон, відходи переробки сланців, вугільний пил тощо. Це дозволяє як отримати паливні брикети з високою тепловою здатністю, так і покращити екологічний стан навколишнього середовища.

Описана загальна методика виготовлення паливних брикетів з альтернативних твердих палив (гофрокартону, тирси деревини) та пірокарбону, який отримано при низькотемпературному піролізі полімерних відходів. Розроблено технологію холодного пресування дослідженої шихти з подальшим висушуванням отриманих брикетів до постійної маси. Процес грудкування вихідних компонентів здійснювали за температури 20...25 °С без додаткового нагрівання шихти і введення органічних або неорганічних в'язучих, що призводило б до зростання ціни на готову продукцію або зменшення калорійності отриманих паливних брикетів. Калориметричним методом визначено теплоту згоряння розроблених паливних брикетів різного складу. Встановлено, що використання суміші гофрокартону та тирси деревини в кількості 40...60% мас. дозволяє отримати висококалорійні паливні брикети з пірокарбону. Встановлено, що максимальну теплоту згоряння (4715,5 кКал/кг) мають паливні брикети, що містять пірокарбон, гофрокартон та тирсу деревини у співвідношенні 6 : 2 : 2. Запропоновані галузі ефективного використання отриманих паливних брикетів.

Ключові слова: паливні брикети, пірокарбон, гофрокартон, тирса деревна, альтернативні палива.

Вступ і постановка задачі

Кабінетом Міністрів України 18.08.2017 р. схвалена Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентноспроможність» [1], що спрямована не лише на зниження енергоємності промислових виробництв, а і на послідовне збільшення використання всіх видів відновлюваної енергетики, як одного із головних чинників гарантії енергетичної безпеки країни. Згідно з цією стратегією 25% від загального первинного постачання енергії припадатиме на відновлювану енергетику. Зокрема це стосується використання біомаси для виробництва електроенергії. За даними Державної служби статистики України загальне постачання енергії від відновлюваних джерел у 2020 р. становило 5687 тис. т нафтового еквіваленту (н. е.), тобто 6,6% від загального постачання первинної енергії, зокрема енергія біопалива та відходів — 4243 тис. т н. е. (4,9%) [2]. Тоді як частка відновлюваної енергетики в загальному

виробництві електроенергії сягає до 25 % у розвинених країнах світу та до 35 % в європейських країнах [3]. Постачання первинної енергії з біомаси та біопалива у країнах Євросоюзу становить близько 11 % загального постачання первинної енергії, що складає 65 % загального внеску всіх відновлюваних джерел енергії [4]. При цьому слід зазначити, що за оцінкою Біоенергетичної асоціації України (UABIO) станом на 2018 р. (табл. 1) потенціал енергії з біомаси становив 23 млн т н. е., що достатньо для заміщення всього імпорту газу, вугілля та бензину [5]. Основними складовими цього потенціалу є побічні продукти рослинництва (табл. 1, п. п. 1—5; загалом 10 млн т н. е., або 44 %) та енергетичні культури (п. 8, п. 9; загалом 7,5 млн т н. е., або 33 %). Перспективним в майбутньому вважається використання лушпиння соняшника (п. 5) та деревної біомаси (п. 6), адже в Україні уже в 2020 р. ці види біомаси використовувались на понад 90 %.

Таблиця 1

Вид біомаси та її теоретичний потенціал в біоенергетиці України [5]

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики	
		частка теоретичного потенціалу, %	млн т н. е. **
1. Солома зернових	32,8	30	3,36
2. Солома ріпаку	4,9	40	0,68
3. Кукурудза (стебла, стрижні)	46,5	40	3,56
4. Соняшник (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
5. Вторинні сільськогосподарські відходи (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
6. Деревна біомаса (дрова, деревні відходи, тирса)	8,8	96	2,06
7. Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг)	8,8	45	1,02
8. Енергетичні культури: верба, тополя, міскантус (1 млн га)*	11,3	100	4,88
9. Енергетичні культури: кукурудза на біогаз (1 млн га)*	3,0 млрд м ³ СН ₄	100	2,58
10. Біодизель (з ріпаку)	—	—	0,39
11. Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряка)	—	—	0,82
12. Біогаз із агровідходів	1,6 млрд м ³ СН ₄	50	0,68
13. Біогаз із полігонів твердих побутових відходів	0,6 млрд м ³ СН ₄	34	0,18
14. Біогаз зі стічних вод	1,0 млрд м ³ СН ₄	23	0,19
Всього	—	—	23

