

**Крутогорова Ірина Олександрівна**, аспірант Інституту ринку та економіко-екологічних досліджень НАН України, директор, тел.: +38(050)316-57-80, irinakrut77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9075-5129

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АУДИТОРСЬКА ФІРМА «БРИК», вул. Пішонівська, 22/1, м. Одеса, Україна, 65029

**Браверман Вячеслав Якович**, к.т.н., генеральний директор, тел.: +38(050)336-64-75, braverman@resources.odessa.ua, ORCID: 0000-0002-4624-9843

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «КОНСАЛТИНГОВО-ВНЕДРЕНЧЕСЬКИЙ ЦЕНТР «ПОНОВЛЮВАНІ РЕСУРСИ», вул. М. Говорова, 10-Б., м. Одеса, Україна, 65058

## ЗАМІЩЕННЯ ВУГІЛЛЯ ТА ГАЗУ АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

***Анотація.** У роботі показано, що відходи сільськогосподарської діяльності можуть бути невичерпним дешевим джерелом для зелених, відновлюваних джерел енергії таких як біовугілля, біогаз, органічного добрива високої якості - біочара. Актуальність проблеми ще більше зростає у зв'язку з необхідністю заміщення викопних енергетичних ресурсів (вугілля, газу, нафти), що раніше надходили з Росії. Можливість використання екзотермічної теплоти процесу піролізу сільськогосподарських відходів робить цей процес економічно більш привабливим та сприятиме його впровадженню. При використанні запропонованих технологій піролізу всі види вуглецевмісних відходів сільськогосподарської діяльності можна розглядати, як незатребуваний ресурс для декарбонізації всього енергетичного сектора України.*

***Ключові слова:** біочар, біовугілля, синтез-газ, автотермальний піроліз, відходи сільськогосподарської діяльності.*

**Krutoholova Iryna**, graduate student of the Institute of Market and Economic and Environmental Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, director, tel.: +38(050)316-57-80, irinakrut77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9075-5129

LIMITED LIABILITY COMPANY «AUDIT FIRM «BRIC», st. Pishonivska, 22/1, Odesa, Ukraine, 65029

**Braverman Vyacheslav**, Ph.D., General Director, tel.: +38(050)336-64-75, braverman@resources.odessa.ua, ORCID: 0000-0002-4624-9843

LIMITED LIABILITY COMPANY «CONSULTING AND IMPLEMENTATION CENTER RENEWABLE CENTER «RENEWABLE RESOURCES», M. Govorova, 10-B, Odesa, Ukraine, 65058

## REPLACEMENT OF COAL AND GAS WITH ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY

***Abstract.** The work shows that agricultural waste can be an inexhaustible cheap source for green, renewable energy sources such as biocoal, biogas, high-quality organic fertilizer – biochar. The urgency of the problem has increased even more due to the need to replace fossil energy resources (coal, gas, oil), which used to come from Russia. The possibility of using exothermic heat of the process of pyrolysis of agricultural waste makes this process economically more attractive and will contribute to its implementation. When using the proposed pyrolysis technologies, all types of carbon-containing agricultural waste can be considered as an unclaimed resource for the decarbonization of the entire energy sector of Ukraine.*

***Keywords:** biochar, biocoal, synthesis gas, autothermal pyrolysis, agricultural waste.*

**Крутогорова Ирина Александровна**, аспирант Института рынка и экономико-экологических исследований НАН Украины, директор, тел.: +38(050)316-57-80, irinakrut77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9075-5129

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «АУДИТОРСКАЯ ФИРМА «БРИК», ул. Пишионовская, 22/1, г. Одесса, Украина, 65029

**Браверман Вячеслав Яковлевич**, к.т.н., генеральный директор, тел.: +38(050)336-64-75, braverman@resources.odessa.ua, ORCID: 0000-0002-4624-9843

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «КОНСАЛТИНГОВО-ВНЕДРЕНЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ РЕСУРСЫ», ул. Н. Говорова, 10-Б., г. Одесса, Украина, 65058

