

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАВАННЯ ФРАКЦІЇ САПРОПЕЛЮ
НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ БРИКЕТІВ ЗІ СОЛОМИ
ТА КОСТРИ ЛЬОНУ-ДОВГУНЦЯ

Ґжегош Вцісло^{1,2}, професор, Володимир Дідух³, д. т. н., Василь Том'юк⁴, к. т. н.

¹Університет рільничий ім. Хугона Коллатая в Кракові

вул. Баліцка, 116 б, м. Краків, Польща,

e-mail: grzegorz.wcislo@ur.krakow.pl

²Малопольський центр відновлюваних джерел енергії «BioEnergia»

вул. Баліцка, 116 б, м. Краків, Польща,

e-mail: grzegorz.wcislo@ur.krakow.pl

³Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, e-mail: didukh_v@ukr.net

⁴Львівський національний аграрний університет

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,

e-mail: tomyk.lnau@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.113>

Постановка проблеми. Сьогодні велику увагу приділяють відновлюваним джерелам енергії. Залежно від виду рослинної сировини тверде біопаливо можна одержувати з відходів побічних продуктів переробки деревини (стружка і тирса без кори, відходи з корою, відходи виробництва МДФ, шліфувальний пил, відходи фанерних виробництв тощо), а також із побічних продуктів і відходів сільськогосподарської сировини (соломи, лушпиння зернових культур, рису, кукурудзи, соняшнику тощо) та з інших видів сировини [2].

Саме відходи й побічні продукти сільськогосподарської сировини становлять значну частку всієї біомаси і можуть бути основним джерелом палива для більшості сільських регіонів, особливо регіонів із невеликими лісовими масивами [2; 4]. Одним із таких твердих видів палива є брикет [1; 5; 12; 13]. Найбільший інтерес становлять брикети, виготовлені з деревних відходів та/або соломи в тюках прямокутної чи циліндричної форми, а також інших рослинних решток, отриманих після збирання врожаю [3; 7 – 9].

Залежність дозрівання льону олійного від погодних умов вказує на потребу утилізації стеблової частини від моменту відділення насіння до перетворення соломи на тресту. З подрібнених стебел соломи й відходів переробки трести можна виготовляти паливні матеріали, у тому числі з використанням сапропелю як зв'язувальної речовини. За результатами досліджень [10], автори пропонують три напрями застосування свіждо-

бутого озерного сапропелю в сумішах з листостебловою частиною врожаю сільськогосподарських культур: у виробництві біогазу, з подальшим використанням як органічних добрив; для виготовлення компостів органічного походження, суміші яких наближені за фізико-механічними властивостями до ґрунтів [6]; як альтернативного твердого палива у вигляді брикетів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені дослідження, спрямовані на підвищення енергетичних параметрів паливних брикетів [11; 13; 18], вказують на їх актуальність. Одним із найважливіших напрямів на сьогодні є дослідження, спрямовані на підвищення теплотворної здатності паливних брикетів, тобто поліпшення таких параметрів, як теплота згоряння та теплотворна здатність [14; 17; 20]. Питома теплота згоряння – кількість теплоти, що виділяється в разі повного згоряння одиниці маси твердого палива. Внаслідок конденсації водяної пари відновлюється додаткова енергія, що збільшує тепловий ефект. Тому, залежно від типу палива, теплота згоряння характеризується вищим значенням цього показника, ніж теплотворна здатність, від 5 до 20 % [21; 22]. Вказана відмінність залежить від вологості палива та кількості атомів водню в структурі палива. Збільшення теплотворної здатності біомаси домагаються додаванням до основних матеріалів інших енергетичних добавок [13; 15; 16]. Під час виробництва

паливних брикетів зі соломи чи костри льону-довгунця як зв'язувальну речовину можна додати фракцію органічного сапропелю [19].