Примітки: * — за умови вирощування на 1 млн га незадіяних сільськогосподарських земель;

** т н.е. — тонна нафтового еквівалента.

Таким чином, подані в табл. 1 дані вказують на те, що Україна має великі запаси біомаси (п. п. 1—7), які можна ефективно використовувати для промислового виготовлення альтернативних палив: паливних брикетів або паливних пелет. Крім того, відповідно до Закону України № 1391-XIV від 14.01.2020 р. «Про альтернативні види палива» до альтернативних видів твердого палива відносяться тверді побутові (папір, деревина, гофрокартон) та промислові (пластик, текстиль) відходи, які в нашій країні не переробляються і, в кращому випадку, спалюються для отримання теплової або електричної енергії [6]. Ці альтернативні види палива також можна ефективно використовувати для отримання паливних брикетів з покращеною теплотворною здатністю. Можливість їхнього ефективного використання для промислового виробництва паливних брикетів підтверджується даними їхньої теплоти згоряння (табл. 2).

Паливні брикети (табл. 2, п. п. 1.2, 1.4—1.6) з різної біологічної сировини є дешевими, однак за теплою згоряння суттєво поступаються іншим видам палив (п. п. 2.1—2.4), а паливні брикети на основі вугілля (п. 1.1) мають майже таку ж теплоту згоряння, що і деякі види твердих побутових відходів (п. п. 3.1—3.4). Підвищити теплоту згоряння паливних брикетів з тирси (Т) в 1,2 раза можна, до прикладу, шляхом змішування її з бурим вугіллям (В) та біовугіллям (БВ) в співвідношенні В : Т = 6 : 3 : 1 [11]. Тобто, для підвищення теплотворної здатності паливних брикетів можуть бути використанні самі різні комбінації альтернативних палив: відходи деревообробки, паперові відходи, гофрокартон, торф, відходи переробки сланців, вугільний пил тощо [12]—[17]. Якщо такі складові невеликі за розмірами, то для підвищення ефективності згоряння їх груднують (агломе-

рують, брикетують), використовуючи при цьому, крім альтернативних видів палив, органічні або неорганічні в'язучі речовини [18]—[20]. В'язучі речовини повинні бути нетоксичними, недефіцитними, досить дешевими та стійкими до впливу різних атмосферних чинників. Органічні в'язучі технологічніші, оскільки за їхнього використання не зменшується калорійність паливних брикетів. Найпоширенішими органічними в'язучими для брикетування є: лігносульфати, лігносульфонати, сульфітно-спиртова барда, меляса, карбоксиметилцелюлоза, епоксидні та поліефірні смоли. Брикетування з в'язучими матеріалами — це найуніверсальніший процес грудкування, який дозволяє використовувати для отримання паливних брикетів практично будь-які тверді речовини. Використання для виготовлення паливних брикетів малозатребуваної органічної сировини дає можливість не лише суттєво підвищити ефективність їхнього згорання, а і покращити екологічний стан довкілля [21].

