

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>
УДК 620.9; 662.939.9

С.Г. Кобзар^{1,2}, канд. техн. наук, **О.І. Топал**¹, канд. техн. наук,
Л.С. Гапонич¹, канд. техн. наук, **І.Л. Голенко**¹, канд. техн. наук

¹ Інститут вугільних енерготехнологій НАН України
Україна, 04070, Київ-70, вул. Андріївська, 19,
тел. (+38044) 4253350; e-mail: dr.topal@gmail.com

² Інститут технічної теплофізики НАН України
Україна, 03057, Київ-57, вул. Марії Капніст, 2а,
тел. (+38044) 4532853; e-mail: skobzar@ukr.net

Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів

З метою визначення вихідних даних для моделювання процесів спільного спалювання палива проаналізовано типовий морфологічний склад твердих побутових відходів (ТПВ), очікуваний елементний склад вторинного палива ((RDF) Refuse Derived Fuel) та твердого відновлювального палива ((SRF) Solid Recovered Fuel) з ТПВ, їх енергетичні характеристики, підходи та стандарти їх класифікації. В Україні щорічно накопичується значний обсяг ТПВ (близько 11—12 млн т /рік), з якого можна вилучити близько 2—3 млн т RDF (SRF) з теплою згоряння 10—25 МДж/кг. Визначено, що спалювання RDF може заощадити близько 0,6 млрд м³ природного газу на рік. Водночас, при спільному спалюванні RDF із природним газом у газомазутних котлах малої (середньої) потужності необхідно застосовувати математичне моделювання для визначення граничної частки RDF у суміші. Методами розрахункової гідродинаміки вивчено вплив додавання RDF на процес спільного спалювання для визначеної геометрії елемента камери згоряння. Отримано розрахункові залежності температур та розподілу залишку вуглецю у твердій фазі уздовж камери вигорання, концентрації оксидів азоту тощо. Показано, що додавання 20 % RDF під час спільного з природним газом спалювання суттєво не змінює техніко-екологічні показники роботи камери згоряння.

К л ю ч о в і с л о в а: паливо з твердих побутових відходів, відходи в енергію, комп'ютерне моделювання, спалювання, оксиди азоту

Розробка та впровадження екологічно безпечних і економічно привабливих технологій термічної утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є одним з найважливіших завдань сьогодення. За даними Міністерства розвитку громад та територій України обсяги збирання ТПВ в останні роки сягають 11—12 млн. т (50—60 млн м³). При цьому тільки 78 % населення

© Кобзар С.Г., Топал О.І., Гапонич Л.С., Голенко І.Л., 2020

України охоплено послугами зі збирання та вивезення ТПВ. У 2019 р. в Україні зібрано 10,4 млн т ТПВ, з них перероблено і утилізовано всього 6,1 %, а саме 1,9 % спалено на єдиному працюючому в Україні сміттєспалювальному заводі «Енергія» (м. Київ), сміттєспалювальній установці (Харківська область) та двох мобільних сміттєспалювальних установках (м. Харків); 4,2 % потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні установки. Майже 94 % ТПВ в Україні складається на полігонах та сміттєзвалищах.

Таке поводження з ТПВ призводить до щорічної втрати значної кількості цінних матеріалів та енергоресурсів, які містяться у відходах. Роздільне збирання, сортування та перероблення відходів не вирішують завдання повної та екологічно безпечної їх утилізації. Термічна переробка відокремленої частини ТПВ, яка містить органічну складову, за технологіями «Відходи в Енергію» («Waste-to-Energy» (WtoE)) для виробництва електричної та теплової енергії — це вагома складова підвищення ефективності використання природних ресурсів, в тому числі зменшення споживання викопного палива на ТЕС та ТЕЦ [1]. Національною стратегією управління відходами в Україні до 2030 р. планується досягти 10%-го рівня термічної переробки ТПВ.

Вибір технології термічної переробки ТПВ залежить від виду відходів, що переробляються. Основними характеристиками відходів є наступні параметри: морфологічний та хімічний склад; фізичний склад (густина, фракційний склад); теплові характеристики (теплота згорання, вологість). Кількісні та якісні характеристики ТПВ не є постійними та залежать від країни, регіону, міста чи селища їх утворення. Однак перелік основних компонентів ТПВ є в цілому незмінним і включає наступне [2, 3]: матеріали біологічного походження; потенційну вторинну сировину; інертні матеріали; композиційні матеріали; небезпечні матеріали. ТПВ — це механічна суміш різноманітних за складом та властивостями компонентів. Усереднений морфологічний склад ТПВ по Україні подано у роботі [4].

В табл. 1 наведено усереднений елементний склад, вихід летких та теплоту згорання змішаних ТПВ для різних міст та України в цілому. Для порівняння наведено також інформацію для ТПВ США, Канади, Нідерландів та Німеччини [2]. Елементний склад та вихід летких ТПВ розраховано за їх морфологічним складом для різних міст України та елементним складом компонентів ТПВ [2, 4—8]. Найнижча теплота згорання на робочий склад палива Q_i^r , МДж/кг, розрахована за формулою Менделєєва:

$$Q_i^r = 4,18 (81C^r + 300H^r - 26 (O^r - S^r) - 6 (9H^r + W^r)) 10^{-3}.$$

Теплота згоряння несортованих ТПВ для міст України становить 5,5—7,0 МДж/кг, а утворених в країнах ЄС, Канаді, США — 7,5—11,0 МДж/кг. Крім елементів, наведених в табл. 1, ТПВ містять важкі метали та шкідливі речовини [2]. Термічна утилізація відходів, яка відбувається без урахування хімічного складу ТПВ, призводить до утворення вкрай небезпечних для людини сполук. Серед них — ртуть, діоксини та фурани, гранично допустимі концентрації яких становлять нанограми [2, 9—11].