Постановка завдання. Метою дослідження було визначення теплоти згоряння (верхня теплотворна здатність) та теплотворної здатності (нижча теплотворна здатність) брикету на основі соломи та костри льону-довгунця, а також їх сумішей із додаванням сапропелю у кількості відповідно 50 та 30 %.

Виклад основного матеріалу. Основою для розрахунку теплотворної здатності є визначення температури спалювання брикету, яке проводили на основі стандарту PN-C-04062:2018-05, що діє в Польщі. Досліджувані зрізки брикету виготовляли в лабораторії енергетики та біопалива Малопольського центру відновлюваних джерел енергії «BioEnergia», м. Краків, Польща. Фракція соломи та трести льону-довгунця, а також сапропель отримані в лабораторії Луцького національного технічного університету. Вологість соломи, яка використовується для виробництва брикетів, становила 10 %.

Досліджувані зрізки брикету виготовляли таким чином. Зважували 1 г досліджуваної суміші – костри, соломи льону-довгунця та сапропелю – у відповідному співвідношенні. Відрізали з

катушки необхідну довжину канталевого дроту, який характеризується високим електричним опором та жаротривкістю. Дріт використовували для запалювання досліджуваного зрізка. Пізніше дріт встановлювали в прес (рис. 1) і насипали досліджувану суміш, яку за допомогою гвинта спресовували й отримували паливну пробку з виступаючими двома дротами (рис. 2, 3).

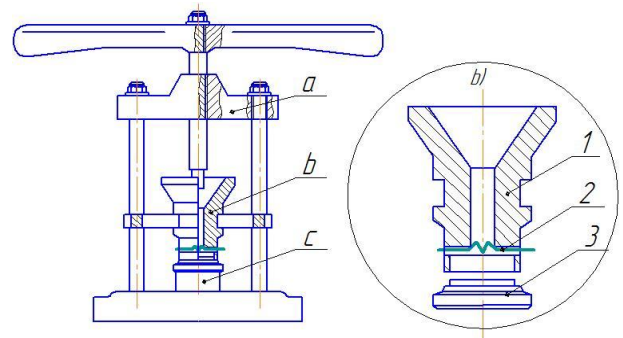


Рис. 1. Конструктивна схема механічного преса для формування пробки:

a – прес; *b* – прес-форма; *c* – підставка;

1 – корпус прес-форми; 2 – канталевий дріт;

3 – шайба

Fig. 1. Constructive scheme of mechanical press for the formation of a stopper:

a – press; *b* – mold; *c* – stand;