Таблиця 2

Теплотворна здатність паливних брикетів, деяких палив та компонентів твердих побутових відходів

Найменування	Вологість, %	Нижча теплота згорання		Література
		МДж/кг	кКал/кг	
1. Паливні брикети на основі				
1.1 вугілля	—	< 29,0	< 6926	[7]
1.2 деревина	3,3	18,16	4337	[8]
	3,5	17,00	4060	[9]
1.3 торфу	—	< 17,0	< 4060	[7]
1.4 лущиння соняху	8,3	17,20	4108	[8]
	11,3	16,60	3970	[9]
1.5 соломи злаків	7,0	16,15	3857	[8]
1.6 щепи деревної	24,8	13,70	3272	[9]
2. Деякі види палив				
2.1 біодизель	0,0	37,30	8909	[9]
2.2 метан (CH ₄)/м ³	0,0	35,00	8360	[7]
2.3 деревне вугілля	—	27,00	6449	[7]
2.4 біоетанол	0,3	26,10	6234	[9]
2.5 деревина	10,0	< 25,0	< 5971	[7]
2.6 солома	—	15,00	3583	[7]
3. Деякі види твердих побутових відходів				
3.1 шкіряні вироби	—	31,1	7428	[10]
3.2 пластик	0,0	27,4	6544	[10]
3.3 гумово-технічні вироби	0,0	31,1	7428	[10]
3.4 текстиль	—	27,0	6449	[7]

Мета роботи — теоретично обґрунтувати та експериментально розробити методи виготовлення паливних брикетів на основі комплексного використання альтернативних видів твердого палива (гофрокартон, тирса деревна) та пірокарбону, як продукту низькотемпературного піролізу полімерних відходів, а також дослідити їхню теплотворну здатність та запропонувати для галузі можливого практичного використання.

Експериментальна частина

Як вихідні компоненти для виготовлення паливних брикетів (ПБ) використовувались:

- відпрацьований гофрокартон (ГК) виробництва ПАТ «Київський паперово-картонний комбінат» (м. Обухів), попередньо подрібнений до розмірів 5×20 см;
- тирса деревна (ТД) листяних порід деревини розміром до 2,5 мм та вологістю у діапазоні 5...20% мас. Тирсу з вологістю ≈ 44% мас. висушували за температури 60 °С в сушильній шафі з примусовою вентиляцією;
- пірокарбон (П) — твердий продукт термодеструкції полімерних відходів [22];
- деревне вугілля (ДВ) виробництва компанії «Biogrill» (м. Вінниця).

Підготовлену шихту пресували на гідравлічному пресі МС-500. Для брикетування використовували прес-форму розміром 95×95 мм. Висота готового брикету складала 95 мм.

Загальна методика виготовлення паливних брикетів. В ємність на 20 л завантажували 1,0 кг подрібненого (5×20 см) гофрокартону, 12,0 л технічної води та залишали суміш для набухання на

24 год. Після цього в апарат змішування завантажували отриману водно-гофрокартонну суміш, 2,0 кг пірокарбону, 1,0 кг деревної тирси та перемішували суміш з використанням електромеханічного приводу до однорідної шихти чорно-сірого кольору. Отриману шихту порціями завантажували в прес-форму і за допомогою гідравлічного преса МС-500 пресували її до отримання паливних брикетів. Останні вивантажували з прес-форми та висушували до постійності маси.

Визначення теплотворної здатності паливних брикетів проводили калориметричним методом відповідно до ДСТУ ISO 1928:2006 [23]. З кожного зразка відбирали частину, яку потім ретельно подрібнювали та висушували в лабораторних умовах щонайменше три доби до повітряно-сухого стану. Дослідження теплотворної здатності отриманих зразків проводили під час їхнього спалювання під тиском 2,5...3,0 МПа в атмосфері кисню в калориметричній бомбі, що була розміщена в калориметрі ІКА С200 (Німеччина). Експериментально визначена теплота згоряння — середнє з результатів двох паралельних вимірювань.

Механічну міцність паливних брикетів визначали за стандартною методикою: за 10 падінь ПБ з висоти 0,5 м кількість утворених частинок розміром до 5 мм склала 4,8...14,6%, що відповідає показнику, наприклад, паливних кам'яновугільних брикетів, виготовлених з використанням бітумних зв'язувальних [21]. Склад досліджених паливних брикетів типу RUF наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Склад та теплоти згоряння досліджених паливних брикетів

Номер зразку	Склад паливних брикетів, %			Виміряна теплота згоряння	
	П (ДВ *)	ГК	ТД	МДж/кг	кКал/кг
Зразок 1	40	30	30	17,9	4264,9
Зразок 2	50	25	25	18,0	4291,9
Зразок 3	60	20	20	19,8	4715,5
Зразок 4	50	25	25	21,7	5164,6

Примітка: *— для зразка 4.

