

П'яних К.Є., канд. техн. наук, Романчук Б.М.

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: pyanykh@mail.ru

Підвищення енергетичних характеристик палив сільськогосподарського походження за рахунок термічної обробки

Зроблено оцінку потенціалу зниження об'ємів споживання природного газу за рахунок економії та заміщення іншими енергоресурсами. Представлено дані щодо наявності ресурсу для заміщення природного газу. Як такий ресурс розглянуто біопаливо сільськогосподарського походження та тверді побутові відходи. Показано шляхи використання проблемних паливно-енергетичних ресурсів. Розглянуто технологію покращення їх якості за рахунок термічної обробки. Представлено характеристики вихідної та торрефікованої біомаси. Надано матеріали з комплектації та експлуатації дослідницького стенду термообробки біомаси. Описано шляхи використання торрефікованої соломи, у тому числі у складі комбінованих палив. Проведено хімічний аналіз газів, отриманих під час термообробки та підтверджено можливість їх використання для енергозабезпечення процесу торрефікації. Показано, що відносно висока швидкість набору температури у процесі термообробки та рівень температур вище за 260 °С дає змогу отримувати висококалорійне тверде паливо та горючі гази для забезпечення процесу термообробки. *Бібл. 16, рис. 4, табл. 4.*

Ключові слова: біомаса, відходи сільгоспвиробництва, тверді побутові відходи, теплота згоряння, торрефікація, час термообробки.

Розширення використання місцевих енергоресурсів з метою заміщення природного газу, яке відбулося за останній час, продемонструвало свою економічну ефективність. Суттєво зросло споживання біопалива. Збільшення використання поновлюваних ресурсів відповідає концепції сталого розвитку. У віддаленій перспективі саме цей шлях має привести до розвитку, що задовольняє потреби теперішнього часу, але не ставить під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби [1]. Однак, у зв'язку з великими змінами вартості енергоносіїв у підході до заміщення традиційних енергоресурсів біопаливом виникли очевидні перекося. Відбувається істотне зростання використання деревини як палива. При цьому основна тенденція — мінімізація витрат на підготовку біопалива, що призводить до зменшення його вартості на шкоду ефективності. У промислових масштабах в енергетичних котлоагрегатах спалюється тріска природної вологості, для опалення застосовується свіжоспиляна деревина. Наслідки такої діяльності очевидні — майбутнє різке зниження кількості лісів, заборонні заходи держави, подорожчання деревини та палив на її основі. У зв'язку з цим необхідне швидке розширення бази використовуваних палив за рахунок вклю-

чення в господарський оборот палив сільськогосподарського походження, а також твердих побутових відходів.

Біопаливо. Ресурс та методи використання

Приблизна оцінка можливих обсягів заміщення природного газу в паливно-енергетичному балансі України, зроблена у 2012 р., показала потенціал у межах 5,0–8,5 млрд м³/рік [2]. Деревина не спроможна замінити такі об'єми споживання, тому необхідне суттєве розширення номенклатури біопалив для використання в промисловості, енергетиці та для побутових потреб. Аналіз потенціалу біопалив України, зроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України, показав, що економічно досяжний потенціал біомаси — відходів сільськогосподарського походження — становить близько 14 млн т у.п., перекиваючи можливий обсяг споживання цього ресурсу [3]. Збільшення використання сільськогосподарських відходів може суттєво зменшити навантаження на лісове господарство, зберігаючи ліси України, які вкривають менш ніж 16 % площі її земель на відміну від 33 % — середнього показника для країн Євросоюзу.

Лузга соняшнику активно використовується як паливо на підприємствах його переробки, застосовується для опалювання обертових печей [4], пелети з лузги у великій кількості виробляються на підприємствах виробництва соняшникової олії. Цей ресурс вже пропонується на ринку та потребує застосування обладнання та технологій, розрахованих на його споживання. Кардинально відрізняється ситуація з використання інших видів сільськогосподарських відходів. Через низьку температуру плавлення зольного залишку [5] не знаходять свого споживача пелети із соломи. Загальні для всіх відходів сільського господарства проблеми зі збиранням та переробкою, з одного боку, та невизначеність із споживанням, з іншого – не сприяють інвестуванню у розширення номенклатури біопалив на основі цього ресурсу.

