УДК 662.61+662.63

М.М.Жовмір, канд.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Тривалість періоду виходу летких речовин при спалюванні часток соломи та солом'яних гранул

Описано методику експериментальних досліджень із визначення тривалості періоду виходу летких речовин при термолізі часток соломи та одиночних солом'яних гранул в умовах окислювальної атмосфери в муфельній печі. Досліджено вплив температури в печі, вологості, діаметра гранул. Термоліз часток соломи відбувається у 3-5 разів швидше, ніж солом'яних гранул. Залежність тривалості періоду виходу летких від температури має експонентний характер. Тривалість періоду виходу летких речовин для часток соломи та солом'яних гранул зростає зі збільшенням їх вологості.
Ключові слова: *солома, солом'яні гранули, термоліз, леткі, виділення, тривалість.*

Описана методика экспериментальных исследований по определению продолжительности периода выхода летучих веществ при термолизе частиц соломы и одиночных соломенных гранул в условиях окислительной атмосферы в муфельной печи. Исследовано влияние температуры в печи, влажности, диаметра гранул. Термолиз частиц соломы протекает в 3-5 раз быстрее, чем соломенных гранул. Зависимость продолжительности периода выхода летучих от температуры имеет экспоненциальный характер. Продолжительность периода выхода летучих из частиц соломы и соломенных гранул возрастает с увеличением их влажности.
Ключевые слова: *солома, соломенные гранулы, термолиз, летучие, выделение, продолжительность.*

Вступ. В Україні при сучасних обсягах господарської діяльності економічно доцільні річні ресурси біомаси для енергетичного використання становлять 14,95 млн т н.е., причому деревна біомаса становить лише 1,3 млн т н.е., або 8,4%, а ресурси твердої біомаси сільськогосподарських культур досягають 11,3 млн т н.е. (76%). У майбутньому з розширенням вирощування енергетичних культур ресурси біомаси для енергетичного використання можуть зрости до 25,4 млн т н.е. [1]. Незважаючи на переважання ресурсів сільськогосподарської біомаси, в Україні експлуатується лише біля 50 котлів зі спалюванням цілих тюків соломи та її річним обсягом споживання до 45-50 тис. т, хоч виробництво таких котлів потужністю від 150 до 860 кВт освоєно вітчизняним підприємством за ліцензією зарубіжної фірми більше 10 років тому. Застосування потужних котлів для спалювання соломи обмежується тим, що у сільських поселеннях та невеликих містах відбувається децентралізація систем теплопостачання. В ряді випадків в умовах щільної забудови відсутні вільні земельні ділянки для розміщення таких котлів, витратного складу палива, влаштування під'їзних доріг для великогабаритного транспорту, а також забезпечення належних санітарних зон та протипожежних заходів. Для забезпечення навантажувально-розвантажувальних робіт та експлуатації котлів для спалювання тюкованої соломи необхідні навантажувачі, що легко здійснити в умовах сільськогосподарського підприємства чи фермерського господарства, але є організаційно складним та витратним в умовах невеликих об'єктів соціальної сфери та комунального господарства.

У багатьох населених пунктах України припинено опалення цілого ряду будівель виробничої та соціальної сфери, а об'єкти, які ще потребують опалення, переводяться на автономні малопотужні котли потужністю до 100 кВт.

У країнах ЄС, зокрема в Австрії, в котельних установках систем теплопостачання потужністю до 1000 кВт, як правило, використовують товарні палива – паливну тріску та гранули, а відходи переробки деревини використовують переважно в котлах потужністю більше 1 МВт. У малих котлах потужністю до 100 кВт переважно використовують дрова та гранули [2].

В Україні є діючі та створюються нові заводи з виробництва солом'яних гранул сумарною

© М.М.Жовмір, 2015

потужністю 325 тис. т на рік з орієнтацією на експорт, де такі гранули використовуються як підстилка для домашніх тварин або як паливо на електростанціях. Проте експорт гранул має недоліки: це вивезення енергетичних ресурсів, яких не вистачає в Україні; експортні поставки нерегулярні; ціни значно залежать від кон'юнктури та пори року. Створення в Україні котелень на солом'яних гранулах є передумовою розвитку внутрішнього ринку таких гранул. Зважаючи на значне переважання ресурсів сільськогосподарської біомаси, в Україні використання солом'яних гранул є перспективним для малих опалювальних котелень, де використання потужних котлів зі спалюванням цілих тюків соломи не має економічних переваг або є організаційно складним.