1 – body of the mold; 2 – cantal wire; 3 – the washer



1) костра 70 % – сапропель 30 %



2) костра 100 %

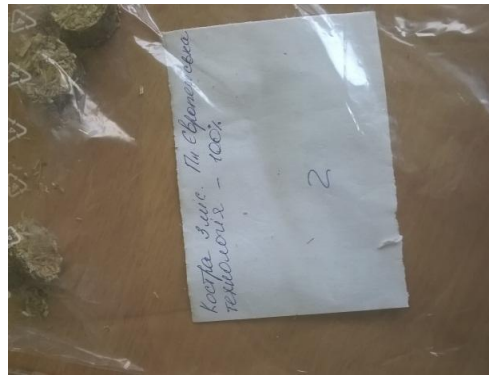


Рис. 2. Зрізки паливних пробок та досліджуваного матеріалу на основі костри

Fig. 2. Examples of fuel jams and chest-based study material

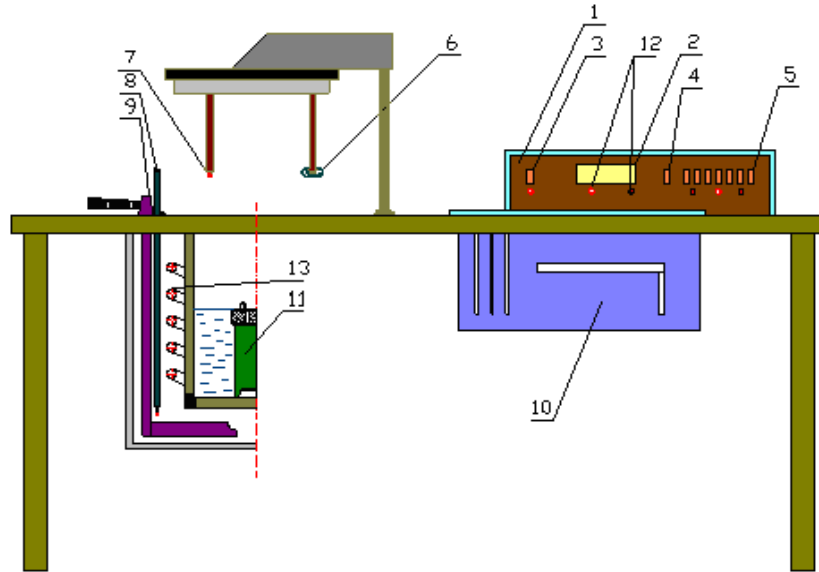


Рис. 4. Конструктивна схема калориметра KL-10:

1 – блок управління; 2 – цифровий дисплей; 3 – вимикач живлення; 4 – кнопка «ПУСК»; 5 – кнопка зчитування значення теплоти згоряння; 6 – мішалка; 7 – термометр; 8 – термометр термостата; 9 – змішувач термостата; 10 – блок управління; 11 – калориметрична бомба; 12 – сигнальні діоди; 13 – котушка нагрівання

Fig. 4. Constructive scheme of calorimeter KL-10:

1 – control unit; 2 – digital display; 3 – power switch; 4 – button «START»; 5 – read button value of the heat of combustion; 6 – mixer; 7 – thermometer; 8 – thermometer of thermostat; 9 – thermostat mixer; 10 – control unit; 11 – calorimetric bomb; 12 – signal diodes; 13 – heating coil

Теплоту згоряння паливних пробок визначали за допомогою калориметра KL-10 (рис. 4) польського виробництва, компанії «Precyzja Bit», в якому паливний зразок спалювали в калориметричній бомбі 11. Кінці дроту з'єднували з електродами, після чого бомбу заповнювали чистим киснем (> 99 % O₂) до тиску 2,4 МПа. Натиснувши кнопку 4 «ПУСК», імпульсно подавали електричний струм напругою 48 В, завдяки чому провід нагрівався, зумовлюючи запалення досліджуваного зрізця та швидке його згоряння в середовищі чистого кисню.

Загальний тепловий ефект згоряння зрізців паливних брикетів визначається залежністю

$$Q_b = \frac{C_k \cdot \Delta t - Q_2 m_2}{m_o}, \quad (1)$$

де $C_k = 12,908$ – теплова потужність калориметра, кДж/°С; Δt – кориговане підвищення температури під час згоряння (модель 2), $Q_2 = 6704$ – теплота згоряння проводу запалення, кДж/кг; m_o – маса паливного зразка, кг; $m_2 = 0,000007$ – маса проводу запалення, кг.

Кориговане підвищення температури під час згоряння визначимо зі залежності

$\Delta t = [(t_n + h_n) - (t_o + h_o)] + a + b$, (2)
де t_o – початкова температура основного періоду (згоряння зразка), °С; t_n – кінцева температура

основного періоду (зразок згоряння), °С; h_o та h_n – поправки для калібрування термометра за температури t_o та t_n , a – корекція для теплообміну калориметра, °С; b – корекція для виступаючої ртутної колони, °С.

Теплота згоряння зразків паливних пробок визначається залежністю

$$Q_s^a = \frac{C_k \Delta t - Q_2 m_2}{m_o} + \Delta Q_s, \quad (3)$$

де ΔQ_s – коефіцієнт перетворення теплоти згоряння палива $\Delta Q_s = 30$ кДж/кг.

Об'єм теплоти паливних пробок був розрахований на підставі залежності

$$Q_i^a = Q_s^a - 24,42 (8,94 \cdot H - W), \quad (4)$$

де H – вміст водню у випробовуваному паливі, %; W – вологість досліджуваного палива, %.