Окрім відходів сільськогосподарської діяльності, існують інші проблемні енергоресурси. Найбільш потужний з них – тверді побутові відходи (ТПВ). Річне утворення ТПВ становить близько 11–12 млн т. Побутові відходи за своїм тепловим еквівалентом можуть забезпечити заміщення близько 3 млрд м³ природного газу [6]. Робота по залученню ТПВ в енергетичний баланс країни дозволяє вирішити дві проблеми: зменшити навантаження на навколишнє середовище за рахунок утилізації відходів та знизити споживання викопних палив. Очевидно, що використання ТПВ як палива можливо далеко не скрізь.

До обладнання, що використовується для спалювання відходів, пред'являються особливі вимоги. Обов'язковою при спалюванні безпечних відходів є підтримка в топковому просторі температури не менш 850 °С та витримка при цій температурі газоподібних продуктів протягом мінімум 2 с. Якщо спалюються небезпечні відходи із вмістом понад 1 % галогенних органічних сполук, виражених як хлорин, темпе-

ратура має бути не менш 1100 °С [7]. Вказані умови існують у високотемпературних обертових печах опалювання вапна, виробництва клінкеру. Цілком задовольняє наведеним вимогам доменний процес. Таким чином, у високотемпературних промислових технологіях може бути широко використане проблемне для інших споживачів паливо біологічного походження. Це твердження стосується твердих побутових відходів, а також відходів сільського господарства.

Теплотехнічні характеристики проблемних на теперішньому етапі розвитку палив не задовольняють вимогам високотемпературних процесів, а механічні властивості та логістика не відповідають технологічному ланцюгу підготовки палива. Найбільш раціональним шляхом приведення цих показників до рівня вимог, встановлених технологічними процесами, з нашої точки зору, є підготовка палива в умовах низькотемпературної термічної обробки. Ця методика отримала назву «торрефікація» (torrefaction – обжарка).

У процесі торрефікації біомаса нагрівається до 250–350 °С в атмосфері з низькою концентрацією кисню, при цьому видаляються вся волога та частка летких речовин. По суті торрефікація є м'яким низькотемпературним піролізом палива. В ідеалі енергія, що міститься в летких, є достатньою для нагріву вихідного матеріалу, тому термічний ККД процесу перевищує 95 %. У результаті обробки збільшуються об'ємна щільність енергії та теплотворна спроможність палива, покращуються його транспортні характеристики та фізичні властивості. В Європі над розробленням технології торрефікації та обладнання працюють 22 компанії у 9-ти країнах. Частково характеристика стану розроблення та використання торрефікації представлена в оглядових роботах [8–12].

З табл.1 видно, як змінюються характеристики палива у процесі його пелетування та

Таблиця 1. Порівняння характеристик вихідного та термообробленого біопалива на основі деревини та соломи з бітумінозним вугіллям

Параметр	Деревина [8]			Солома		Пелети з торрефікованої біомаси	Бітумінозне вугілля
	тріска	пелети	торрефікована	в тюках	торрефікована		
Вологість, % (мас.)	30–60	7–10	3	10–15	1–3	1–5	5–10
Масова щільність, кг/м ³	250–400	600–650	230	80–90	40–50	750–850	800–1000
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	6–13	16,2	19,9	15,6	19	19–22	> 25
Енергомісткість МВт·год/т	1,7–3,6	4,5	5,5	4,3	5,2	5,2–6,2	7
Щільність енергії, МВт·год/м ³	0,7–0,9	3	1,3	0,4	0,23	4,2–5	5,6–7
Гігроскопічність	так	так	ні	так	ні	ні	ні
Біологічна деградація	так	так	ні	так	ні	ні	ні

торрефікації. Нижча теплота згоряння палив на основі деревини та на основі соломи після їх торрефікації зростає на 22–35 %, що майже досягає рівня цього показника для бітумінозного вугілля.

Важливо, що торрефікована біомаса гідрофобізується (втрачає можливість поглинати вологу), що є додатковим позитивним показником термообробленого біопалива. Пелета, вироблена з торрефікованої біомаси без додавання в'язучих, не розпадається навіть за умови перебування у воді та не поглинає вологу. Маса пелети, виготовленої з торрефікованої соломи та зануреної у воду на 3 год, збільшилася за рахунок поглинання вологи на 16 %, а протягом доби поглинула вологи лише 21 % від маси первинного матеріалу.