Товарні тверді біопалива можуть мати різноманітну форму та розміри, що може впливати на характеристики обладнання для їх спалювання. Відповідно до стандарту *EN 14961-1:2010 "Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 1: General requirements"* торгова форма біопалива у вигляді гранул (пелет) може вироблятися діаметром 6, 8, 10 мм з довжиною часток 3,15-40 мм; діаметром 12 мм з довжиною 3,15-50 мм; діаметром 25 мм з довжиною 10-50 мм. Діючі в Україні підприємства переважно виробляють гранули діаметром 6 та 8 мм.

Відповідно до стандарту *EN 14961-2:2011 "Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2. Wood pellets for non-industrial use"* виробляють непромислові (побутові) деревні паливні гранули класів A1, A2 та B. Гранули класу A1 із вмістом золи до 0,7%, що вироблені з чистої деревини, використовують переважно в автоматичних побутових печах та котлах потужністю до 50 кВт, а гранули класу A2 із вмістом золи до 1,5% (з деревини із корою) та класу B із вмістом золи до 3,5% (переважно з відходів переробки деревини) використовують у більш потужних котлах до 500 кВт і вище. Такі котли застосовуються для опалення в побуті, опалення невеликих будівель у промисловості та соціальній сфері. Непромислові деревні гранули повинні мати температуру розм'якшення золи більше 1100°C.

Вимоги до гранул із сільськогосподарської сировини, що призначаються для спалювання в опалювальних печах та котлах потужністю до 500 кВт, встановлені стандартом *EN-14961-6:2012 "Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 6. Non-woody pellets for non-industrial use"*. За цим стандартом солом'яні гранули можуть вироблятися двох класів: A6.0 із вмістом золи A_d ≤6% та A6.0$^+$ із вмістом золи A_d >6%. Максимальний вміст вологи в солом'яних гранулах не повинен перевищувати W≤10%. Вимоги щодо плавкості золи стандартом не встановлені, але виробник гранул повинен надавати дані про її температури початку усадки, деформації, напівсфери та розтікання для умов окислювальної атмосфери.

Основною відмінністю соломи, як сировини для виробництва гранул, є низька температура початку розм'якшення золи, яка за різними даними становить від 720 до 900°C, що може викликати порушення у роботі топкових пристроїв при спалюванні соломи чи солом'яних гранул. У зв'язку з останнім розробка надійних топкових пристроїв для спалювання солом'яних гранул є актуальним завданням.

Практичний інтерес має створення топкових пристроїв для інтенсивного спалювання твердих біопалив, які зіставні з інтенсивністю горіння вугілля чи природного газу, що дозволить здійснювати переведення наявних котлів на доступне тверде біопаливо без зниження їх теплопродуктивності. З цією метою необхідно дослідити можливості інтенсифікації всіх стадій горіння палива. Найбільш поширеною технологією спалювання біомаси і твердих біопалив є спалювання у стаціонарному шарі, особливо у найбільш поширених котлах малої потужності. В роботі [3] описана картина фізико-хімічних процесів, що відбуваються при спалюванні дрібнокускової біомаси у шарі на рухомій колосниковій решітці, та показано, що внаслідок термолізу біомаси фактично відбувається роздільне спалювання двох похідних із неї палив (летких речовин та коксового залишку), виконано аналіз температурних умов, що складаються при їх горінні, а також обґрунтовано необхідні температурні та режимні умови спалювання летких та коксозольного залишку різних біопалив, включаючи солому та гранули з неї.

Відомо, що спалювання частки палива розпочинається з підготовчого етапу, коли відбува-

ється її прогрів, підсушування та термоліз, який полягає в розкладанні речовини палива на більш прості сполуки з виділенням газо- та пароподібних летких речовин. В роботах [4, 5] наведено результати розрахункових та експериментальних досліджень тривалості термолізу деревної тріски та деревних гранул. В доступній літературі не виявлено даних про кінетику термолізу соломи та солом'яних гранул.

У даній статті викладені результати експериментального дослідження тривалості термолізу часток соломи та одиночних солом'яних гранул у повітряному окислювальному середовищі при їх швидкому нагріві, тобто в умовах, наближених до їх спалювання у топці зі стаціонарним шаром.