У 2018 р. в країнах ЄС термічній переробці, в тому числі з отриманням енергії за технологією WtoE було піддано 28 % загального обсягу ТПВ, і цей показник щороку збільшується. Технологія WtoE включає різні технології обробки відходів для отримання електричної та теплової енергії або альтернативного палива на їх основі: інсінерацію (спалювання) змішаного потоку ТПВ, виробництво і спалювання палива з ТПВ, в тому числі його сумісного спалювання з викопним органічним паливом [5, 12—16].

В останні роки термічна переробка ТПВ на інших промислових об'єктах, крім сміттєспалювальних заводів, набуває все більшого значення. Спільне спалювання висококалорійних відходів та палив на їх основі використовується у виробництві (наприклад, цементні заводи, цегельне виробництво, доменна піч, паперові фабрики), на ТЕС та ТЕЦ, в промислових котлах для заміни частини проектного палива (вугілля, мазуту, природного газу) [17, 18]. В країнах ЄС у 2018 р. працювало 492 за-

Таблиця 1

Країна, місто	Елементний склад на робочу масу r , %							Вихід летких, %	Q_f , МДж/кг
	C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^r	W ^r		
Україна	20,3	2,8	17,5	0,6	0,1	20,2	38,5	57,0	6,9
Вінниця	18,6	2,6	15,8	0,4	0,1	21,8	40,2	57,8	6,3
Київ	17,1	2,4	14,4	0,5	0,1	24,4	40,9	58,8	5,7
Львів	19,6	2,7	15,3	0,6	0,2	17,3	43,8	58,2	6,7
Миколаїв	19,6	2,7	15,3	0,6	0,2	17,3	43,8	56,7	6,7
Мелітополь	20,2	2,9	18,1	0,4	0,1	21,0	40,0	56,8	7,0
Полтава	16,5	2,3	13,6	0,6	0,1	25,4	41,3	51,5	5,5
Харків	18,3	2,6	16,5	0,5	0,1	22,7	38,8	58,9	6,1
Хмельник	18,8	2,7	18,4	0,3	0,1	24,8	34,4	58,6	6,3
Черкаси	20,3	2,8	15,5	0,6	0,2	18,7	41,3	63,5	7,0
США	24,8	3,1	19,0	0,4	0,1	27,6	25,2	55,5	8,9
Канада	25,6	3,2	18,1	0,4	0,1	25,4	27,0	57,8	9,3
Німеччина	30,0	2,1	13,4	0,6	0,2	27,5	26,2	н/д	11,0
Нідерланди	22,2	1,5	8,3	0,2	0,3	43,3	24,2	31,2	7,6

води термічної переробки відходів [5]. В цих країнах за даними Конфедерації європейських заводів «Відходи в Енергію» (CEWER, Confederation of European Waste-to-Energy Plants) у 2018 р. 96 млн т ТПВ було перероблено за технологією WtoE. Загальна поточна потужність заводів WtoE становить 101 млн т, потужність для спільного спалювання – близько 11 млн т. В останні роки збільшилася кількість досліджень, присвячених розробці технологій спільного спалювання ТПВ з іншими паливами, в тому числі з іншими відходами, наприклад, мулами стічних вод, комунальними відходами [19, 20].

Слід зазначити, що найефективнішими установками відновлення енергії є установки WtoE, які виробляють теплову енергію, або електро- та теплову енергію. В [21] проаналізовано роботу 314 заводів WtoE в країнах ЄС. Показано, що середні витрати ТПВ (або палива на їх основі) на виробництво 1 кВт · год. енергії на заводах WtoE, які виробляють теплоту, становлять 0,435 г/кВт · год. (теплових), при сумісному виробництві теплової та електроенергії — 0,647 г/кВт · год. (електричних та теплових), при виробництві електроенергії — 1,424 г/кВт · год. (електричних).

Граничні викиди забруднюючих речовин у димових газах заводів WtoE в країнах ЄС мають відповідати жорстким вимогам Директиви № 2010/75/ЄС про промислові викиди, які наведено у табл. 2 [22]. Зазначимо, що вимоги до викидів при інсінерації більш жорсткі порівняно з вимогами до ТЕС на вугіллі. Вимоги Директиви № 2010/75/ЄС є визначальними для вибору технологій спалювання ТПВ та обробки димових газів при проектуванні нових сміттєспалювальних заводів. Це сприяє поступовому витісненню спалювання несортowanego ТПВ і заміні його спалюванням палива з ТПВ визначеної якості.

Технологія WtoE включає не тільки пряме спалювання ТПВ, а й отримання відновлюваного палива з побутових та (або) промислових відходів RDF та SRF [3, 12—16, 18]. Перевагами підходу SRF до переробки ТПВ є те, що відходи перетворюються на товарну продукцію, яку можна накопичувати, складувати, транспортувати. Термін RDF в англійських країнах є загальним терміном для визначення твердих побутових та комерційних або промислових відходів і зазвичай характеризує відокремлену висококалорійну фракцію перероблених ТПВ. Фактично у складі RDF переважає органічне паливо, яке отримали після видалення вторинної сировини та негорючих матеріалів із ТПВ. Залежно від морфологічного складу ТПВ і технології виробництва може бути отримано паливо різної теплоти згоряння та виду (у вигляді порошку або гранул певного розміру і густини).