## ЗАМЕЩЕНИЕ УГЛЯ И ГАЗА АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

***Аннотация.** В работе показано, что отходы сельскохозяйственной деятельности могут быть неисчерпаемым дешевым источником для зеленых, возобновляемых источников энергии, таких как биоуголь, биогаз, органическое удобрение высокого качества - биочар. Актуальность проблемы еще больше возросла в связи с необходимостью замещения ископаемых энергетических ресурсов (уголь, газа, нефти), ранее поступающих из России. Возможность использования экзотермической теплоты процесса пиролиза сельскохозяйственных отходов делает этот процесс экономически более привлекательным и будет способствовать его внедрению. При использовании предложенных технологий пиролиза все виды*

углеродсодержащих отходов сельскохозяйственной деятельности можно рассматривать как не востребуемый ресурс для декарбонизации всего энергетического сектора Украины.

**Ключевые слова:** биочар, биоуголь, синтез-газ, автотермальный пиролиз, отходы сельскохозяйственной деятельности.

**Відходи як сировина для заміщення.** У зв'язку з військовими діями в Україні утворився значний дефіцит вугілля та газу, що суттєво ускладнить проходження опалювального сезону 2022-2023 років. Нами пропонується замістити вугілля у твердопаливних локальних котельних альтернативним паливом біовугіллям, а газ у газових котельних синтез-газом. Це паливо може вироблятися з відходів сільськогосподарської діяльності - соломи зернових культур, лушпиння соняшнику, кукурудзяних качанів, стебел, відходів виноробства. Ця можливість визначається компонентним складом основних видів сільськогосподарських відходів (табл. 1).

Таблиця 1

Вид сировини	Зміст компонентів, %			
	Гемоцелюлоза	Целюлоза	Лігнін	Друге
Солома пшениці	18,1	29,0	27,4	25,5
Солома рису	26,0	40,8	17,9	15,3
Стебла кукурудзи	32,6	33,5	11,0	22,9
Кукурудзяний качан	37,7	33,5	15,1	13,7
Сосна	17,8	47,8	19,7	14,7
Модрина	24,8	37,6	24,6	13,0
Береза	26,5	39,4	19,7	14,4
Осика	20,3	44,0	21,8	13,9

Хімічний склад відходів схожий із складом деревини, відрізняючись лише невеликою різницею у співвідношенні основних компонентів, а відсутність витрат на вирощування та виділення додаткових територій робить ці відходи практично безцінними в економічному плані.

Органічна маса відходів складається на 48% з вуглецю, 6% водню, близько 43% кисню та 1-2% азоту та сірки. Тому горючі відходи сільськогосподарської діяльності слід розглядати як джерело вуглецю, водню та кисню. Це дає можливість використати відходи для заміщення викопних видів палива. У 2021 році Україна збрала рекордний врожай зернових, зернобобових та олійних культур обсягом 106,6 млн тон (з інформації міністра аграрної політики та продовольства України). Навіть при співвідношенні 1:0,7 це означає, що в 2021 році обсяг відходів склав 74,6 млн. тон. Виходячи з даних надходження газового енергетичного вугілля в Україну в останні роки обсяг необхідного заміщення становить 10,7 мільйонів тон на що потрібно до 33,0 млн. тон відходів. Таким чином, можна стверджувати, що в Україні щорічно утворюється необхідний обсяг сільськогосподарських відходів для заміщення викопних видів палива.

**Піроліз як спосіб термічної переробки відходів.** Ефективне використання біомаси в існуючому паливному обладнанні обмежується

рядом специфічних властивостей, таких як висока вологість, низька насипна щільність, висока шлакуюча здатність золи, відкладення смол в газоходах котла, хімічний недопал та ін. Одним з перспективних напрямків переробки біомаси для подальшого її ефективного використання, як паливо на існуючому паливному обладнанні є піроліз, що дозволяє отримати енергетично цінні тверді, рідкі та газоподібні енергетичні продукти.