Підготовка зразків соломи та солом'яних гранул. Для експериментального визначення тривалості виділення летких речовин використовували пшеничну солому комбайнового обмолоту, зразок якої було відібрано з полів у Кагарлицькому районі Київської області. Для проведення дослідів солому ножицями нарізали на частки довжиною 20 мм, діаметр недеформованих стебел становив 1,6-3,5 мм, а ширина сплющених стебел становила 2,6-5 мм. Товщина стінок стеблин становила 0,2-0,4 мм, а стеблин із залишком листа 0,45-0,60 мм. Маса однієї частки соломи становила до 0,020 г. У соломі знаходились і залишки вимолочених колосків розмірами до 20 мм у довжину та до 4×8 мм у перерізі, маса однієї частки вимолоченого колоска становила до 0,050 г. Вміст вологи в отриманій соломі становив 10,8%. За даними автора на практиці до котелень може постачатися солома із вмістом вологи 10-15% у сухій соломі, до 20-22% у відсирілій соломі та до 30% і більше у замоклій чи припорошеній снігом. Для проведення дослідів використовували зразки нарізаної соломи із вмістом вологи W=0%, W=10% та W=30%, що перекриває можливий її діапазон. Вміст вологи W=0% досягався висушуванням вихідної соломи до постійної маси в сушильній шафі при 105°С. Вміст вологи W=10% досягався її підсушуванням у приміщенні, а зразок із вмістом вологи 30% підготували шляхом відволоження вихідної соломи у ексикаторі над поверхнею води. Підготовлені зразки зберігали в герметичній посудині з періодичним контролем маси.

Гранули (пелети) діаметром 6 та 8 мм, що виготовлені з пшеничної соломи, отримали від промислових виробників із Черкаської та Вінницької областей та експериментального виробництва у м. Києві. Основні характеристики солом'яних гранул, що наведені в таблиці 1, визначали у відповідності з відомими методиками [6–8]. Як видно з наведених даних, гранули всіх виробників за вмістом золи можна віднести до класу $A6.0^{+}$ за стандартом *EN-14961-6:2012*, тобто до класу з високим вмістом золи.

З наявних партій гранул методом квартування з використанням пластини [9] виділяли наважку масою 0,25 кг і вручну сортували частки за їх довжиною за градаціями довжин <3,15 та дріб'язок [10]; 3,15-10; 10-20; 20-30; 30-40; >40 мм. Отриманий розподіл гранул за довжиною наведено в таблиці 2. З наведених даних видно, що для солом'яних гранул промислового виробництва з шифрами СГВ-6, СГВ-8 та СГЧ-8 основними є фракції з довжиною часток від 3,15 до 20 мм, а вміст гранул, довших за 20 мм, є незначним. Для гранул СГВ-6 діаметром 6 мм вміст дріб'язку та часток довжиною менше 3,15 мм досягає 12%, а для гранул діаметром 8 мм вміст дріб'язку є значно меншим. Гранули експериментального виробництва СГК-8Е характеризуються відсутністю дріб'язку, основними є фракції гранул довжиною від 20 до 40 мм, причому 9,2% мас. гранул мають довжину більше 40 мм, а найбільша довжина гранул становить 60 мм. Можна сказати, що гранули експериментального виробництва за гранулометричним складом не відповідають вимогам стандарту *EN 14961-1:2010*.

Таблиця 1. Характеристики досліджуваних солом'яних гранул

Шифр зразка	Діаметр гранул, d	Максимальна довжина гранул, l	Робочий вміст вологи (загальна волога), W	Вміст золи на суху масу, A_d	Густина гранул при робочій вологості, ρ_{ar}	Густина сухих гранул, ρ_d
	мм	мм	% мас.	% мас.	кг/м^3	кг/м^3
СГВ-6	6,0	25	9,2	10,1	1273	1172
СГВ-8	8,0	36	4,0	11,4	1351	1305
СГЧ-8	8,1	28	6,7	8,4	1176	1107
СГК-8Е	8,0	60	8,8	7,7	1124	1028

Таблиця 2. Розподіл солом'яних гранул за довжиною

Фракції гранул за довжиною, мм	СГВ-6		СГВ-8		СГЧ-8		СГК-8Е	
	Вміст фракції, %мас.	Середня маса гранули, г	Вміст фракції, %мас.	Середня маса гранули, г	Вміст фракції, %мас.	Середня маса гранули, г	Вміст фракції, %мас.	Середня маса гранули, г
<3,15	12,1	–	2,7	–	1.9	–	0	–
3,15-10	43,2	0,214	39,5	0,449	70,2	0,430	2,8	0,413
10-20	43,1	0,390	43,0	0,804	26,2	0,800	16,4	0,806
20-30	1,5	1,130	12,4	1,602	1,7	1,08	40,2	1,272
30-40	0	–	2,4	2,037	0	–	31,4	1,868
>40	0	–	0	–	0	–	9,2	2,875

В таблиці 2 також наведена середня маса гранул за фракціями. Для солом'яних гранул діаметром 8 мм із шифрами СГВ-8 та СГЧ-8 усереднена маса гранул фракцій 3,15-20 мм становить 0,584 г та 0,496 г відповідно. Для гранул діаметром 6 мм для тих же фракцій усереднена маса гранули становить 0,278 г, а середня маса часток розміром від 10 до 20 мм становить 0,390 г.