Термічна обробка призводить до зростання теплоти згоряння твердого палива та підвищення теоретичної температури згоряння (табл.2), що підвищує ефективність використання твердого палива у високотемпературних технологічних процесах. Це дає можливість застосовувати таке паливо в обертових печах обпалювання клінкеру та вапна, забезпечуючи економічно доцільне заміщення викопних палив.

Дослідна установка торрефікації біомаси

Переваги торрефікованого біопалива обумовлюють зацікавленість у розробці промислової технології термообробки біоматеріалів. З метою опрацювання технології торрефікації створено установку (рис.1), яка складається з трьох теплообмінників, встановлених один над одним. Теплообмінники мають ідентичну конструкцію: проміжний теплоносій подається у кільцевий канал між зовнішньою та внутрішньою герметичними оболонками, а матеріал, що обробляється, переміщується у внутрішньому просторі, нагріваючись за рахунок теплообміну через стінку.

Верхній теплообмінник (сушарка) 1 підсушує матеріал перед його подальшою обробкою. Основна функція середнього теплообмінника (теплообмінник попереднього нагрівання) 2 –

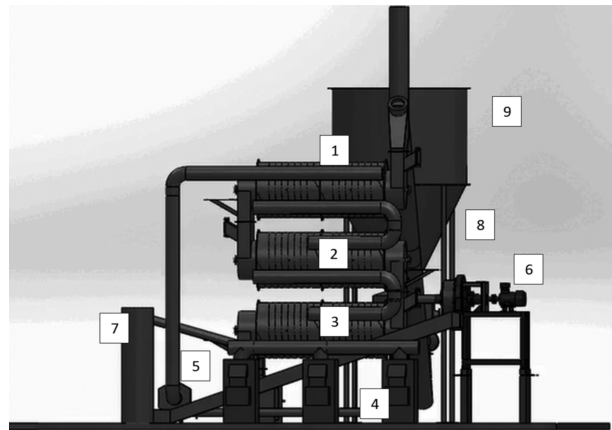


Рис.1. Установка торрефікації.

завершення сушіння та попередній нагрів матеріалу, що надходить для подальшої обробки у нижній теплообмінник. Нижній теплообмінник (бочка торрефікації) 3 забезпечує термообробку підготовленої біомаси. Основне джерело енергії для опалення установки – печі нагріву проміжного теплоносія 4, в яких спалюється біопаливо, нагріваючи теплоносій, що рециркулює у комплексі за рахунок приводу подачі теплоносія 5.

Обробка біомаси здійснюється за рахунок нагрівання у теплообмінниках через стінку та прямого нагріву газами, що утворюються в процесі термообробки у нижньому теплообміннику, газоподібними продуктами піролізу. Рух продуктів піролізу у внутрішньому об'ємі установки забезпечується вентилятором 6, нагрівання до заданої температури – теплообмінником 7, димові гази, що відбираються з печей нагріву теплоносія 4, – димососом (на схемі не показаний). Димові гази проходять через оболонку шнекового транспортеру 8, розігріваючи його корпус, що перешкоджає конденсації водяної пари на його внутрішній поверхні та в об'ємі матеріалу, який подається на термообробку. Установка забезпечує можливість обробки подрібненої соломи (до 50–70 мм), лузги соняшнику, подрібненої деревини (< 10 мм). Матеріал для обробки подається з бункера механізованого 9 у шнек подачі біомаси 8. Витрата біомаси, яка подається з бункера 9, регулюється за рахунок зміни швидкості обертання шнекового транспортера, що входить до комплектації механізмів бункера. Розрахункова продуктивність установки 50–100 кг/год.