SRF — це тверде відновлюване паливо, отримане з безпечних відходів, в тому числі твердих побутових, промислових і комерційних відходів, включаючи полімери, пластмасу, папір, картон, деревину та текстиль, які можна використовувати для виробництва енергії в установках спалюван-

ня або спільного спалювання з вугіллям. SRF виробляється відповідно до класифікації та технічних характеристик, викладених у Європейському стандарті EN 15359 : 2011 Solid Recovered Fuels — Specifications and Classes (табл. 3). У схемі класифікації SRF використано три основні параметри: теплота згоряння (економічна інформація), концентрація Cl (технічна інформація) і Hg (екологічна інформація). Стандарт EN 15359 : 2011 вже прийнято в Україні — «ДСТУ EN 15359 : 2018 Тверде відновлювальне паливо. Технічні характеристики та класи (EN 15359 : 2011, IDT)».

Отримання та споживання RDF та SRF при виробництві енергії є не тільки одним з найбільш надійних та ефективних способів економії органічного палива, а й засобом зменшення викидів шкідливих речовин та парникових газів [23—28]. Виробництво RDF та SRF палив в світі щорічно збільшується. У 2017 р. вже близько 17,5 млн т RDF та SRF утилізовано на заводах WtoE при спільному спалюванні з вугіллям при виробництві цементу та на комунальних і промислових ТЕЦ [29]. Тільки у Німеччині енергетичне споживання RDF, SRF досягло 6,3 млн т [30]. Значимо, що щорічний потенційний попит на RDF, SRF в Європі складає 53—63 млн т.

Таблиця 2

Забруднююча речовина	Установка		
	Спалювання відходів	Спільного спалювання відходів	Спалювання вугілля
Сумарний пил, мг/м ³	10	30	10—30
Газоподібні та пароподібні органічні речовини, як загальний органічний вуглець, мг/м ³	10	10	—
Хлористий водень HCl, мг/м ³	10	10	—
Фтористий водень HF, мг/м ³	1	1	—
Діоксид сірки SO ₂ , мг/м ³	50	50	150—400
Оксиди азоту NO _x , мг/м ³	200	500	150—400
Оксид вуглецю CO, мг/м ³	50	—	—
Кадмій та талій (Cd + Tl), мг/м ³	0,05	0,05	—
Ртуть та її сполуки в перерахунку на ртуть (Hg), мг/м ³	0,05	0,05	—
Інші важкі метали (Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V), мг/м ³	0,5	0,5	—
Поліхлоровані дібензодіоксини та поліхлоровані дібензофурани, нгДЕ/м ³	0,1	0,13	—

Кількість RDF, SRF, що виробляється з ТПВ, може змінюватись від 25 до 55 % (по масі) залежно від країни, типу збирання, методів обробки та вимог до якості. На заводах WtoE в країнах ЄС переробляється ТПВ та палива на їх основі з теплою згоряння 6,4—17,0 МДж/кг (середнє значення теплоти згоряння ТПВ — 10,3 МДж/кг) [2, 21]. Нижнє граничне значення теплоти згоряння ТПВ для комерційного спалювання — 6 МДж/кг. Як видно з табл. 2, ТПВ у переважній кількості міст України не відповідають цій вимозі. При відборі вторинної сировини та відсортуванні мінеральних негорючих та органічних компонентів, здатних до біологічного розкладання, вологість відходів зменшується до 25 %. Такі фракції відходів придатні і для термічної переробки за технологіями WtoE, і для виготовлення з них RDF, SRF.

За результатами проведених розрахунків в Україні є потенціал для виробництва 2—3 млн т RDF та SRF палив з теплою згоряння 10—25 МДж/кг щорічно [4]. Залучивши ці палива в енергетику, можна отримати щорічно близько 1500 ГВт·год. електричної та 3000 ГВт·год теплової енергії відповідно. Потенціал заміщення природного газу при цьому понад 0,6 млрд м³.

Задача полягала у дослідженні процесу спільного з природним газом спалювання палива з ТПВ та оцінці впливу заміщення частини природного газу RDF, SRF на експлуатаційні та екологічні характеристики процесу спалювання.

Процес сумісного спалювання. Для дослідження вибрано інтегрований в циліндричну камеру згоряння газомазутний пальник ГМП-16, якими обладнані водогрійні газомазутні котли марки КВГМ, призначені для опалення і гарячого водопостачання виробничих, громадських і житлових будівель. Котли працюють на газі або рідкому (дизельному) паливі. Залежно від виду палива котли комплектуються газовими, рідкопаливними або комбінованими пальниками. В Україні такі котли встановлено в котельнях і на великих ТЕЦ.

Стандартний пальник ГМП-16 оснащено отвором для мазутної форсунки, який має діаметр 48 мм і розташований на осі пальника. Організація подачі RDF, SRF в пальник потребує окремого розгляду та технічних рішень. Паливо, що подається, має бути належним чином подрібненим та

Таблиця 3

Параметр	Класифікація палива за класом				
	1	2	3	4	5
Теплота згоряння, МДж/кг	≥25,0	≥20,0	≥15,0	≥10,0	≥3,0
Cl, % (на суху масу)	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Hg, мг/МДж	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50

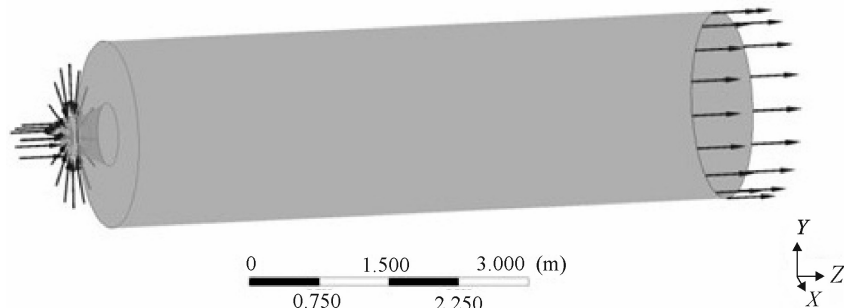


Рис. 1. Комп'ютерна модель камери згоряння, діаметр якої 1,5 м, довжина 6 м

дрібнодисперсним. У такому разі (за потреби) можна організувати його підігрів, що покращить процес спалювання.