У попередніх роботах [4, 5] досліджували термоліз часток деревної тріски та деревних гранул масою близько 0,50 г у сухому стані. Для забезпечення можливості зіставлення результатів, що отримані для різних палив, та виявлення впливу виду біомаси на протікання термолізу в даній роботі також зорієнтувалися на проведення досліджень часток солом'яних гранул масою 0,50 г у сухому стані. Така маса часток є наближеною до реальної середньої маси гранул діаметром 8 мм.

Для проведення дослідів підготували частки у вигляді правильних циліндрів діаметром 8 мм та довжиною близько 8 мм, що вирізані з бездефектних солом'яних гранул і мають масу в сухому стані 0,50±0,02 г. З гранул діаметром 6 мм вирізали циліндри довжиною близько 14 мм і масою в сухому стані також близько 0,50±0,02 г.

Як видно з таблиці 1, гранули різних виробників відрізняються вмістом вологи, а тому для зіставлення результатів доцільно привести їх до однакового вмісту вологи. Для проведення дослідів із визначення тривалості періоду виходу летких підготували зразки вказаних гранул із робочим вмістом вологи W=0%, W=10% та W=15%. Вміст вологи W=0% досягали при висушуванні гранул до постійної маси в сушильній шафі при 105°С. Вміст вологи W=10% відповідає вимогам стандарту на солом'яні гранули *EN-14961-6:2012*, а вміст вологи W=15% є граничним вмістом вологи у гранулах відповідно до стандарту *EN 14961-1:2010*. Зразки гранул із вмістом вологи 10% та 15% підготували шляхом відволоження вихідних зразків у ексикаторі над поверхнею води.

Слід відмітити, що при висушуванні вихідних гранул, а також при відволоженні до вмісту вологи W =10% форма та розміри гранул практично не змінювалися. При відволоженні гранул до вмісту вологи W=15% частки гранули, що були вирізані з вказаними номінальними розмірами, дещо змінювали форму та розміри. Найбільш стабільними були гранули експериментального виробництва СГК-8Е, які зберігали геометричну форму і гладку поверхню, а діаметр збільшувався до 8,4 мм та довжина до 10 мм. Гранули СГЧ-8 зберігали геометричну форму, але поверхня ставала шорсткою через підіймання волокон та розкривання незначних тріщин; їх діаметр збільшувався до 8,9 мм та довжина до 10 мм. На гранулах СГВ-6 та СГВ-8 поверхня ставала шорсткою, а на бічній поверхні розкривалися поперечні тріщини шириною до 0,5 мм; діаметр гранул СГВ-6 збільшувався до 6,4 мм та довжина до 15-16 мм; діаметр гранул СГВ-8 збільшувався до 9,7 мм та довжина до 9,5-10 мм.

Методика експериментального дослідження впливу температури на тривалість періоду виходу летких. Для проведення експериментів використовували штатив із жаростійкого дроту, на якому влаштована горизонтальна поличка з нержавіючої сітки з чарункою 1 мм. Підготовлену солом'яну гранулу клали горизонтально на сітчастий штатив. У випадку часток соломи наважку масою 0,50±0,02 г укладали купкою на поличці. Штатив з гранулою (або частками соломи)

переносили в муфельну піч, рівномірно розігріту до заданої температури при відкритому доступі повітря.

Муфельна піч має внутрішній простір шириною 200 мм, висотою 120 мм і довжиною 300 мм. Для зменшення теплових втрат усередині печі перед дверцятами встановлено перегородку з перлітової цегли товщиною 40 мм, у якій влаштовано канал розміром 60×70 мм для введення вказаного штативу. Вимірювання температури в печі та її підтримання здійснювали за допомогою термоелектричного перетворювача типу К з цифровим мікропроцесорним регулятором температури РТ-0102 та безконтактним силовим блоком у колі живлення нагрівача печі. Налаштування регулятора забезпечувало підтримання встановленої температури печі з відхиленням ±10°С. Досліди проводили при температурах муфельної печі 400, 500, 550, 600, 700, 800 та 860°С.

Видиму тривалість виділення летких речовин відраховували за допомогою секундоміра від посадки штатива з гранулою в піч до моменту припинення інтенсивного полум'яного горіння летких довкола частки та переходу до безполум'яного вигоряння коксового залишку. При низьких температурах печі (400-500°С) спалахування летких не відбувалося, а тому тривалість їх виділення відраховували до припинення видимого димлення у просторі печі.

Для забезпечення відтворюваності експериментальних даних важливо, щоб у складі кожної наважки соломи були всі морфологічні частини – стебло, листки, вузли та частини колоска. Якщо у наважці представлені лише стебло та листки, то прогрів і термічне розкладання наважки соломи відбувається майже у два рази швидше.