Результати досліджень

Паливні брикети отримували холодним грудкуванням альтернативних видів палив (гофрокартон, деревна тирса) та пірокарбону, як твердого продукту низькотемпературного піролізу полімерних відходів, на установці, принципова технологічна схема якої показана на рис. 1.

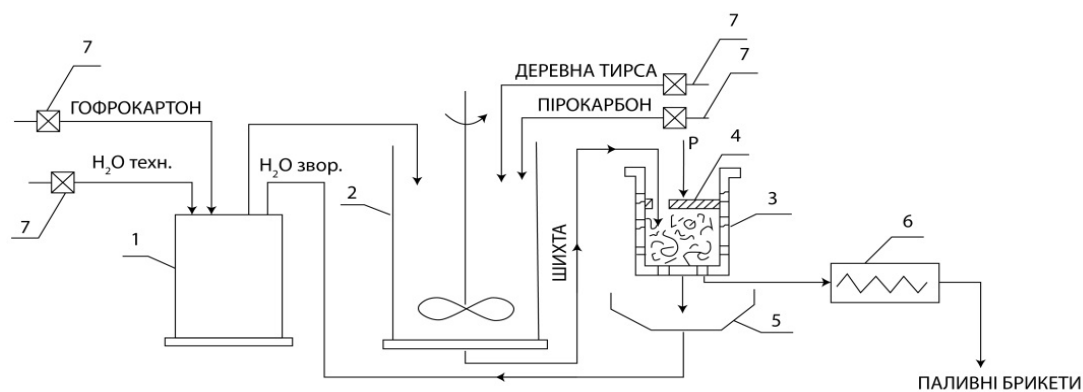


Рис. 1. Принципова технологічна схема виготовлення паливних брикетів пресуванням шихти: 1 — ємність для набухання подрібненого гофрокартону; 2 — апарат для отримання шихти з перемішувальним електроприводом; 3 — прес-форма; 4 — плунжер гідравлічного преса; 5 — ємність для збирання фільтрату; 6 — електросушарка; 7 — дозувальний пристрій

Особливістю розробленої технології отримання паливних брикетів є те, що процес грудкування твердих вихідних компонентів проводили за температури 20...25 °С без додаткового нагрівання шихти. В процесі брикетування до шихти не додавали органічні або неорганічні в'язучі, що приводило б до зростання ціни на готову продукцію або зменшення калорійності самих паливних брикетів. Склад паливних брикетів формували з пірокарбону (П), гофрокартону (ГК) та тирси деревної (ТД) в різних масових співвідношеннях (зразки 1—3, табл. 3).

Для визначення економічної доцільності отримання паливних брикетів за такою технологією дослідили також зразок 4, до складу якого входило промислове деревне вугілля «Biogrill» (м. Вінниця).

В процесі брикетування під тиском важливе значення має природа субстратів, адгезиву та структура їхньої поверхні, що забезпечує необхідну адгезію (злипання) та когезію (утворення хімічних зв'язків) між складовими компонентами субстрату та адгезиву. Отримані грудкуванням паливні брикети мали необхідні механічні властивості, що вказує на задовільну адгезію контактних поверхонь твердих тіл (пірокарбону, тирси деревної, гофрокартону) з клеєм ПВА, який використовувався для виготовлення гофрокартонних виробів. При цьому аналіз механічних, фізико-хімічних та структурних особливостей досліджених субстратів та адгезиву вказує на те, що:

– пірокарбон в першому наближенні є аналогом деревного вугілля. Це аморфний високомолекулярний продукт, що включає переважно ароматичні структури складу: «С» 80...92%; «Н» 4...8%; «О» 5...15%. Пірокарбон після термодеструкції полімерних відходів має високу реакційну здатність відносно кисню повітря. Під час охолодження реторти до 30...45 °С пірокарбон за 1 год сорбує з повітря 0,5...2,0% кисню з утворенням на твердій поверхні структурних фрагментів: –ОН та –C(=O)ОН [24], [25];

– тирса деревна складається на 40...45% із целюлози і на 30% з лігніну. Целюлоза є природним полісахаридом загальної формули $(C_6H_{10}O_5)_n$, лінійні нерозгалужені ланцюги якого побудовані з великої кількості залишків D-глюкопіранози, поєднаних між собою 1,4-β-глюкозидними зв'язками. Хімічні властивості зумовлені наявністю однієї первинної та двох вторинних –ОН груп, а також ацетальними зв'язками між елементарними ланцюгами. Лігнін — природний полімер ароматичного походження, що скріплює целюлозні волокна, за будовою і хімічними властивостями суттєво відрізняється від целюлози. Вміст функціональних груп: метоксильної –OCH₃ гідроксильних –ОН (спиртової та фенольної) в лігніні з різних видів деревини дещо різниться [26]. Відомо, що гідролітичний лігнін використовується як в'язуча речовина для брикетування різних матеріалів [27], [28];

– гофрокартон (папір) — це капілярно-пористий колоїдний матеріал, який виготовляють з целюлози. В гофрокартоні між лінійними ланцюгами целюлози виникають водневі зв'язки, а між макромолекулами — сили Ван-дер-Ваальса [29];

– клей ПВА (полівінілацетат) — аморфний полімер загальної формули $[-CH_2-CH(OCOCH_3)-]_n$. В промисловості випускається у вигляді водних дисперсій з концентрацією 50...55%, з яких виробляють водоемульсійні клеї [30].

Наведені дані вказують на те, що використанні субстрати та адгезив мають полімерну природу та подібну або дуже близьку (гофрокартон, тирса деревна) полярність поверхні, що зумовлено наявністю гідроксильних, алкоксильних, карбоксильних та ацетильних фрагментів. Тобто, згідно з емпіричним правилом Дебройна такі поверхні утворюють між собою міцні зв'язки. Відповідно до молекулярної теорії адгезії за Мак-Лареном і Дебройном природа цих зв'язків визначається взаємодією сил Ван-дер-Ваальса, іон-дипольних та водневих зв'язків [31], [32].

З технологічного погляду важливою є перша стадія приготування вихідної шихти для брикетування. Набухання гофрокартону переводить останній у водно-колоїдну масу та водну емульсію нерозчинного у воді ПВА. Змішування такої водно-колоїдної емульсії з тирсою та пірокарбоном активує поверхню субстратів, а під час їхнього пресування забезпечує злипання твердих поверхонь та утворення хімічних зв'язків за Дебройном.

Отриманні результати калориметричного визначення теплоти згоряння зразків 1—3 (табл. 3)

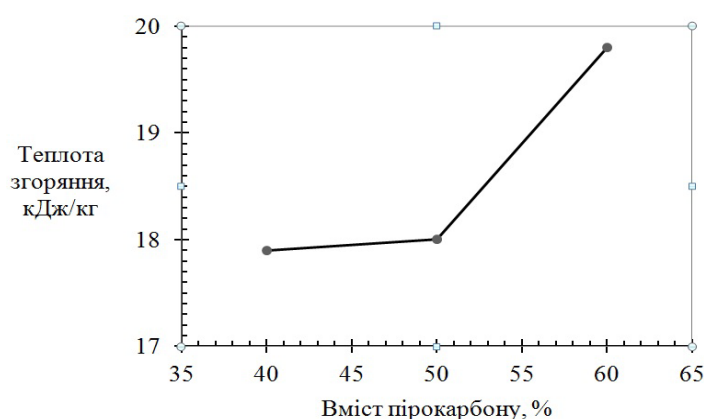


Рис. 2. Залежність теплоти згоряння паливних брикетів від вмісту пірокарбону у їхньому складі

вказують на те, що розроблені паливні брикети мають однакову калорійність з паливними брикетами, виготовленими з деревини (п. 1.2, табл. 2 та в 1,15...1,45 рази більшу — за паливні брикети, виготовлені з іншої біомаси (пп. 1.3—1.6, табл. 2), однак дещо меншу калорійність (в 1,1 рази) за паливні брикети, до складу яких входило промислове деревне вугілля (зразок 4, табл. 3).