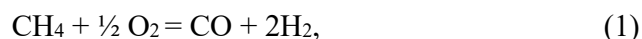
Побудовану модельну камеру згоряння з інтегрованою моделлю пальника ГМП-16 показано на рис. 1. Всі розрахунки проведено для теплової потужності пальника 18,6 МВт. Надлишок повітря для всіх випадків становив $\alpha = 1,05$; температура природного газу та повітря — 20 °С; температура стінок камери згоряння — 300 °С. При теплоті згоряння метану 50,1 МДж/кг витрата газу становить 0,371 кг/с, витрата повітря при надлишку 1,05—6,72 кг/с.

У модельній камері згоряння повітря подавалося з закрученням за допомогою змодельованого аксіально-лопаткового завихрювача з лопатками, встановленими під кутом 45°. Паливо RDF, SRF подавалося разом з димовими газами з вмістом кисню 2 % (за масою) зі швидкістю 20 м/с при температурі 100 °С. Було прийнято, що тверде паливо має наступний розподіл діаметрів частинок по фракціям: 50, 100, 150, 200 мкм, а кожна фракція частинок містить 25 % маси.

Математична модель. Осереднені за числом Рейнольдса рівняння Нав'є — Стокса вирішувалися для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії. Для замкнення рівняння руху використано модель турбулентності RNG $k-\epsilon$. Густину суміші газів розраховано за допомогою закону ідеального газу для суміші газів. Вплив гравітації враховано через завдання сили земного тяжіння в напрямку, протилежному напрямку вісі Y . Радіаційний теплообмін модельовано за допомогою моделі дискретного переносу (Discrete Transfer).

Для моделювання горіння природного газу зроблено наступні припущення:

1. Природний газ — тільки метан.
2. Горіння метану відбувається за двостадійним механізмом, який включає наступні реакції:



Для розрахунку процесу горіння застосовано гібридну схему. Середню швидкість хімічної реакції компоненти визначено як мінімальне значення швидкості реакції за моделлю дисипації вихорів (R_{EDC}) [31] та законом Ареніуса (R_{Ar}) [32]:

$$R = \min(R_{EDC}, R_{Ar}), \quad (3)$$

де R_{Ar} — швидкість реакції за законом Ареніуса,

$$R_{Ar} = AT^b \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [\text{Fuel}]^c [\text{Oxid}]^d [\text{Product}]^e. \quad (4)$$

У табл. 4 [32, 33] наведено значення коефіцієнтів із формули (4).

Швидкість реакції за моделлю дисипації вихорів Магнусена [31] визначено за формулою

$$R_{EDC} = A_{EDC} \frac{\varepsilon}{k} \rho \min\left\{\bar{Y}_f, \frac{\bar{Y}_{ок}}{s}, B_{EDC} \frac{1}{1+s} \bar{Y}_{prod}\right\}, \quad (5)$$

де \bar{Y}_f , $\bar{Y}_{ок}$, \bar{Y}_{prod} — масова концентрація палива, окислювача та продуктів реакції; s — стехіометричне відношення реакції паливо (окислювач); A_{EDC} , B_{EDC} — константи моделі. В моделі дисипації вихорів використано стандартні значення констант $A_{EDC} = 4$, $B_{EDC} = 0,5$.

У дослідженні використовували склад ТПВ, характерний для великих міст [34]. Отримане паливо по теплоті згорання відповідає 1 і 2 класам SRF згідно з EN 15359:2011 (див. табл. 3). Слід підкреслити, що вихідний RDF містить велику кількість частинок неправильної форми з довжиною понад 100 мм. Разом із значними хімічними та фізичними неоднорідностями це заважає легкому заміщенню викопного палива [34, 35].

Модель горіння RDF. Для моделювання горіння частинок твердого палива використано вбудовану в пакет Fluent стандартну модель [36]. За цією моделлю транспорт частинок моделювали через розв'язок рівняння руху частинки в постановці Лагранжа. Зміна розміру діаметру частинки твердого палива була пропорційна зміні її зовнішньої поверхні чи масі (коли частинка вважається непроникною для газів реагентів). При потраплянні частинки твердого палива в модельну камеру згорання з нею відбуваються наступні процеси: сушка, термічна деструкція, горіння вуглецю.

Таблиця 4

Реакція	A	b	c	d	e	E_a , ккал/моль
(1)	$1,5 \cdot 10^7, 1/c$	0	-0,3	1,3	0	30
(2)	$10^{14,6}, \text{моль}^{-0,75} \text{см}^{2,25} \text{с}^{-1}$	0	1	0,25	$[\text{H}_2\text{O}]^{0,5}$	40
(7)	$8,3 \cdot 10^6 \times M_{\text{CH}_4}/M_{\text{Fuel GAS}}$	0	-0,3	1,3		30

Термічна деструкція. Було прийнято, що процес термічної деструкції твердого палива починається після досягнення температури виходу летких $T_{\text{devol}} = 550$ К. Передбачалося, що RDF під час термічної деструкції розкладається на коксовий залишок (CHAR) та леткі (Fuel GAS):



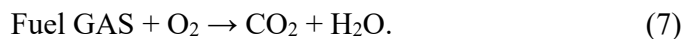
Зміна маси частинки залежить від матеріалу твердого палива, залишку летких у матеріалі та задовольняє закону Ареніуса з властивими конкретному матеріалу значеннями енергії активації E_{vol} та передекспонентним фактором $k_{\text{vol}0}$:

$$k_{\text{vol}} = k_{\text{vol}0} \exp\left(-\frac{E_{\text{vol}}}{RT_p}\right). \quad (6)$$

Кінетичні параметри у виразі (6) взято відповідно до рекомендацій у роботі [34].