За стандартною методикою вихід летких речовин визначають шляхом нагрівання аналітичної проби палива з розміром часток менше 1 мм у закритому тиглі протягом 7 хвилин [11]. Виникає питання: наскільки повним є виділення летких при термолізі солом'яних гранул діаметром 6-8 мм в окислювальній атмосфері печі за час значно менше 7 хвилин у ході описаного експерименту. Для відповіді на це питання провели наступний дослід. На штатив укладали кілька (4-6) сухих гранул, після виходу летких розжарений коксозольний залишок зважували з похибкою ±0,01 г. Різницю маси сухих гранул та коксозольного залишку приймали за масу летких, що виділилися. Визначено, що при термолізі солом'яних гранул в окислювальній атмосфері печі до моменту затухання видимого полум'я вихід летких із досліджуваних зразків становив v_{daf} =0,793-0,807, а за літературними даними для соломи v_{daf} =0,81 [12]. Це свідчить, що в ході описаних експериментів за видимий період виходу летких відбувається їх практично повне виділення.

Отримані результати. У першій серії експериментів досліджено тривалість періоду виходу летких з 0,50±0,02 г часток соломи із вмістом вологи W=0%, W=10% та W=30% залежно від температури в муфельній печі, а отримані дані наведено на рис. 1. Зі зростанням температури в муфельній печі з 400 до 850°С тривалість періоду виходу летких речовин із часток сухої соломи зменшується від 43 до 8 с, а в разі часток соломи із вмістом вологи W=30% зменшується від 57 до 13 с. Тривалість виходу летких із соломи з вмістом вологи W=10% має проміжні значення при відповідних температурах. При збільшенні температури в муфельній печі з 400 до 700°С спостерігається різке зменшення тривалості періоду виходу летких, а при подальшому зростанні температури печі вихід летких прискорюється незначно.

З отриманих даних випливає, що на тривалість періоду виходу летких впливає вологість часток соломи, причому при низьких температурах печі у більшій мірі. Так, при температурі в печі 400°С збільшення вологості соломи з W=0% до W=30% приводить до зростання тривалості періоду виходу летких на 14 с, а при температурах печі понад 700°С – лише на 5 с.

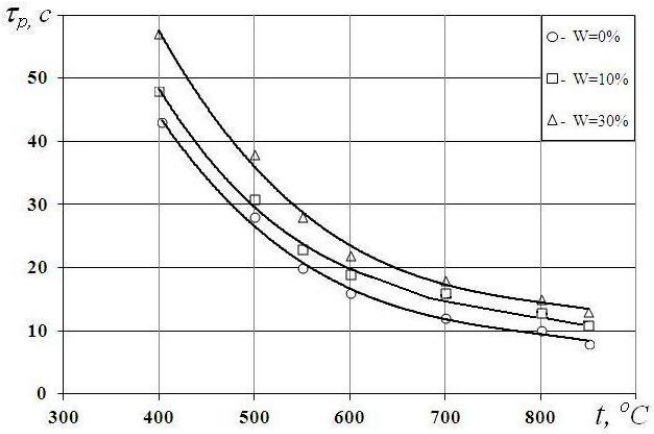

Рис. 1. Тривалість періоду виходу летких із часток соломи з вмістом вологи W=0%, W=10%, W=30% залежно від температури (*точки* – експериментальні дані; *лінії* – узагальнюючі криві).

На рис. 2 наведено отримані дані про тривалість періоду виходу летких із часток солом'яних гранул СГВ-6 діаметром 6 мм і масою 0,50±0,02 г при вмісті вологи W=0%, W=10% та W=15% залежно від температури в муфельній печі. Зі зростанням температури в муфельній печі з 400 до 860°С тривалість періоду виходу летких із сухих солом'яних гранул зменшується від 140 до 40 с, а в разі гранул із вмістом вологи W=15% зменшується від 200 до 52 с. Значення тривалості виходу летких із гранул при вмісті вологи W=10% мають проміжні значення, причому при низьких температурах вплив вологи також більш значний, ніж при високих температурах.