У типовому процесі торрефікації біомаса нагрівається до бажаної температури торрефікації ( $\theta_{tor}$ ), що витримується протягом заданого часу реакції. Температура торрефікації та час реакції є двома найбільш важливими параметрами в цьому процесі. Процес торрефікації може бути виражений двома рівняннями [1]:

$$200\text{ }^{\circ}\text{C} \ll \theta_{tor} \ll 300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$(\theta_{tor} - 200)/t < 10\text{ }^{\circ}\text{C/секунду}, \quad (2)$$

де  $\theta_{tor}$  - температура торрефікації  $^{\circ}\text{C}$ , а  $t$  - час нагрівання вище  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Типовий час реакції становить близько 30 хвилин. За швидкістю нагрівання піроліз може бути класифікований як повільний і швидкий. Піроліз вважається повільним, якщо час  $t_h$ , необхідне для нагрівання палива до температури піролізу, набагато більше характерного часу реакції піролізу  $t_r$ , і навпаки. Тобто:

- Повільний піроліз:  $t_h \gg t_r$ ;

- Швидкий піроліз:  $t_h \ll t_r$ .

Ці критерії можуть бути визначені лінійною швидкістю нагріву ( $T_p/t_h$ ,  $\text{K/c}$ ). Характерний час реакції  $t_r$  для простої реакції визначається як величина, зворотна константі швидкості  $K$ , що оцінюється при температурі піролізу.

При температурі біомаси  $200^{\circ}\text{C}$  відбувається деструкція гемоцелюлози, що входить до складу біомаси (табл. 1). Термічна деструкція гемоцелюлози, що відбувається в процесі торрефікації, приводить до того, що одночасно з основним твердим продуктом утворюється деяка кількість летучих газів.

Ефективним методом утилізації летучих газів є їх термічна конверсія в синтез-газ, який є сумішшю водню та окису вуглецю. При виробництві газів для спалювання зазвичай не потрібно ретельної очистки. Така ситуація може бути у випадку електростанцій із газотурбінними установками. Тоді слід виділяти з газу тільки пил і смолу та знижувати вміст у ньому сірки настільки, щоб уникнути корозії та викидів, шкідливих для навколишнього середовища. Тоді очищення летучих газів може здійснюватися за допомогою нагрітого вугільного фільтра. У роботі [2] приведено рисунок об'ємного виходу водню та окису вуглецю на 1 кг вихідної сировини.

Співвідношення між об'ємним вмістом водню та окису вуглецю в отриманому синтез-газі коливалося в інтервалі значень 0,85 – 1,34 залежно від режиму торрефікації та типу вихідної сировини. Питома теплотворна здатність синтез-газу, отримана при торрефікації соломи, становить  $12,1\text{ МДж/м}^3$ .

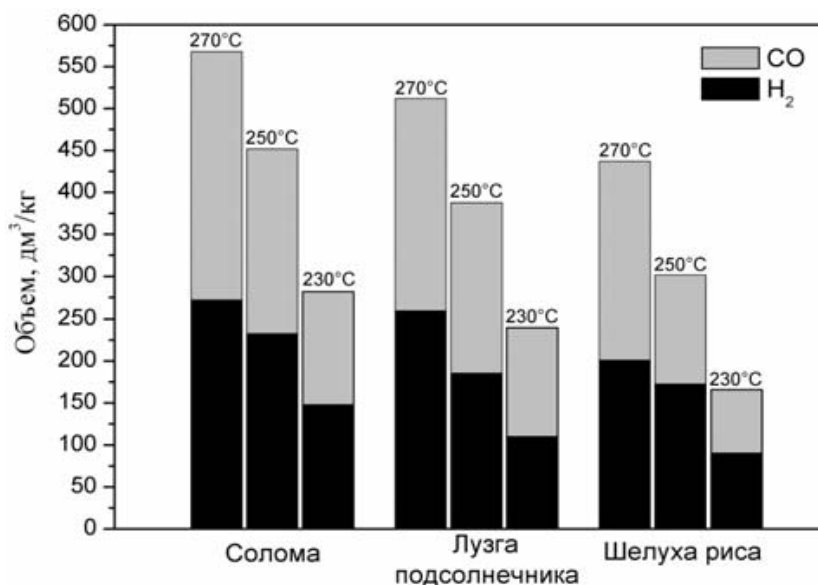


Рис. 1. Об'ємний вихід водню та окису вуглецю на 1 кг вихідної сировини (пеллети з соломи, лушпиння соняшника та лушпиння рису) при різних режимах торрифікації

У табл. 2 наведено зіставлення різних видів піролізу з погляду його тривалості, температури та одержуваних продуктів.