Біомаса подається у шнек, де знаходиться близько 90 с, перебуваючи у контакті з поверхнями шнекового транспортера, нагрітими продуктами згоряння. Температура продуктів згоряння, що надходять на обігрів шнека, контро-

Таблиця 2. Характеристики вихідного та торрефікованого твердого палива

Температура процесу, °С	Теплота згоряння $Q_{pн}$, ккал/кг	Теоретична температура горіння $T_{ад}$, °С
Вихідна сировина (вологість 7,9 %)	3954	1738
230	4599	1800
250	4791	1827
270	4993	1849

Таблиця 3. Залежність основних показників від температури процесу торрефікації

Параметр	Лузга соняшнику					Солома		
	220 °C	240 °C	250 °C	270 °C	280 °C	230 °C	250 °C	270 °C
Теплота згоряння $Q_{pн}$, ккал/кг	4613	4946	5187	5291	5317	4599	4791	4993
Зростання $Q_{pн}$, %	10,1	18,0	23,8	26,2	26,9	16,3	21,2	26,3
Втрата маси, %	14,4	21,1	27,4	29,0	38,7	20,25	25,5	30,75
Втрата енергії, %	5,8	6,9	10,1	10,4	22,2	7,3	9,7	12,6

Примітка. Теплота згоряння неторрифікованих палив, ккал/кг: лузги соняшнику – 4191; соломи – 3954.

люється термопарою. У процесі налагодження роботи комплексу проводиться корегування температури продуктів згоряння, що подаються у шнек, з метою обмеження її максимального значення рівнем +200 °C. Така температура дає змогу гарантовано уникнути конденсації водяної пари в елементах конструкції шнеку та займання біомаси під час її транспортування. Шнековий транспортер подає матеріал до верхнього теплообмінника 1, який обігривається теплоносієм, що поступає з печей нагріву теплоносія, температура якого не перевищує 250 °C. Час перебування біомаси у теплообмінниках регулюється за рахунок зміни частоти обертання мішалки – механізму переміщення матеріалу всередині теплообмінника. При нагріванні біомаси з неї випаровується волога, яка у вигляді пари видаляється через шнек у навколишнє середовище. Вікно виходу пари знаходиться у нижній частині шнеку в безпосередній близькості від точки підключення димососу до короба опалення шнека. Це дає змогу більшу частину пари видалити разом з продуктами згоряння завдяки організованому відбору повітря з приміщення у місці виходу пари.

Після виходу з верхнього теплообмінника (сушарки) матеріал потрапляє у теплообмінник попереднього нагрівання. Він також, як і сушарка, обігривається теплоносієм, що надходить з печей з температурою не вище 250 °C.

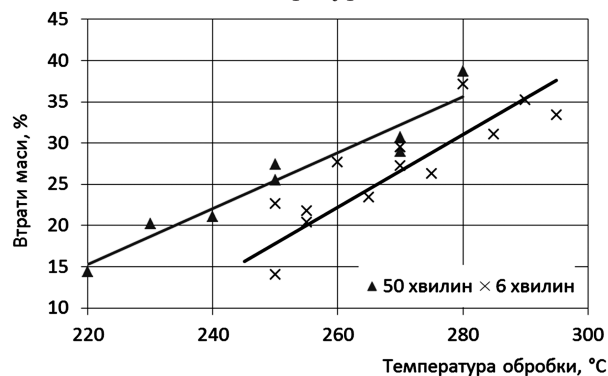


Рис. 2. Залежність відносної втрати маси сільськогосподарських відходів у процесі торрефікації від температури процесу для різного часу термообробки.

Після виходу з середнього теплообмінника матеріал потрапляє до теплообмінника торрефікації, який, так само як і верхній теплообмінник, обігривається через стінку теплоносієм, температура якого регулюється потужністю печей у межах 230–300 °C. Підвищення ефективності установки забезпечується прямим нагріванням матеріалу через контакт з газами рециркуляції. При цьому газу нагріваються у додатковому теплообміннику до температури 230–300 °C та подаються назустріч часткам матеріалу, що рухаються у бочці торрефікації. Газу, які утворюються у процесі термообробки, скидаються через передбачений для цього скідний газопровід для спалювання у печі нагріву теплоносія.