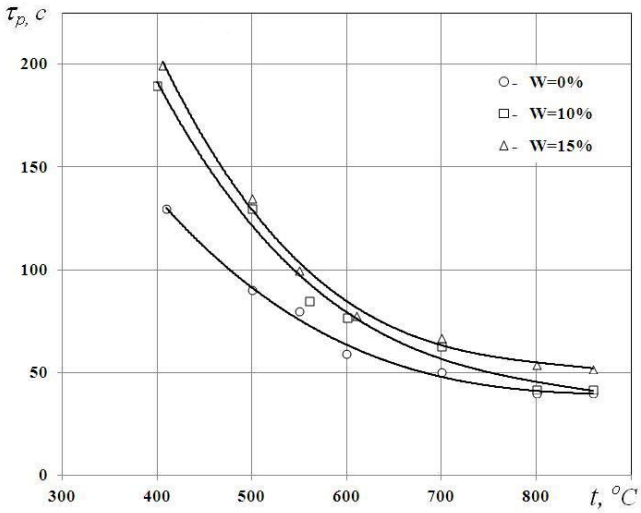

Рис. 2. Тривалість періоду виходу летких τ_p із часток солом'яних гранул СГВ-6 при вмісті вологи W=0%, W=10%, W=15% залежно від температури в печі t (*точки* – експериментальні дані; *лінії* – узагальнюючі криві).

На рис. 3 наведено отримані дані про тривалість періоду виходу летких із солом'яних гранул діаметром 8 мм СГВ-8, СГЧ-8, СГК-8Е масою 0,50±0,02 г при вмісті вологи W=0% та W=10% залежно від температури в муфельній печі. Зі зростанням температури в муфельній печі з 400 до 860°С тривалість періоду виходу летких із сухих солом'яних гранул зменшується від 140 до 45 с, а в разі гранул із вмістом вологи W=10% зменшується від 195-205 до 53-57 с. Як видно з рисунка, для гранул різних виробників при вмісті вологи до 10% дані про тривалість періоду виходу летких та характер впливу вмісту вологи практично співпадають. Порівняння даних, що наведені на рис. 1 та рис. 2, дозволяє зробити висновок, що тривалість періоду виходу летких із часток солом'яних гранул діаметром 6 мм менша, ніж із часток гранул діаметром 8 мм, але ця відмінність незначна.

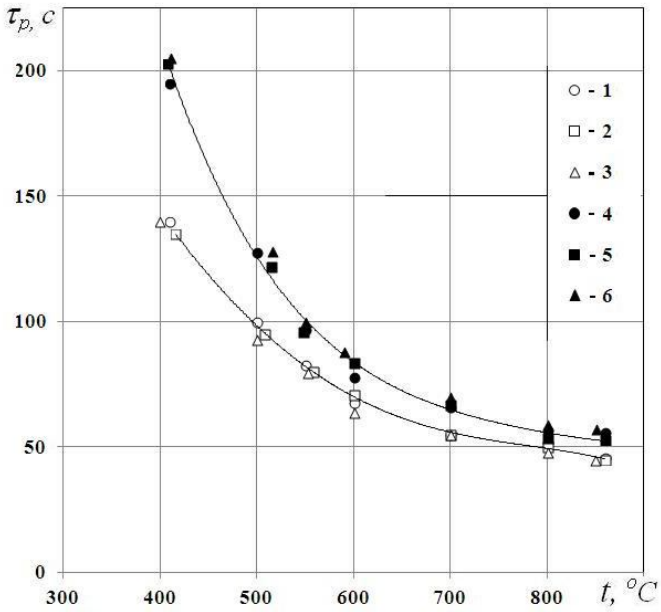

Рис. 3. Тривалість періоду виходу летких τ_p із часток солом'яних гранул СГВ-8 (точки 1 і 4), СГЧ-8 (точки 2 і 5), СГК-8Е (точки 3 і 6) при вмісті вологи W=0% (точки 1, 2, 3) та W=10% (точки 4, 5, 6) залежно від температури в печі t (*точки* – експериментальні дані; *лінії* – узагальнюючі криві).

Вище було зазначено, що відволоження гранул до вмісту вологи W=15% призводить до зміни їх форми та розмірів, що в свою чергу обумовило відмінність тривалості періоду виходу летких. На рис. 4 наведено отримані дані про тривалість періоду виходу летких із солом'яних гранул СГВ-8, СГЧ-8, СГК-8Е діаметром 8 мм і масою 0,50±0,02 г при вмісті вологи W=0% та W=15% залежно від температури в муфельній печі. Для гранул СГК-8Е, які найменше змінюють форму та розміри при відволоженні, при вмісті вологи W=15% тривалість періоду виходу летких (точки 9 на рис. 4) більша, ніж для них у сухому стані (точки 3 на рис. 4) і близька до значень, отриманих при вмісті вологи W=10% (точки 6 на рис. 3). Подібна залежність характерна і для гранул СГЧ-8. Для гранул СГВ-8, які найбільше змінюють форму та розміри при відволоженні, при вмісті вологи W=15% тривалість періоду виходу летких (точки 7 на рис. 4) більша, ніж для них у сухому стані (точки 1 на рис. 4), але менша, ніж при вмісті вологи 10% (точки 4 на рис. 3) при низьких температурах (400-700°С), а при високих температурах

печі (800-860°С) близька до значень, отриманих для сухих гранул при цих температурах. Можна допустити, що збільшення необхідної витрати енергії на прогрів гранули СГВ-8 через збільшення вмісту вологи компенсується збільшенням теплового потоку від пічного простору до гранули за рахунок збільшення її зовнішньої поверхні.