Аналіз цієї таблиці показує, що швидкість нагрівання біомаси істотно впливає на результат тарифікації. Для максимізації утворення вугілля слід використовувати низьку швидкість нагріву, невисоку кінцеву температуру та тривалий час проходження процесу. Щоб максимізувати вихід рідини, необхідно використовувати високу швидкість нагрівання до середніх температур 450-600 °C і короткий час піролізу. Для максимізації виходу газу, необхідне повільне нагрівання до високих температур 700-900 °C і тривалий час піролізу.

**Автотермальний піроліз соломи.** Стримуючим фактором застосування піролізу є необхідність підведення великої кількості тепла для здійснення процесу. В останні роки з'явилася низка робіт, що підвищують ефективність технологій піролізу біомаси за рахунок використання внутрішньої енергії біомаси. Процес піролізу може бути екзотермічним або ендотермічним залежно від умов реакції. Реакція піролізу є ендотермічною при виході вугілля менше 16-18% і стає дедалі більше екзотермічною з підвищенням виходу твердої фази. При піролізі біомаси в інтервалі температур 250-300°C відбуваються реакції термічного розпаду целюлози та гемоцелюлози, що супроводжуються виділенням тепла. У ряді робіт зазначено [3,4] що в залежності від виду біомаси, що переробляється за рахунок екзотермічного розігріву може додатково виділятися від 1400 кДж/кг до 1500 кДж/кг теплової енергії. У роботі [3] також наводяться вимоги до характеристик біомаси, у яких процес піролізу біомаси є екзотермічним. На рисунку 2 показано розподіл тепла у процесі піролізу біомаси.

Таблиця 2

Характеристики	Швидкий піроліз, низькі температури	Швидкий піроліз, високі температури	Повільний піроліз	Карбонізація
Час процесу	1с	1с	5-30 мін	часи, дні
Розмір сировини	малий	малий	середній	великий
Вологість сировини	дуже низька	дуже низька	низька	низька
Температура, С	450-600	650-900	500-700	400-500
Тиск, кПа	100	10-100	100	100
Продукти піролізу Газ: -вихід, % від маси сухої сировини -теплота спалювання, МДж/нм <sup>3</sup>	до 30 10-20	до 70 10-20	до 40 5-10	до 40 2-4
Рідина: - вихід, % від маси сухої сировини -теплота спалювання, МДж/кг	до 80 23	до 20 23	до 30 23	до 20 10-20
Тверда речовина: - вихід, % від маси сухої сировини -теплота спалювання, МДж/кг	до 15 30	до 20 30	20-30 30	30-35 30



Рис.2. Розподіл тепла у процесі піролізу біомаси

Необхідний сумарний тепловий ефект суттєво залежить від вологості біомаси. В [3] також показано, що при значенні вологості біомаси рівному 30,5% теплові витрати при зазначених умовах дорівнюють тепловому ефекту. Дане значення може бути розглянуто як граничне, при якому можлива термічна переробка біомаси в авто термічному режимі. Тільки у свіжій соломі і після зберігання вологість відповідає умовам протікання піролізу в автомобільному термальномому режимі. У стебла кукурудзи та соняшнику вологість до 60%, деревної тріски до 40%. Крім того, солома володіє низькою для органічних палив зольністю – 3%-4% і високим виходом летких газів – 78,5%, що говорить про її високу реакційну здатність та низьку температуру займання.



Нами пропонується також використовувати додаткову теплову енергію обсягом 850кДж/кг у вигляді перегрітої пари виходить при охолодженні вуглецевого залишку з температури 520°С до 200°С. (Рис.3).