Провівши відповідно до методики, описаної вище, дослідження теплотворної здатності зрізців паливних брикетів та здійснивши відповідні розрахунки, отримали такі результати (див. табл.).

У програмному засобі *Microsoft Excel* побудовано залежності теплоти згоряння та теплотворної здатності для брикетів на основі соломи та костри льону-довгунця в чистому вигляді та з додаванням відповідно 30 та 50 % органічного сапропелю (рис. 5, 6).

Таблиця. Результати визначення теплоти згорання досліджуваних зрізків паливних брикетів, отриманих зі соломи та костри льону-довгунця з додаванням органічного сапропелю (30 та 50 % відповідно)

Table. Results heat of combustion of fuel plugs of the studied models obtained from the straw and the fires of flax with the addition of organic sapropel (30 and 50 % respectively)

№ з/п	Вологість, %	T1, °C	T2, °C	T3, °C	T4, °C	Q, кал/г	Q, Дж/г	МДж/кг	Маса наважки m, г	Маса проводу m, г
1	10	19,96	20,01	21,13	21,089	4431,9	18525,22	18,5	1,004	0,004
2	10	19,96	20,01	21,13	21,089	5308,5	22189,43	22,2	1,004	0,004
3	10	19,96	20,01	21,13	21,089	2742,5	11463,78	11,5	1,004	0,004
4	10	19,96	20,01	21,13	21,089	3297,9	13785,15	13,8	1,004	0,004
5	10	19,96	20,01	21,13	21,089	2320,2	9698,286	9,7	1,004	0,004
6	10	19,96	20,01	21,13	21,089	4705,4	19668,62	19,7	1,004	0,004

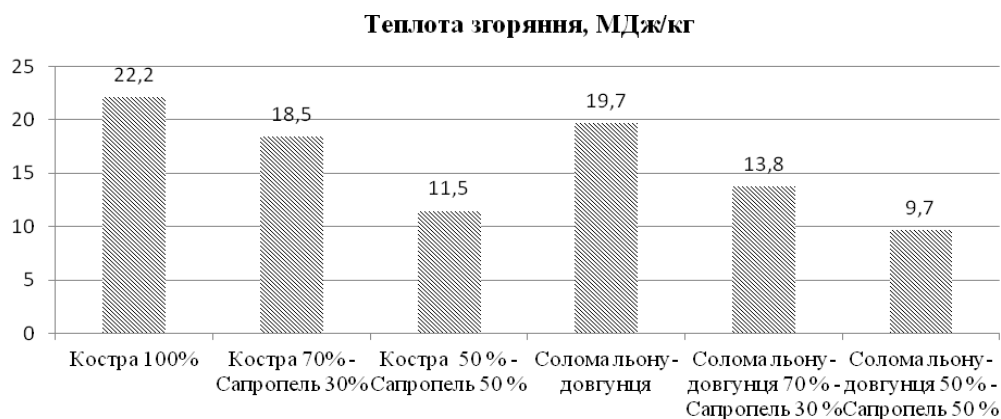


Рис. 5. Теплота згорання для брикетів на основі соломи та костри льону-довгунця в чистому вигляді та з додаванням відповідно 50 та 30 % сапропелю

Fig. 5. Combustion heat for briquettes based on straw and fiber-flax straw in pure form and with the addition of respectively 50 and 30 % sapropel