Горіння коксового залишку. Для моделювання гетерогенного горіння коксового залишку використано стандартну дифузійно-кінетичну модель горіння вуглецю, за якою горіння відбувається на зовнішній поверхні за сумарною (брутто) реакцією $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$.

Горіння летких. Після виходу летких їх горіння відбувається у гомогенному середовищі. Прийнято, що леткі мають властивості метану. Горіння відбувається за одностадійним механізмом



Середня швидкість хімічної реакції летких визначалася як мінімальне значення швидкості реакції за моделлю дисипації вихорів та законом Ареніуса згідно (3)–(5). В моделі дисипації вихорів використано стандартні значення констант $A_{\text{EDC}} = 4$ і $B_{\text{EDC}} = 0,5$, а для залежності (4) використано кінетичні параметри для одностадійного механізму горіння метану [32, 33].

Модель утворення оксидів азоту. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використано термічний та паливний механізми утворення оксидів азоту [36].

Результати комп'ютерного моделювання спільного процесу спалювання. На рис. 2, 3 наведено результати комп'ютерного моделювання спільного процесу спалювання у модельній камері (див. рис.1) природного газу та дрібнодисперсних частинок RDF у кількості, що становить 10% вхідної потужності суміші (по теплу). На рис. 2 показано концентрацію вуглецю в частинках твердого палива та зміна часу руху частинок по траєкторії вздовж камери згоряння. Як бачимо, виділення летких проходить на короткій відстані. Під дією відцентрових сил частинки палива, які на цей момент переважно складаються з вуглецю та золи, переми-

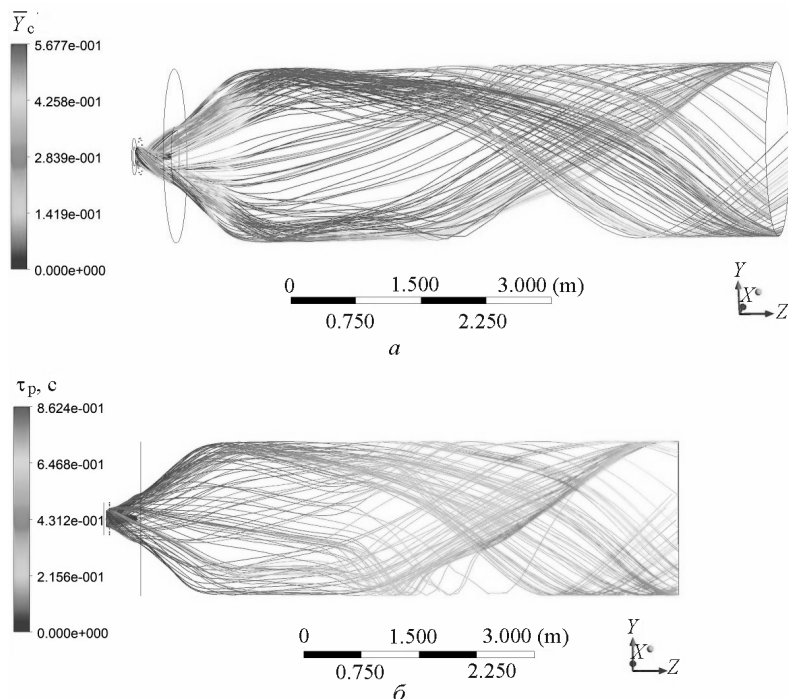


Рис. 2. Концентрація коксового залишку \bar{Y}_c в частинках твердої фази (а) і тривалість перебування частинок твердого палива τ_p в камері згорання (б)

щуються на периферію камери згорання та рухаються в граничному шарі з низькою концентрацією кисню та низькою температурою, що потребує більшого часу перебування для повного згорання вуглецю. Це пов'язано, в першу чергу, з сильним завихренням, що характерно для стандартного пальника ГМП-16, розрахованого на спалювання газоподібного та рідкого палив.

На рис. 3, а, показано поле осьової швидкості, спричинене аксіально-лопатковим завихрювачем. Зона зворотних токів, що утворюється на вісі камери, дозволяє добре спалювати газоподібне паливо, що підтверджується розподілом концентрації оксиду вуглецю (рис. 3, б). При спалюванні RDF з відповідними характеристиками внаслідок великої концентрації летких в твердому паливі та швидкого їх виділення значно зменшується діаметр частинок. Це спричиняє збільшення відносної густини частинок та зменшення їх лобового опору. Сукупність зазначених факторів зумовлює відтиснення частинок на периферію камери згорання. Для того щоб утримати частинки в центральній зоні камери згорання, необхідно провести додаткові дослідження, що заплановані.