Дослідження процесу торрефікації

Характеристики кінцевого продукту, що виробляється у ході торрефікації, залежать від температурного рівня процесу та часу, протягом якого обробляється біомаса. Торрефікація передбачає повільне (< 50 °C/хв.) нагрівання та витримку матеріалу в умовах безкисневої атмосфери протягом тривалого часу (близько 30 хв.) [12]. У рамках попередніх випробувань підтверджений вплив часу термообробки на втрату маси та зміну енергетичних характеристик термообробленого продукту. Більш глибокі дослідження у цьому напрямку пока-

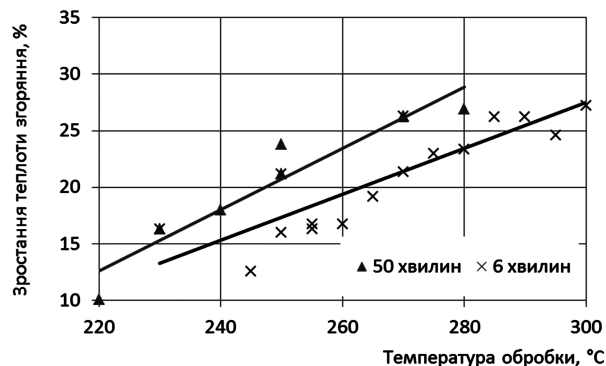


Рис. 3. Залежність відносного зростання теплоти згоряння біомаси у процесі торрефікації від температури процесу для різного часу термообробки.

Таблиця 4. Склад газоподібних продуктів торрефікації біомаси сільськогосподарського походження

Компоненти, % (об.)	Лузга соняшнику					Солома		
	240 °С	250 °С	270 °С	280 °С	290 °С	230 °С	250 °С	270 °С
H ₂	0	0	0	0	0	0	0	0,69
O ₂	0	6,04	0	0	0	2,04	1,85	0
N ₂	20,15	23,49	0	17,15	23,52	57,14	28,12	11,13
CO	17,49	24,38	31,76	28,82	26,57	7,86	16,42	23,60
CO ₂	60,32	43,94	65,99	48,55	47,65	31,78	52,20	62,93
CH ₄	0	0	0	3,02	0	0	0	0
C ₂ H ₄	0	0,04	0,03	0,05	0,05	0	0	0
C ₂ H ₆	0	0,07	0,07	0,10	0,12	0	0,03	0,04
H ₂ S	0	0,07	0,09	0	0	0	0	0
C ₃ H ₆	0	0,05	0	0,07	0,07	0	0,03	0,03
C ₃ H ₈	0	0,03	0,05	0,03	0,04	0	0	0
C ₂ H ₅ OH	0,26	0,16	0,14	0,46	0,21	0	0,08	0,08
iC ₄ H ₁₀	0,05	0,17	0,11	0,09	0,04	0	0,03	0
nC ₄ H ₁₀	0,05	0,07	0,05	0,06	0,04	0	0,03	0
H ₂ O	1,68	1,49	1,71	1,60	1,69	1,18	1,21	1,5
Вища теплота згорання, МДж/м ³	2,3	3,8	4,1	5,7	4,1	0,9	2,3	3,2
Нижча теплота згорання, МДж/м ³	2,3	3,7	4,1	5,5	4,0	0,9	2,3	3,2

зали характер впливу часу обробки та продемонстрували можливість термообробки в умовах постійної зміни температури без витримки протягом тривалого часу на фіксованому температурному рівні [13]. Використання такого підходу дає можливість зробити процес більш технологічним, підвищити продуктивність комплексу, що є надзвичайно важливим для його економічної ефективності. Проведення досліджень термічної обробки відходів сільськогосподарської діяльності дало змогу визначити вплив температури процесу на характеристики кінцевого продукту (табл.3).

Залежність відносних показників втрати маси (рис.2) та зростання теплоти згорання (рис.3) лузги соняшнику та соломи у процесі термообробки від температури виявилися дуже схожими та були поєднані однією лінійною залежністю. Це за умови стабілізації часу обробки дає можливість оцінювати характеристики процесу за температурним режимом торрефікації. Аналіз впливу збільшення часу обробки на характеристики кінцевого продукту показав, що збільшення часу в 10 разів може бути легко компенсовано незначним (на 10–15 °С) підвищенням температури процесу. Очевидно, що така заміна призводить до перерозподілу процесів в органічному матеріалі. У роботі [13] показано, що збільшення часу обробки підвищує вміст лігніну у складі біомаси за рахунок деструкції целюлози та гемоцелюлози. Гранули, вироблені

з такого матеріалу, мають підвищену міцність, що є важливою характеристикою гранульованого біопалива.