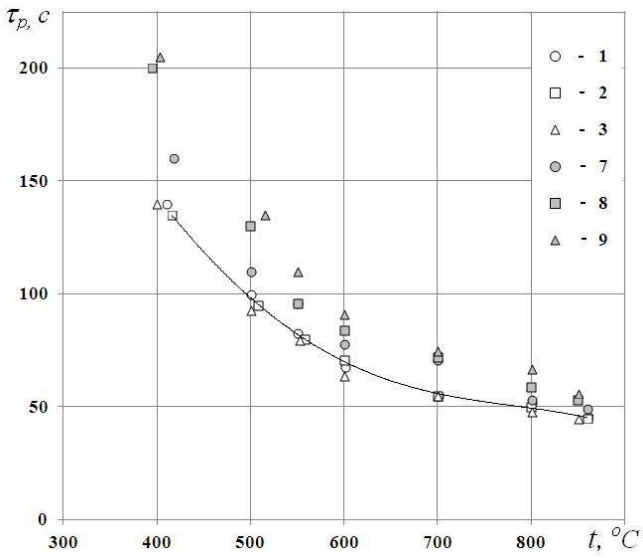

Рис. 4. Тривалість періоду виходу летких τ_p із часток солом'яних гранул СГВ-8 (точки 1 і 7), СГЧ-8 (точки 2 і 8), СГК-8Е (точки 3 і 9) при вмісті вологи W=0% (точки 1, 2, 3) та W=15% (точки 7, 8, 9) залежно від температури в печі t.

На рис. 1-4 отримані експериментальні дані узагальнені кривими, що за характером близькі до експоненти. На основі цього можна припустити, що залежність тривалості періоду виходу летких від температури має експонентний характер.

Висновки. 1. При збільшенні температури в муфельній печі з 400 до 700°С як для часток соломи, так і для часток солом'яних гранул спостерігається різке зменшення тривалості періоду виходу летких, а при подальшому зростанні температури печі вихід летких прискорюється незначно. Це дозволяє зробити припущення, що при організації спалювання солом'яних гранул у зоні термічного розкладання палива достатньою може бути температура 700°С, а подальше її збільшення недоцільне як через незначний вплив на швидкість виходу летких, так і через небезпеку можливого сплавляння золи соломи.

2. При температурі 700°С у зоні термічного розкладання палива відхилення вологості гранул від стандартизованого значення W=10% до максимально допустимого значення W=15% приводить до збільшення тривалості виходу летких на 5 с, або на 10-12%, а при використанні висушених гранул тривалість виходу летких зменшується на 15 с, або на 25%.

3. Тривалість періоду виходу летких із солом'яних гранул τ_p=60-70 с при вмісті вологи W=10% і температурі 700°С можна розглядати як необхідний час перебування солом'яних гранул у зоні підготовки і термічного розкладання палива.

4. З порівняння тривалості періоду виходу летких з однакових за масою наважок часток соломи та солом'яних гранул можна стверджувати, що термічне розкладання та вихід летких із соломи відбувається у 3-5 разів швидше, ніж із гранул. Це вказує на доцільність організації керованого повільного спалювання солом'яних гранул в установках малої потужності та швидкісного спалювання солом'яної січки в установках великої потужності.

1. *Оцінка* енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз. / [Г.Г. Гелетуха, Т.А. Желєзна, М.М. Жовмір, Ю.Б. Матвєєв, О.І. Дроздова] // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – №1. – С. 57–64.

2. *Voglauer B*. Austrian Biomass boiler Manufacturers. Survey / B. Voglauer, J. Rathbauer – Austrian Bioenergy Centre GmbH, 2005. – 80 p.

3. *Жовмір М.М.* Теоретичні температури горіння біомаси та продуктів її термолізу // Відновлювана енергетика. – 2013. – №3(34). – С. 72–77.

4. *Жовмир Н.М.* Исследование продолжительности периода выхода летучих при горении частиц древесины // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35. – №1. – С.93–98.

5. *Жовмир Н.М.* Исследование продолжительности периода выхода летучих при горении древесных гранул // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №23(163). – С. 60–66.