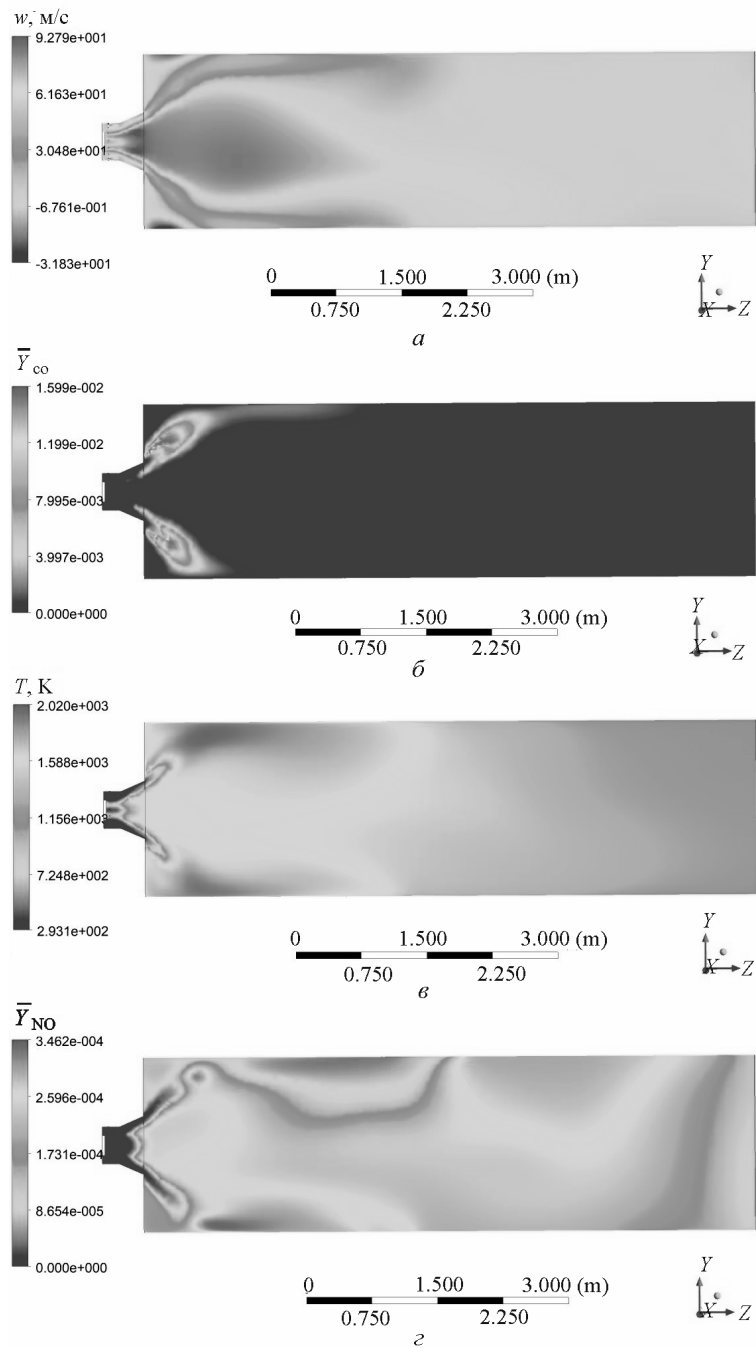


Рис. 3. Розподіл осьової швидкості w (а), концентрації оксиду вуглецю \bar{Y}_{CO} (б), температури T (в) та концентрації оксиду азоту \bar{Y}_{NO} (г)

Таблиця 5

Q, %	QRDF, %	Емісія			Втрати палива, %	T _{max} , К
		CO, мкг/с	C, г/с	NO _x , мкг/с		
100	0	2,459	~0	109	~0	2011
90	10	2,29	4,43	844	0,781	2020
80	20	2,294	7,11	843	1,25	1993
70	30	2,30	8,83	1 198	1,56	1907

На рис. 3, в, показано температурне поле на вісі камери згоряння. Характер температурного поля обумовлений, описаними особливостями гідродинаміки. Розподіл концентрації оксиду азоту в центральному перерізі камери згоряння показано на рис. 3, г. Зони підвищеної генерації оксиду азоту, що розташовані на бокових поверхнях камери згоряння, можна пояснити паливним механізмом утворення оксидів азоту.

Як видно на рис. 3, леткі виділяються в межах пальникового пристрою та амбразури. Далі тверді частинки під дією відцентрових сил переносяться на периферію потоку, де відбувається утворення оксидів азоту за паливним механізмом. Перша зона підвищеної концентрації оксиду азоту, що знаходиться внизу розрахункової зони, обумовлена сумарною дією відцентрових та гравітаційних сил, внаслідок чого частинки з більшою масою попадають у цю зону.

В табл. 5 наведено інтегральні техніко-екологічні характеристики процесу сумісного спалювання RDF з метаном в залежності від їх теплової частки Q. Результати отримано для вихідного перетину камери згоряння. Виконані розрахунки показують, що збільшення частки RDF в складі паливної суміші зумовлює зростання емісії NO_x та зниження коефіцієнта корисної дії, обумовленого зростанням втрат палива. Втрати палива були розраховані як сума втрат теплової енергії разом з вуглецем, що не згорів, та оксидом вуглецю, які залишили розрахункову область разом з продуктами згоряння. Для збільшення часу перебування частинок твердого палива у камері згоряння необхідно провести зміни у стандартному пальнику ГПМ-16.

Висновки

В Україні поступово набуває актуальності та потребує відповідного науково обґрунтованого вирішення проблема поводження із ТПВ, щорічна кількість яких досягає приблизно 12 млн т.

Енергетичний потенціал ТПВ можна використати через вилучення з них вторинного палива у вигляді RDF і SRF, щорічний обсяг якого в

Україні сягає близько 3 млн т з теплою згоряння 10–25 МДж/кг. Використання спалювання вторинного палива спільно із природним газом з додержанням жорстких екологічних вимог дає змогу збільшити виробництво теплової та електричної енергії. Очікуваний обсяг заміщення природного газу, зокрема імпорту, для житлово-комунального комплексу може становити близько 0,6 млрд м³ на рік. У разі використання в промисловій енергетиці можна щорічно отримати близько 1500 ГВт · год. електричної та 3000 ГВт·год теплової енергії. Спільне спалювання природного газу із належним чином підготовленим паливом RDF, SRF можна розглядати як один із засобів низьковитратної модернізації та вирішення проблем поводження із ТПВ на місцях в широко розповсюджених в Україні котлах малої та середньої потужності.