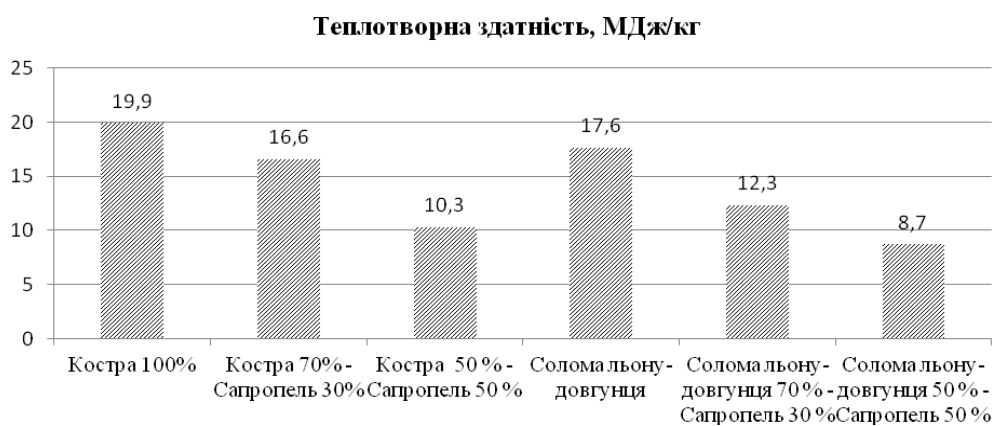


Рис. 6. Теплотворна здатність для брикету на основі соломи та костри льону-довгунця в чистому вигляді та з додаванням відповідно 50 та 30 % сапропелю

Fig. 6. Heat capacity for briquettes based on straw and flax straw in pure form and with the addition of respectively 50 and 30 % sapropel

Проаналізувавши залежності (рис. 4, 5), ми з'ясували, що теплота згоряння костри становить 22,2 МДж/кг, додавання 30 % сапропелю зумовлює зменшення цього показника до 18,5 МДж/кг, а додавання 50 % – до 11,5 МДж/кг. Теплота згоряння соломи льону-довгунця становить 19,7 МДж/кг, додавання 30 % сапропелю зумовлює зменшення цього показника до 13,8 МДж/кг, а додавання 50 % – до 9,7 МДж/кг. Цей результат свідчить і про швидкість горіння паливних брикетів з додаванням сапропелю. Таке твердження ґрунтується на зміні енергетичного потенціалу інших видів матеріалу (костра + сапропель). Як показує практика, сапропель органічного походження у затверділому стані не горить, а тліє (що відображено на отриманих залежностях). Таким чином, застосування його як зв'язувальної речовини може відіграти позитивну роль під час виготовлення паливних брикетів.

Висновки. 1. Встановлено, що найвищі значення теплотворної здатності притаманні брикетам з костри, незначно менші – брикетам зі соломи льону-довгунця, а найменші – брикетам із додаванням до їх складу 30 та 50 % сапропелю. Вологість матеріалу, який використовується для виробництва брикетів, становила 10 %.

2. За результатами досліджень встановлено, що теплота згоряння паливних брикетів, виготовлених із костри, становить 22,2 МДж/кг. Додавання 30 % сапропелю зумовлює зменшення цього показника на 16,6 %, до 18,5 МДж/кг, а додавання 50 % – на 48,2 %, до 11,5 МДж/кг. Теплота згоряння соломи льону-довгунця становить 19,7 МДж/кг, додавання 30 % сапропелю зумовлює зменшення показника на 30 %, до 13,8 МДж/кг, а додавання 50 % сапропелю – на 50 %, до 9,7 МДж/кг. Слід зазначити, що додавання 30 % сапропелю до костри зменшує її теплотворну здатність на 16,6 %, а додавання 30 % сапропелю до соломи льону-довгунця – на 30%.

3. Оскільки сапропель органічного походження у затверділому стані не горить, а тліє, перспективними є дослідження часу горіння паливних брикетів із вмістом вказаної сировини.