На жаль, торрефікація не вирішує головну проблему, пов'язану з використанням палива на основі соломи злакових культур. Низька температура плавлення золи, початок розм'якшення якої проходить за температурного рівня 735–840 °С, обмежує промислові технології використання. Однокомпонентне паливо на основі соломи може використовуватися в обертових печах та сушарках металургійної та будівельної промисловості [14]. Широке застосування такого палива відбувається завдяки сумісному спалюванню та формуванню комплексних багатоконпонентних палив. Результати досліджень спалювання композитного палива на основі вугілля та торрефікованої соло-

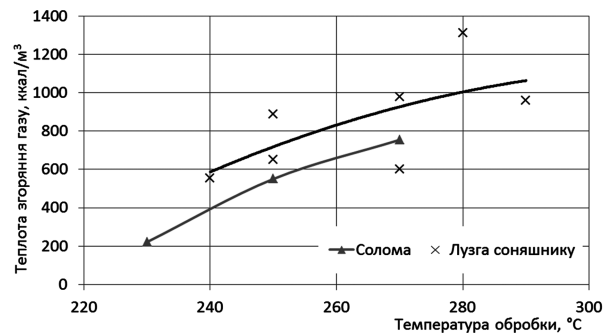


Рис.4. Залежність теплоти згорання газоподібних продуктів термообробки біомаси від температури процесу.

ми підтвердили ефективність такого підходу до використання сільськогосподарських відходів [15].

Використання композитних палив знижує вимоги до процесу торрефікації. Таким чином, термообробка соломи може провадитися з більш високими температурами та меншим часом обробки, що підвищує продуктивність установки. Виходячи з цього, більшість досліджень проведено із швидкістю нагріву матеріалу близької до 50 °С/хв. Час термообробки становив близько 6 хв.

Аналіз складу газоподібних продуктів низькотемпературного піролізу, відібраних у процесі термообробки, продемонстрував принципову можливість їх використання для енергозабезпечення процесу (табл.4, рис.4). Надійне спалювання в атмосфері повітряного дуття забезпечено для продуктів, що утворюються в умовах обробки з температурами не менш 260 °С. Експлуатація пальників, розрахованих на спалювання низькокалорійних газів — продуктів газифікації біопалива [16], — підтверджує можливість використання таких газів із забезпеченням виконання нормативів щодо викидів забруднюючих речовин. Рівень температур, на якому досягається якість газу, прийнятна для спалювання, відповідає вибраному режиму термообробки, що характеризується відносно високою швидкістю набору температури та коротким часом впливу.

Висновки

Торрефікована біомаса має суттєві переваги перед вихідною сировиною. Технологія торрефікації дає можливість розширювати використання низькокалорійних та проблемних палив, підвищуючи їх характеристики. Проведено дослідження технології термообробки біопалив сільськогосподарського походження. Підтверджено можливість обробки біомаси в умовах відносно швидкого нагрівання та досягнення при цьому суттєвого підвищення енергетичних характеристик палив. Термообробка за температур вище 260 °С супроводжується утворенням газоподібних продуктів піролізу, які можуть бути використані як паливо для енергетичного забезпечення процесу.

Список літератури

1. Гро Харлем Брутланд. Наше общее будущее. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР) / Под ред. С.А.Евтеева, Р.А.Перелета. — М.: Прогресс, 1989. — 376 с.
2. Карп І.М., П'яних К.Є. Можливі обсяги економії та заміщення природного газу в Україні //

Енерготехнології та ресурсозбереження. — 2012. — № 1. — С. 16–22.