Математичне моделювання дозволило визначити вплив додавання RDF на процес спільного спалювання із природним газом для заданої геометрії елемента камери згоряння. Отримані розрахункові залежності температур, швидкостей, розподілу концентрацій газових компонентів, залишку вуглецю у твердій фазі, концентрації оксидів азоту та монооксиду вуглецю у камері згоряння дозволяють оцінити можливість додавання частки RDF у кількості до 20 % під час спільного спалювання з природним газом, що суттєво не змінює техніко-екологічні показники роботи камери згоряння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives // Official Journal of the European Union. 22.11.2008. L 312, p. 3–30. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
2. *Neuwahl F., Cusano G., Benavides J.G. et al.* Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019, 764 p.; EUR 29971 EN; DOI:10.2760/761437.
3. *Напонич Л.С., Голенко І.Л., Топал А.І.* Legislation, current situation and prospects of using municipal solid waste as energy resource in Ukraine // The problems of general energy, 2019, 3(58), pp. 45–54. URL: DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2019.03>.
4. *Буляндра О., Гапонич Л., Голенко І., Топал О.* Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів // Наукові праці НУХТ, 2020, **26**, №3, с. 137–147. DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-3-16.
5. *Saveyn H., Eder P., Ramsay M. et al.* Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy // The European Commission's science and Knowledge service, 2016. URL: DOI: 10.2791/870953.
6. *Соломин А., Афанасьева И.* Состав и свойства твердых коммунальных отходов, учитываемые при выборе технических методов обращения с отходами // Природообустройство, 2017, № 3, с. 82–90.
7. *Komilis D., Evangelou A., Giannakis G., Lympers C.* Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes // Waste Management, 2012, Vol. 32, Issue 3, p. 372–381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>.

8. *Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J. et al.* Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3. Solid recovered fuel produced from municipal solid waste, 2015. URL: <https://doi.org/10.1177/X14563375>.
9. *Chen L., Liu M., Fan R., Ma S. et al.* Mercury speciation and emission from municipal solid waste incinerators in the Pearl River Delta, South China // *Science of The Total Environment*, 2013, Vol. 447, pp. 396—402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.018>.
10. *Zhang G., Hai J., Cheng J. et al.* Evaluation of PCDD/Fs and metals emission from a circulating fluidized bed incinerator co-combusting sewage sludge with coal // *Journal of Environmental Sciences*, 2013, Vol. 25, Issue 1, pp. 231—235. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60009-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60009-6).
11. *Li Y., Wang H., Jiang L. et al.* HCl and PCDD/Fs emission characteristics from incineration of source-classified combustible solid waste in fluidized bed // *RSC Adv.*, 2015, **5**, pp. 67866—67873.
12. Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration / European Commission, Brussel, 2006, 602 p. URL: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf.
13. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 5, Waste. Chapter 5: Incineration and open burning of waste // IPCC, 2006, 26 p. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.
14. European Commission – Directorate General Environment Refuse Derived Fuel, Current Practice And Perspectives (B4-3040/2000/306517/Mar/E3) / Final Report: Wrc Ref: Co5087-4. 2003, 219 p. URL: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>.
15. *Mutz D., Hengevoss D., Hugi C., Gross T.* Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries // Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Eschborn, 2017, 58 p. URL: https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf.
16. Refuse derived fuel, current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3) / WRC, 2003. URL: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>.
17. *Гапонич Л.С., Голенко И.Л., Топал А.И.* Перспективы использования SRF и RDF на цементных заводах Украины // *Екологічні науки*, 2020, № 3(30), с. 92—97. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.15>.
18. *Lin H., Ma X.* Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator // *Waste Management*, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 561—567, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.032/>
19. *Rada E.C., Cioca L.I., Lonescu G.* Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective // *Web of Conferences* 121, 2017, DOI: 10.1051/mateconf/20171210 MSE 2017 5006.
20. *Boavida D., Abelha P., Gulyurtlu I., Cabrita I.* Co-combustion of coal and nonrecyclable paper and plastic waste in a fluidized bed reactor // *Fuel*, 2003, Vol. 82, pp. 1931—1938.
21. CEWEP Energy Report III (Status 2007–2010). Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WtE) Plants / D.O. Reimann // *Confederation of European Waste to Energy Plants (CEWEP)*, Germany, 2012, 35 p. https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/10/1069_13_01_15_cewep_energy_report_iii.pdf
22. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // *Official Journal of the European Communities*, 2010, L 334, pp. 17–119. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>.