Бібліографічний список

- Архангельский Ю. Л. Использование измельченных древесных отходов в торфобрикетном производстве. *Торфяная промышленность*. 1990. № 7. С. 22–24.
- Бордун Т. В. Класифікація і характеристика твердих альтернативних відновлюваних видів біологічного палива. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2013. № 4. С. 71–76.
- Гриценко В. Т., Бакарджиев Р. О. Перспективи отримання білкових добавок та твердого біопалива з насіння олійних культур. *Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвід. темат. наук. зб. Глеваха, 2013. Вип. 98, т. 2. С. 152–157.*
- Дубровін В. О., Корчемний М. О., Масло І. П. та ін. Біопалива (технології, машини і обладнання). Київ: ЦПІ «Енергетика і електрифікація», 2004. 256 с.
- Корінчук Д. М., Михайлик В. А., Корінчук К. О. Дослідження структурно-механічних властивостей композиційних брикетів на торф'яній основі з використанням органічних побутових відходів. *Промислова теплотехніка*. 2009. Т. 31, № 7. С. 53–58.
- Русаков Д., Дідух В., Том'юк В. Промислове виробництво органічних, органо-мінеральних та гранульованих добрив на основі сапропелів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 37–42.
- Adamczyk F., Frackowiak P., Mielec K., Kośmicki Z. Trwałość brykietów ze słomy przeznaczonyj na opał, uzyskanych metodą zwijania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2005. 51(1). S. 33–36.
- Denisiuk W. Produkcja roślinna jako źródło surowców energetycznych. *Inżynieria Rolnicza*. 2005. 5(80). S. 123–131.
- Denisiuk W. Słoma – potencjał masy i energii. *Inżynieria Rolnicza*. 2008. 2(100). S. 23–30.
- Didukh V., Tomyuk V., Onyukh Yu., Lalak-Kańczugowska Ju. Analysis of studies of lake sapropel properties. *Teka Komisji Motorization and Power Industry in Agriculture*. 2016. Vol. 16, No. 3. P. 89–94.
- Fischer A. Badania porównawcze współczynnika trwałości brykietów ze słomy. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2008. 53(3). P. 69–71.
- Hejft R. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Białystok, 2002.
- Hejft R. Wytwarzanie brykietów z odpadów roślinnych w ślimakowym układzie roboczym. *Inżynieria Rolnicza*. 2006. 5(80). S. 231–238.
- Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Specific energy requirement for compacting corn stover. *Bioresource Technology*. 2006. No. 97. P. 1420–1426.
- Niedziółka I., Szymanek M., Zuchniarz A. Energetic evaluation of postharvest corn mass for heating purposes. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*. 2006. T. VI(6A). S. 145–150.
- Niedziółka I., Szymanek M., Zuchniarz K. Ocena właściwości energetycznych i mechanicznych brykietów z masy poźniwej kukurydzy. *Inżynieria Rolnicza*. 2007. 7(95). S. 153–159.
- O'Dogherty M. J., Huber A. J., Dyson J., Marshal C. J. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1995. 62(2). P. 133–142.

18. PN-C-04062:2018-05. Przetwory naftowe – Oznaczenie ciepła spalania paliw ciekłych w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej z zastosowaniem wzorów empirycznych. 2018.

19. Produkcja biomasy na cele energetyczne / J. Frączek i inni. Kraków: PTIR, 2010.

20. Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne / J. Frączek i inni. Kraków: PTIR, 2010.

21. Wcisło G. Determining the rapeseed oil influence on Biodiesel RME top heat value - 2007. *Silniki Spalinowe. Development of Combustion Engines*. 2007. R 46, № SC3. P. 201-205.

22. Wcisło G. Wyznaczenie ciepła spalania oraz wartości opałowej ulepszonych odmian rzepaku. *MOTROL*. 2010. Vol. 12. S. 181–187.

Вцісло Г., Дідух В., Том'юк В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАВАННЯ ФРАКЦІЇ САПРОПЕЛЮ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ БРИКЕТІВ ЗІ СОЛОМИ ТА КОСТРИ ЛЬОНУ-ДОВГУНЦЯ

Подано результати експериментальних досліджень впливу додавання фракції сапропелю (30 та 50 %) на калорійність брикетів, виготовлених із костри та соломи льону-довгунця, зокрема їх теплоти згоряння і теплотворної здатності.