3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Жовмір М.М. та ін. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Ч.1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса // Пром. теплотехніка. — 2010. — Т. 32, № 6. — С. 58–65.
4. Karp I., Pyanykh K. and Yudin A. Biomass Combustion and Gasification for Substitution of Natural Gas // Industrail Heating. — June 2013. — № 6. — P. 39–42.
5. Справочник потребителя биотоплива / Под ред. Виллу Вареса. — Таллинн, 2005. — 183 с.
6. Михайленко В.П., Алексеев І.Л., Денафас Г. и др. Особенности образования твердых бытовых отходов в Украине // Труды IX Международной конференции WasteECO-2012, Харьков, Украина, 28–29 марта 2012 г. — Харьков, 2012.
7. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste // Official Journal L 332, 28/12/2000 P. 0091-0111.
8. Nunes L.G.R., Matias J.C.O., Catalao J.P.S. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation // Report on FP-7 Programme. — Apr. 2014. — University of Beira Interior, Portugal. — P. 23.
9. Goldfarb J.L., Chao Liu. Impact of blend ratio on the co-firing of a commercial torrefied biomass and coal via analysis of oxidation kinetics // Bioresource Technology. — 2013. — Vol. 3149. — P. 208–215.
10. Agar D. Bio-coal and Torrefaction technology // YMP392 Energy Systems : Carbon, Energy & Emission Balances. — Presentation of University of Jyvaskyla, Dep. of Chemistry. — 21 Sept. 2012. — P. 33.
11. Koppejan J., Sokhansanj S., Melin S., Madrali S. Status over view of torrefaction technologies // IEA Bioenergy Task 32 Report. — Dec. 2012. — P. 59.
12. Hakanson K., Nordin A., Nordvaeger M., Oloffson I., Svanberg M. Process and system integration aspects of biomass torrefaction // 18th European Biomass Conference & Exhibition, Lyon, France, 3–7 May 2014. — P. 3.
13. Supramono D., Devina Y.M., Tristantini D. Effect of heating rate of torrefaction of sugarcane bagasse on its physical characteristics // Intern. J. Technol. — 2015. — № 7. — P. 1084–1093.
14. Бессмертных А.В., Зайченко В.М. Технологии нового поколения для распределенной энергетики России // Пром. энергетика. — 2013. — № 9. — С. 50–53.
15. Isemin R., Mikhalev A., Konyakhin V. et al. Comparative Studies of the Combustion of Raw and Heat-treated Straw and Combined Coal and Straw Pellets // BIONATURE 2015 : The 6th Intern. Conf. on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies, Rome, Italia, May 24–29, 2015. — P. 7–12.
16. П'яних К.Є. Газификация как метод переработки отходов // Энерготехнологии и ресурсозбережение. — 2015. — № 2. — С. 18–24.

Надійшла до редакції 12.11.15

Пьяных К.Е., канд. техн. наук, **Романчук Б.М.**
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: pyanykh@mail.ru

Повышение энергетических характеристик топлив сельскохозяйственного происхождения за счет термической обработки

Оценен потенциал снижения объемов потребления природного газа за счет экономии и замещения другими энергоресурсами. Представлены данные о наличии ресурса для замещения природного газа. В качестве ресурса представлено биотопливо сельскохозяйственного происхождения и твердые бытовые отходы. Показаны пути использования проблемных топливно-энергетических ресурсов. Рассмотрена технология улучшения их качества за счет термической обработки. Представлены характеристики исходного и торрефицированной биомассы. Предоставлены материалы по комплектации и эксплуатации исследовательского стенда термообработки биомассы. Описаны пути использования торрефицированной соломы, в том числе в составе комбинированных топлив. Проведен химический анализ газов, полученных при термообработке, и подтверждена возможность их использования для энергообеспечения процесса торрефикации. Показано, что относительно высокая скорость набора температуры в процессе термообработки и уровень температур выше 260 °С позволяет получать высококалорийное твердое топливо и горючие газы для обеспечения процесса термообработки. *Библ. 16, рис.4, табл.4.*
Ключевые слова: биомасса, отходы сельхозпроизводства, твердые бытовые отходы, теплота сгорания, торрефикация, термообработка.