Залежність теплоти згоряння паливних брикетів від вмісту пірокарбону у їхньому складі показана на рис. 2.

Встановлена залежність теплоти згоряння паливних брикетів (зразки 1—3) від вмісту у їхньому складі пірокарбону вказує на те, що:

– пірокарбон з усіх компонентів, що входили до складу паливних брикетів, має максимальну калорійність;

– теплота згоряння пірокарбону може коливатись в межах 22...26 МДж/кг, що майже збігається з нижчою температурою згоряння деревного вугілля, яка становить 27 МДж/кг [7].

Отримані паливні брикети можуть використовуватись як економічні, ефективні та зручні тверді види палива для локальних котлів опалення у міській та сільській місцевості, в школах, дитячих садочках та на невеликих підприємствах громадського харчування.

Висновки

1. Запропоновано для виготовлення паливних брикетів використовувати альтернативні відходи та біосировину.

2. Розроблено технологію низькотемпературного виробництва паливних брикетів шляхом пресування шихти з подальшим висушуванням в природних умовах.

3. Показано, що використання суміші гофрокартону, пірокарбону та тирси деревної в кількості 40 ... 60 % мас. дозволяє отримати висококалорійні паливні брикети.

4. Встановлено, що максимальну теплоту згоряння (4715,5 кКал/кг) мають паливні брикети, які містять пірокарбон, гофрокартон та тирсу деревини у співвідношенні 6 : 2 : 2.

5. Запропоновані галузі ефективного використання отриманих паливних брикетів, зокрема для локальних котлів опалення у міській та сільській місцевості, в школах, дитячих садочках та на невеликих підприємствах громадського харчування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Кабінет Міністрів України, «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». *Розпорядження від 18 серпня 2017 р. № 605-р*, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npras/250250456>.

[2] Державна служба статистики України, *Енергоспоживання на основі відновлюваних джерел за 2007–2021 роки*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm.

[3] І. М. Кучерява, і Н. Л. Сорокіна, «Відновлювана енергетика в світі та Україні станом на 2019 р. – початок 2020 р.» *Гідроенергетика України*, № 1-2, с. 38-44, 2020.

[4] Г. Гелетуха, «Глобальні перспективи біоенергетики», *Економічна правда*, 1 вересня, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/columns/2021/09/1/677373/>.

[5] Біоенергетична асоціація України UABIO, *Стратегія розвитку біоенергетики в Україні*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uabio.org/bioenergy-transition-in-ukraine/>.

[6] Б. В. Коріненко, О. С. Худоярова, К. Ю. Гура, і А. П. Ранський, «Циркулярна економіка та термохімічна конверсія твердих відходів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 7-19, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-7-19>.

[7] О. Н. Кайгородов, «Методика получения альтернативного топлива из ТБО и автопокрышек», *Цемент и его применение*, № 4, с. 1-3, 2007.

[8] З. А. Бурова, Л. Й. Воробйов, і Р. В. Сергієнко, «Калориметричний аналіз якості паливних брикетів та пелет», *Научний взгляд в будуще*, том 2, вып 4, с. 78-81, 2016. <https://doi.org/10.21893/2415-7538-2016-04-2-193>.

[9] З. А. Бурова, і Л. Й. Воробйов, «Калориметричний аналіз твердого та рідкого біопалива», *Научные труды Sworld*, вып. 1 (42), том 2, с. 38-42, 2016.

[10] Л. С. Гапонич, И. Л. Голенко, и А. И. Топал, «Перспективы использования SRF и RDF на цементных заводах Украины», *Екологічні науки*, № 3 (30), с. 92-97, 2020. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.15>.