6. *Біопаливо* тверде. Методи визначання вмісту вологи висушуванням у сушильній шафі. Частина 1. Стандартний метод визначання загальної вологи : ДСТУ-П CTN/TS 14774-1:2012. – К.: Мінекономрозвитку України, 2013. – 4с.

7. *Біопаливо* тверде. Метод визначання вмісту золи: ДСТУ-П CEN/TS 14775:2012. – К.: Мінекономрозвитку України, 2013. – 4с.

8. *Біопаливо* тверде. Методи визначання щільності часток : ДСТУ-П CEN/TS 15150:2012. – К.: Мінекономрозвитку України, 2013. – 8с.

9. *Біопаливо* тверде. Методи готування проб: ДСТУ-П CEN/TS 14780:2012. – К.: Мінекономрозвитку України, 2013. – 12с.

10. *Біопаливо* тверде. Методи визначання гранулометричного складу. Частина 1. Метод з використанням вібраційного решета з отворами 3,15 мм і більше: ДСТУ CEN/TS 15149-1:2009. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 7 с.

11. *Біопаливо* тверде. Методи визначання вмісту летких речовин: ДСТУ EN 15148:2012. – К.: Мінекономрозвитку України, 2013. – 6 с.

12. *Древесина* для производства энергии. Технология – окружающая среда-экономика / [Helle Serup (редактор)] / Центр технологий биомассы. – Energistyrelsen Miljo-og Energiministeriet, 1999. – 69 с. – www.ens.dk

УДК 577.23:620.95

Н.Б.Голуб, докт.техн.наук, **Д.І.Драпой** (НТУУ "КПІ", Київ)

Отримання водню з відходів кукурудзи та соняшника при збагаченні природної асоціації мікроорганізмів родами *Clostridium* та *Bacillus*

Досліджено здатність до продукування водню з целюлозовмісної сировини в анаеробному мезофільному ферментативному процесі природних асоціацій мікроорганізмів, які виділено з ґрунту та озера. Показано, що вихід водню залежить від видового складу мікроорганізмів асоціації. Додаткове збагачення природної асоціації одночасно мікроорганізмами родів Clostridium і Bacillus приводить до суттєвого зниження терміну лаг-фази та підвищення виходу водню в 4 рази у порівнянні з природною асоціацією. За таких умов вміст водню в біогазі підвищується і досягає 85±5%.

Ключові слова: *природна асоціація мікроорганізмів, водень, целюлоза, сільськогосподарські відходи, Clostridium, Bacillus.*

Исследована способность к выделению водорода из целлюлозосодержащего сырья в анаэробном мезофильном ферментативном процессе природных ассоциаций микроорганизмов, выделенных из почвы и озера. Показано, что выход водорода зависит от видового состава микроорганизмов в ассоциации. Дополнительное обогащение природной ассоциации одновременно микроорганизмами родов Clostridium и Bacillus приводит к существенному снижению срока лаг-фазы и повышению выхода водорода в 4 раза по сравнению с природной ассоциацией. При таких условиях содержание водорода в биогазе повышается и достигает 85±5%.

Ключевые слова: *природная ассоциация микроорганизмов, водород, целлюлоза, сельскохозяйственные отходы, Clostridium, Bacillus.*

Більше 80% енергії отримують з викопного палива. Його використання призводить до забруднення навколишнього середовища відходами виробництва, кліматичних змін та швидкого виснаження природних ресурсів, що спонукає спільноту до пошуку відновлюваних екологічно чистих джерел енергії. Таким енергоносієм є водень, сучасні технології одержання якого є енергоємними процесами і потребують, окрім електролізу води та газифікації біомаси, енергетичних викопних ресурсів [1]. Відновлюваною сировиною для отримання водню можуть слугувати відходи сільськогосподарської та харчової промисловості. Ферментативний процес можна проводити в мезофільних або термофільних умовах за використання чистих культур або асоціацій мікроорганізмів. Ефективність продукування водню мікроорганізмами залежить від співвідношення видів мікроорганізмів у реакторі, оскільки змішані культури можуть створити необхідні комбінації метаболічних шляхів для переробки різних інгредієнтів, що містяться у біоенергетичній сировині, і, відповідно, створити умови до більш ефективного розкладу біомаси, ніж чисті види бактерій [2]. При використанні як чистих культур, так і угруповань мікроорганізмів, з підвищенням температури зростає швидкість деструкції сировини, змінюється метаболізм, зменшується приріст біомаси, розчинність газів CO_2 та H_2 і підвищується вихід водню. Але в термофільних умовах низький приріст біомаси може призвести до зміни метаболізму мікроорганізмів при старінні культури з використанням безперервного процесу, що негативно впливає на вихід водню.

© Н.Б.Голуб, Д.І.Драпой, 2015