Pyanykh K.E., Candidate of Technical Sciences, **Romanchuk B.N.**
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: pyanykh@mail.ru

Improving the Energy Performance of Fuels of Agricultural Origin Due to the Heat Treatment

Potential of reducing consumption of natural gas by saving and substitution with other energy resources is evaluated. Data on resource availability for the replacement of natural gas is presented. As a resource for reduction of natural gas usage, agricultural biofuels and municipal solid waste is presented. The ways of using of low quality energy resources is shown. The technology to improve their quality due to heat treatment is proposed. The characteristics of raw source and heat-treated biomaterials is presented. Materials for assembly and operation of experimental stand for biomass heat treatment is provided. Ways of using of torrefacted straw, including as a part of combined fuels is described. Carried out the chemical analysis of gases produced during the heat treatment, and confirmed the possibility of using them for energy torrefaction process. It is shown that the relatively high speed of temperature increasing during the heat treatment and temperature level of above 260 °C allows to obtain high-energy solid fuel and combustion gases for the heat treatment process. *Bibl. 16, Fig. 4, Table 4.*

Key words: biomass, agricultural waste, municipal solid waste, heat of combustion, torrefaction, heat treatment.

References

1. Gro Harlem Brundtland. Our collective future. Report of the World Commission on Environment and Development (WCED) / Ed. S.A.Evteev, R.A.Perelet, Moscow : Progress, 1989, 376 p. (Rus.)
2. Karp I.N., Pyanykh K.E. [Potential volumes of savings and substitution of natural gas in Ukraine], *Jenergotehnologii i Resursosberezhenie [Energy Technology and Resource Saving]*, 2012, (1), pp. 16–22. (Ukr.)
3. Geletuha G.G., Zhelyezna T.A., Zhovmir M.M., Matveev Y.B., Drozdova O.I. [Evaluation of the energy potential of biomass in Ukraine. Part 1. Waste wood and agricultural biomass], *Promyshlennaya Teplotekhnika [Industrial Heating]*, 2010, 32 (6), pp. 58–65. (Ukr.)
4. Karp I., Pyanykh K. and Yudin A. Biomass Combustion and Gasification for Substitution of Natural Gas, *Industrail Heating*, June 2013, (6), pp. 39–42.
5. Biofuel consumer handbook / Ed. Villu Vares, Tallinn, 2005, 183 p. (Rus.)
16. Mikhaylenko V.P., Alekseevez I.L., Denafas G., et al. [Features of the formation of solid waste in Ukraine], *Proceedings of the 9th International Conference WasteECO-2012*, Kharkov, Ukraine, 28–29 March 2012, Kharkov, 2012. (Rus.)
7. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, *Official Journal L 332*, 28/12/2000 P. 0091-0111.
8. Nunes L.G.R., Matias J.C.O., Catalao J.P.S. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation, *Report on FP-7 Programme*, Apr. 2014, University of Beira Interior, Portugal, 23 p.
9. Goldfarb J.L., Chao Liu. Impact of blend ratio on the co-firing of a commercial torrefied biomass and coal via analysis of oxidation kinetics, *Bioresource Technology*, 2013, 3149, pp. 208–215.
10. Agar D. Bio-coal and Torrefaction technology, *YMP392 Energy Systems : Carbon, Energy&Emission Balances, Presentation of University of Jyvaskyla, Dep. of Chemistry*, 21 Sept. 2012, p. 33.
11. Koppejan J., Sokhansanj S., Melin S., Madrali S. Status over view of torrefaction technologies, *IEA Bioenergy Task 32 Report*, Dec. 2012, p. 59.
12. Hakanson K., Nordin A., Nordvaeger M., Oloffson I., Svanberg M. Process and system integration aspects of biomass torrefaction, *18th European Biomass Conference&Exhibition*, Lyon, France, 3–7 May 2014, p. 3.
13. Supramono D., Devina Y.M., Tristantini D. Effect of heating rate of torrefaction of sugarcane bagasse on its physical characteristics, *Intern. J. Technol.*, 2015, (7), p. 1084–1093.
14. Bezsmertnih A.V., Zaychenko V.M. [New generation technologies for distributed power of Russia], *Promyshlennaya Jenergetika [Industrial Energy]*, 2013, (9), pp. 50–53. (Rus.)
15. Isemin R., Mikhaleva A., Konyakhin V. Comparative Studies of the Combustion of Raw and Heat-treated Straw and Combined Coal and Straw Pellets, *BIONATURE 2015: The Sixth International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies*, Rome, Italia, May 24–29, 2015, pp. 7–12.
16. Pyanykh K.E. [Gasification as waste recycling method], *Jenergotehnologii i Resursosberezhenie [Energy Technology and Resource Saving]*, 2015, (2), pp. 18–24. (Rus.)

Received November 12, 2015