[11] I. P. Ivanov, and N. V. Chesnokov, "Use of binders based on sawdust and biomodified brown coal to produce fuel briquettes," *Journal of Siberian Federal University Chemistry*, vol. 3, no.8, pp. 430-438, September, 2015. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2015-8-3-430-438>.

[12] M. A. Brand, R. C. Jacinto, R. Antunes, and A. B. D. Cunha, "Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing," *Renewable energy*, vol. 111, pp. 116-123, October, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.03.084>.

[13] N. I. Buravchuk, and O. V. Guryanova, "Technology for the Joint Briquetting of Waste Coal and Sawdust," *Solid Fuel Chemistry*, vol. 52 (5), pp. 308-312, September, 2018. <https://doi.org/10.3103/S0361521918050038>.

[14] S. D. Fazylov, et al., "Briquetting of coal-slurry mixed with wood sawdust pellets," *Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, vol. 3, pp. 94-99, March, 2017.

[15] Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, Л. Й. Воробйов, і О. О. Хавін, «Розробка енергоефективного палива на торф'яній основі», *Промышленная. теплотехника*, т. 28, № 2, с. 41-45, 2006.

- [16] O. Ozbakir, S. Koltka, and E. Sabah, "Modeling and optimization of fine coal beneficiation by hydrocyclone and multi-gravity separation to produce fine lignite clean coal," *Particulate Science and Technology*, vol. 35, iss. 6, pp. 712-722, 2017. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1194351>.
- [17] M. A. Garrido, J. A. Conesa, and M. D. Garcia, "Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes," *Energies*, vol. 10, issue 7, p. 850, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10070850>.
- [18] В. О. Смирнов, П. В. Сергеев, і В. С. Білецький, *Технологія збагачення вугілля*. Донецьк, Україна: Східний видавничий дім, 2011, 476 с.
- [19] Н. И. Буравчук, і О. В. Гурьянова, «Получение топливных брикетов из мелких фракций антрацитов», *Химия твердого топлива*, т. 48, № 4, с. 260-264, август, 2017. <https://doi.org/10.7868/S0023117714040033>.
- [20] Ch. A. I. Raju, K. Ramya Jyothi, M. Satya, and U. Praveena, "Studies on development of fuel briquettes for household and industrial purpose," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 3, issue 2, pp. 54-63, February, 2014.
- [21] В. Б. Кусков, В. Ю. Бажин, и Я. В. Кускова, «Проблемы использования угольных и других невогнеобожженных угольных и углеродсодержащих материалов в качестве энергетических брикетов», *Уголь*, № 4, с. 50-54, 2019.
- [22] Б. В. Коріненко, А. П. Ранський, О. С. Худоярова, і Д. Р. Латуша, «Практичне використання пірокарбону низькотемпературного піролізу», на *Всеукр. наук.-практ. інтернет-націон. конф. з міжн. уч. Хімічна наука та освіта в контексті сучасних інтеграційних процесів*. Київ, Україна: НПУ імені М. П. Драгоманова, 2020, с. 12-14.
- [23] Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння. *ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT)*.
- [24] H. Kienle, und E. Bäder, *Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung*, Stuttgart, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1980.
- [25] О. С. Худоярова, «Комплексне сорбційне очищення промислових стічних вод від сульфід- та купрум(II)-іонів.» дис. канд. техн. наук, ВДПУ, Вінниця, 2021.
- [26] J. Huang, S. Fu, and L. Gan, Ed., "Lignin Chemistry and Applications," *Chemical Industry Press*, Elsevier, 2019.
- [27] А. В. Павличенко, О. А. Гайдай, В. Е. Фірсова, і Т. В. Лампіка, «Оптимізація фізико-механічних параметрів паливних продуктів, отриманих при переробці відходів вугільної галузі», *Збірник наукових праць національного гірничого університету*, № 63, с. 88-97, 2020. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.088>.
- [28] Я. В. Мянська, Ю. С. Пройдак, Л. В. Камкіна, і Р. В. Анкудінов, «Механічне подрібнення компонентів силіко-марганцевої шихти для підвищення показників відновлювальності», *Сучасні проблеми металургії*, № 23, с. 63-82, 2020. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2020.01.07>.
- [29] І. В. Солтис, І. О. В. Дуболазов, *Видавничо-поліграфічні матеріали. Ч. 1. Друкарський папір та картон*. Чернівці. Україна: Чернівецький нац. ун-тет, 2021.
- [30] І. О. Савченко, і В. Г. Сиромятніков, упорядн. «Промислові полімери» та «Основи технології виробництва полімерних матеріалів», навч. посіб. до дисципліни та практикумів для студентів хімічного факультету, Київ, Україна: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2012, 112 с.
- [31] A. D. McLaren, "Adhesion and Adhesives," *Journal of Society of Chemical Industry*, New York: J. Wiley and Sons, 1954.
- [32] N. Debroyn, "Some adhesion issues," *Khimiya i tekhnologiya polimerov*, № 6, 1961.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.02.2023