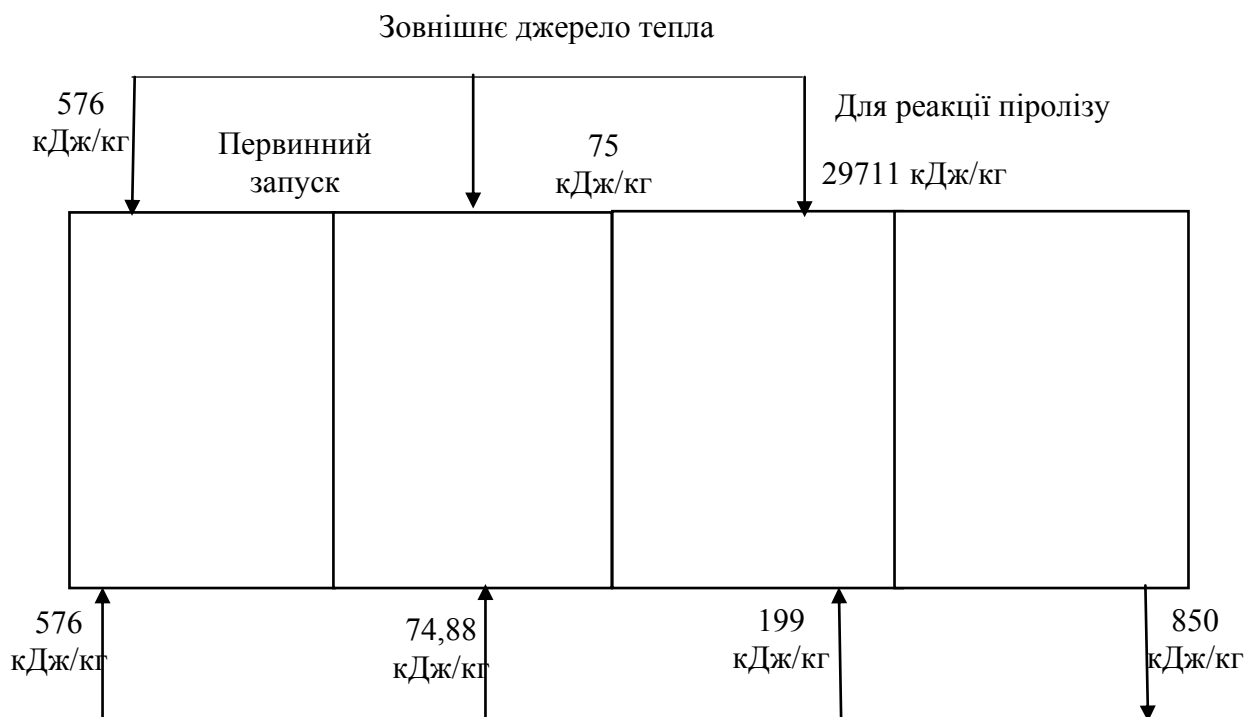


Рис. 3. Схема використання внутрішньої теплової енергії для процесу сушіння біомаси

Цієї теплової енергії достатньо для процесу сушіння соломи 576 кДж/кг та підігріву її до початку термічного розкладання соломи. Решту енергії від охолодження можна направити в зону термічного розкладання. Таким чином при автотермічному режимі торріфікації можливо заощадити 2250 кДж на кожний кілограм торріфікуємої соломи.

У роботі [6] показано, що кількість тепла необхідне для протікання екзотермічного режиму піролізу істотно залежить від швидкості підведення тепла в зону піролізу. Так, якщо швидкість підведення тепла збільшити з 50 до 200°С на секунду то потреба в зовнішньому теплі зменшиться в 2,5 рази з 29711 кДж до 11884 кДж. Таким чином, у запропонованій нами технології автотермічного піролізу соломи споживання зовнішнього тепла буде зменшено на 17827 кДж/кг чи 60%.

На рисунку 4 представлена технологічна схема піролізу соломи в автотермальному режимі з отриманням трьох видів продуктів піролізу:

- біовугілля - як альтернативного палива;
- биочара - як органічного добрива;
- синтез - газу - як альтернативного палива.