Результати експериментальних досліджень показали, що найвищі значення теплотворної здатності мають брикети з костри, незначно менші – зі соломи льону-довгунця, а найменші – із цих матеріалів з додаванням до їх складу 30 та 50 % сапропелю. Вологість матеріалу, який використовується для виробництва брикетів, становила 10 %. Досліджувані зрізки брикету виготовляли в лабораторії енергетики та біопалива Малопольського центру відновлюваних джерел енергії «BioEnergia». Фракція соломи та трести льону-довгунця, а також сапропель отримані в лабораторії Луцького національного технічного університету.

За результатами досліджень встановлено, що теплота згоряння костри становить 22,2 МДж/кг, додавання 30 % сапропелю зумовлює зменшення цього показника на 16,6 %, до 18,5 МДж/кг, а додавання 50 % – на 48,2 %, до 11,5 МДж/кг. Теплота згоряння соломи льону-довгунця становить 19,7 МДж/кг, додавання 30 % сапропелю зумовлює зменшення показника на 30 %, до 13,8 МДж/кг, а додавання 50 % сапропелю – на 50 %, до 9,7 МДж/кг. Зазначимо, що додавання 30 % сапропелю до костри зменшує її теплотворну здатність на 16,6 %, а додавання 30 % сапропелю до соломи льону-довгунця – на 30 %.

Оскільки сапропель органічного походження у затверділому стані не горить, а тліє, перспективними є дослідження часу горіння паливних брикетів із вмістом вказаної сировини.

Ключові слова: костра, солома льону-довгунця, теплота згоряння, сапропель, паливна пробка, брикет.

Wcisło G., Didukh V., Tomiuk V.

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF APPLICATION OF THE FRACTIONS OF SAPROPEL ON THE ENERGY INDICATORS OF BRIQUETTES MADE FROM THE STRAW AND COMMON FLAX HURDS

The article presents the results of experimental studies of combustion heat and calorific value of briquettes on the basis of straw and flax hurds with the addition of sapropel fraction. The calorific value was determined by burning briquettes, based on the standard PN-C-04062: 2018-05, which operates in Poland. The explored models of briquettes were made in the Laboratory of Energy and Biofuels of the Malopolska Center for Renewable Energy «BioEnergia», Krakow, Poland. Fraction of straw and retted straw, as well as sapropel, were obtained in the laboratory of Lutsk National Technical University. The moisture content of straw used for briquettes production was 10 %.

During experimental studies, the effect of adding sapropel fractions (30 and 50 %) on the caloric value of briquettes made from the hurds and flax straw, in particular their combustion heat and calorific value, was established.

The results of experimental studies have shown that the highest values of calorific value are briquettes from the hurds, slightly smaller ones – from the flax straw, and the smallest – from these materials with addition to their composition of 30 and 50 % sapropel. Humidity of the material used for the production of briquettes was 10 %. The investigated models of briquettes were produced at the Energy and Biofuels Laboratory of the Malopolska Center for Renewable Energy «BioEnergia». Fraction of straw and retted straw, as well as sapropel, were obtained in the laboratory of Lutsk National Technical University.

According to the results of the research it was established that the heat of burning hurds is 22,2 MJ/kg, adding 30 % sapropel causes decrease of this index by 16,6 %, to 18,5 MJ/kg, and addition of 50 % – by 48,2 %, to 11,5 MJ/kg. The heat of combustion of flax straw is 19,7 MJ/kg, adding 30 % of sapropel causes a decrease of 30 %, to 13,8 MJ/kg, and the addition of 50 % sapropel – by 50 %, up to 9,7 MJ/kg. It should be noted that the addition of 30 % sapropel to the hurds reduces its calorific value by 16,6 %, and the addition of 30 % sapropel to flax straw – by 30 %.

Since sapropel being of organic origin in a hardened state does not burn, but is smoldering, the study of combustion time of fuel briquettes with the contents of said raw materials is promising.

Key words: hurds, flax straw, heat of combustion, sapropel, fuel cork, cake/briquette.

Стаття надійшла 17.11.2018