Ранський Анатолій Петрович — д-р. хім. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля;

Гордієнко Ольга Анатоліївна — канд. тех. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Коріненко Богдан Валерійович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету; інженер першої категорії відділу № 8, e-mail: b.korinenko.b@gmail.com ;

Євдокименко Віталій Олександрович — канд. хім. наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу органічного та нафтохімічного синтезу.

Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України, Київ

A. P. Ranskiy¹
B. V. Korinenko^{1,2}
O. A. Gordienko¹
V. O. Yevdokymenko²

Alternative Energy: Obtaining Fuel Briquettes from Pyrocarbon of Thermal Destruction of Polymer Waste

¹Vinnytsia National Technical University;
²V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

The analysis of the possibilities of using renewable energy sources and biomass in Ukraine for the production of alternative fuel — fuel briquettes has been carried out. It has been shown that Ukraine has large reserves of renewable energy sources and biomass: the energy potential from biomass is 23 million tons of oil equivalent, which is sufficient to replace the total volume of import of gas, coal and gasoline. The calorific value (heat of combustion) of some types of fuel briquettes, fuels and solid household waste has been given. It is noted that different combinations of industrial and household waste can be used to obtain fuel briquettes: woodworking waste, paper waste, corrugated cardboard, shale processing waste, coal dust, etc. This allows both to obtain fuel briquettes with a high calorific value and to improve the environmental condition of the environment.

The general method of fuel briquettes manufacturing from alternative solid fuels (corrugated cardboard, wood sawdust) and pyrocarbon, which is obtained during low-temperature pyrolysis of polymer waste, has been given. The technology of cold pressing of the studied charge with subsequent drying of the obtained briquettes to a constant mass has been developed. The process of coagulation of the initial components was carried out at a temperature of 20...25 °C without additional heating of the charge and the introduction of organic or inorganic binders, which would lead to an increase in the price of the finished product or a decrease in the calorie content of the obtained fuel briquettes. The heat of combustion of the developed fuel briquettes of different composition was determined by the calorimetric method. It has been established that the use of a mixture of corrugated cardboard and wood sawdust in the amount of 40...60 % mass. allows obtaining high-calorie fuel briquettes from pyrocarbon. It has been established that the maximum heat of combustion (4715.5 kCal/kg) has fuel briquettes containing pyrocarbon, corrugated cardboard and wood sawdust in a ratio of 6 : 2 : 2. Areas of effective use of the obtained fuel briquettes have been proposed.

Keywords: fuel briquettes, pyrocarbon, corrugated cardboard, wood sawdust, alternative fuels.

Ranskiy Anatoliy P. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies;

Korinenko Bohdan V. — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies of Vinnytsia National Technical University; Engineer of the I Category of the Department № 8 of the V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: b.korinenko.b@gmail.com ;

Gordienko Olga A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies;

Yevdokymenko Vitaliy O. — Cand. Sc. (Chem.), Senior Researcher, Head of the Department of Organic and Petrochemical Synthesis