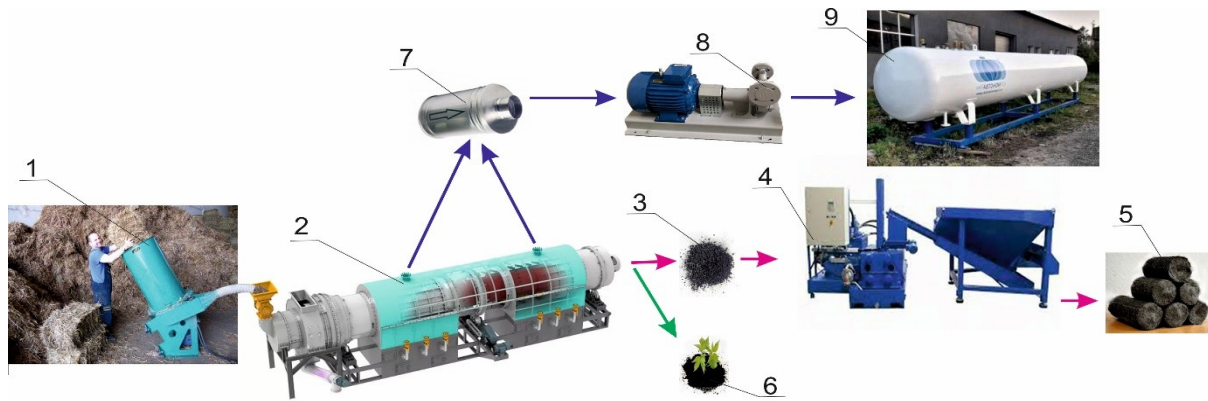


Рис. 4. Технологічна схема піролізу соломи в автотермальному режимі

Складається схема піролізу соломи з:

- 1 Соломорізка
- 2 Піролізна піч безперервної дії
- 3 Біовугілля
- 4 Брикету вальний прес
- 5 Вугільні брикети
- 6 Біочар (органічне добриво)
- 7 Фільтр вугільний
- 8 Турбінний насос з двигуном
- 9 Накопичувальна ємність

**Список використаної літератури:**

1. Prabir Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory. Elsevier Inc. 2010.
2. Антропов А. П., Исьемин Р. Л., Косов В. В., Косов В. Ф., Синельщиков В. А. Получение синтез-газа в процессе торрификации биомассы. *Альтернативная энергетика и экология*. 2011. № 10(102). С. 42-46.
3. Астафьев А. В., Табакаев Р. Б., Мусафиров Д. Е., Заворин А. С., Дубинин Ю. В., Языков Н. А., Яковлев В. А. Исследование тепловых эффектов пиролиза соломы для оценки возможности его реализации в автотермическом режиме. *Химия растительного сырья*. 2019. № 2.
4. Зайченко В. М., Марков А. В., Морозов А. В. Способ пиролиза гранулированной биомассы в автотермальном режиме. Объединенный Институт Высоких Температур РАН. Патент RU 2732411C1 от 16.09.2020.
5. Рондинеле Альберто Рейс Феррейра, Карла Силва Мейрелеш. Требуемое тепло и кинетика пиролиза соломы. *Журнал термического анализа и калориметрии*. 2018. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Heat-required-and-kinetics-of-sugarcane-straw-by-TG-Ferreira-Meireles/101f4f06a966fb110aabc3092b47aabe73ff4fdb>

**References:**

1. Prabir Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory. Elsevier Inc. 2010.
2. Antropov A. P., Isemin R. L., Kosov V. V., Kosov V. F., Sinelschikov V. A. Poluchenie sintez-gaza v protsesse torrifikatsii biomassyi. *Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2011. 10 (102). P. 42-46.
3. Astafev A. V., Tabakaev R. B., Musafirov D. E., Zavorin A. S., Dubinin Yu. V., Yazyikov N.A., Yakovlev V. A. Issledovanie teplovyih effektov piroliza solomyi dlya otsenki vozmozhnosti ego realizatsii v avtotermicheskom rezhime. *Himiya rastitelnogo syirya*. 2019. #2.
4. Zaychenko V. M., Markov A. V., Morozov A. V. Sposob piroliza granulirovannoy biomassyi v avtotermalnom rezhime. Ob'edinennyiy Institut Vvisokih Temperatur RAN. Patent RU 2732411C1 ot 16.09.2020.
5. Rondinele Alberto Reys Ferreyra, Karla Silva Meyrelesh. Trebuemoe teplo i kinetika piroliza solomyi. *Zhurnal termicheskogo analiza i kalorimetrii*. 2018. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Heat-required-and-kinetics-of-sugarcane-straw-by-TG-Ferreira-Meireles/101f4f06a966fb110aabc3092b47aabe73ff4fdb>

Надійшла до редакції 15.02.2022