23. Cai P.-T., Zhan M.-X., Ma H.-C. et al. Pollutant Emissions during Co-incineration of Landfill Material Refuse-Derived Fuel in a Lab-Scale Municipal Solid Waste Incineration Fluidized Bed Furnace // *Energy Fuel*, 2020, 34, 2, pp. 2346—2354, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03793>
24. Astrup T., Møller J. Thilde Fruergaard. Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions // *Waste Management & Research*, 2009, 27, pp. 789—799. DOI: 10.1177/0734242X09343774.
25. Psomopoulos C.S. Residue Derived Fuels as an Alternative Fuel for the Hellenic Power Generation Sector and their Potential for Emissions Reduction // *AIMS Energy*, 2014, Vol. 2, Issue 3, pp. 321—341. DOI: 10.3934/energy.2014.3.321.
26. Vekemans O., Chaouki J. Municipal Solid Waste Co-firing in Coal Power Plants: Combustion Performance // *Developments in Combustion Technology*, 2016, pp. 117—143. DOI: 10.5772/63940.
27. Chyang C.S., Han Y.L., Wu L.W. et al. An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal // *Waste Management*, 2010, 30, pp. 1334—1340.
28. O N.-C., Pak H.-S., Sin Y.-C. et al. A feasibility study of energy recovery of RDF from municipal solid waste // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2018, 40:24, pp. 2914—2922, DOI: 10.1080/15567036.2018.1514431.
29. Refuse derived fuel, current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/ MAR/E3) // WRc, 2003. URL: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>
30. Weber K., Quicker P., Hanewinkel J. Status of waste-to-energy in Germany, Part I – Waste treatment facilities // *Waste Management & Research*, 2020, Vol. 38(1), pp. 23—44. <https://doi.org/10.1177/0734242X19894632>
31. Magnussen B.F., Hjertager B.W. On the structure of turbulence and a generalised eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow // 19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.
32. Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames // *Combustion Science and Technology*, 1981, Vol. 27, pp. 31—43.
33. Bartok W., Sarofim A.F. et al. Fossil Fuel Combustion: A Source Book. NY: JohnWiley& Sons, 1991, 866 p.
34. Liedann B., Arnold W., Kruger B. et al. An approach to model the thermal conversion and flight behaviour of refuse derived fuel // *Fuel*, 2017, Vol. 200, pp. 252—271. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.069>
35. Weber R, Kupka T, Zajac K. Jet flames of a refuse derived fuel // *Combust Flame*, 2009, Vol. 156, pp. 922—927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.12.011>.
36. ANSYS FLUENT Theory Guide. ANSYS FLUENT Release 14.0, 1996—2011. USA: ANSYS Ltd, 2011, 862 p.
37. <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>

Отримано 09.10.2020

REFERENCES

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of November 19, 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*, from November 22, 2008, L. 312, P. 3—30, available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
2. Neuwahl, F., Cusano, G., Benavides, J.G., Holbrook, S., Roudier, S. (2019), The Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, EUR 29971 EN, DOI:10.2760/761437.

3. Haponych, L.S., Golenko, I.L., Topal, A.I. (2019), "Legislation, current situation and prospects of using municipal solid waste as energy resource in Ukraine", *Problemy zahalnoyi enerhetyky*, Vol. 3, no. 58, pp. 45–54, DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2019.03>.
4. Bulyandra, O., Haponych, L., Golenko, I., Topal, O. (2020), "Prospects of the use of fuel from municipal solid waste at TPP of sugar factories", *Naukovi pratsi NUHT*, Vol. 26, no. 3, pp. 137–147, DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-3-16.
5. Saveyn, H., Eder, P., Ramsay, M., Thonier, G., Warren, K., Hestin, M. (2016), "Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy", *The European Commission's science and Knowledge service*, DOI: 10.2791/870953.
6. Solomin, I.A., Afanas'eva, V.I. (2017), "Composition and Properties Solid of Municipal Waste Considered When Choosing Technical Methods of water treatment", *Prirodoobustroystvo*, Vol. 3, pp. 82–90.
7. Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G., Lymperis, C. (2012), "Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes", *Waste Management*, Vol. 32, no. 3, pp. 372–381, available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>.
8. Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J. et. al. (2015), Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3. Solid recovered fuel produced from municipal solid waste, available at: <https://doi.org/10.1177/X14563375>.
9. Chen, L., Liu, M., Fan, R., Ma, S. et.al. (2013), "Mercury speciation and emission from municipal solid waste incinerators in the Pearl River Delta, South China", *Science of The Total Environment*, Vol. 447, pp. 396–402, available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.018>.
10. Zhang, G., Hai, J., Cheng, J. et.al. (2013), "Evaluation of PCDD/Fs and metals emission from a circulating fluidized bed incinerator co-combusting sewage sludge with coal", *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 25, no. 1, pp. 231-235, available at: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60009-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60009-6).
11. Li, Y., Wang, H., Jiang, L. et.al. (2015), "HCl and PCDD/Fs emission characteristics from incineration of source-classified combustible solid waste in fluidized bed", *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 67866–67873.
12. Best Available Techniques Reference Document for Waste Incineration (2006), *European Commission*, Brussels, available at: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf.
13. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Waste (2005), IPCC, Vol. 5, available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.
14. European Commission – Directorate General Environment. Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/Mar/E3). Final Report. Ref: Co5087-4 (2003), *Wrc*, available at: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>.
15. Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., Gross, T. (2017), "Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries", *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, Eschborn, Germany, available at: https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf.
16. Refuse derived fuel, current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3), *Wrc*, (2003), available at: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>.
17. Haponych, L., Holenko, I., Topal, O. (2020), "The prospects to use SRF and RDF at cement plant of Ukraine", *Ekologichni nauky*, Vol. 3, no. 30, pp. 92–97, DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.15>.

18. Lin, H., Ma, X. (2012), "Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator", *Waste Management*, Vol. 32, no. 3, pp. 561–567, available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.032/>.
19. Rada, E.C., Cioca, L.-I., Lonescu, G. (2017), "Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective", *Web of Conferences*, Vol. 121, DOI: 10.1051/mateconf/20171210 MSE 2017 5006.
20. Boavida, D., Abelha, P., Gulyurtlu, I., Cabrita, I. (2003), "Co-combustion of coal and non-recyclable paper and plastic waste in a fluidized bed reactor", *Fuel*, Vol. 82, pp. 1931–1938.
21. "CEWEP Energy Report III (Status 2007–2010)" (2012), Confederation of European Waste to Energy Plants (CEWEP), Germany, available at: https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/10/1069_13_01_15_cewep_energy_report_iii.pdf.
22. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of November 24, 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (2010), Official Journal of the European Communities, L 334, pp. 17–119, available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>.
23. Cai, P.-T., Zhan, M.-X., Ma, H.-C. et. al. (2020), "Pollutant Emissions during Co-incineration of Landfill Material Refuse-Derived Fuel in a Lab-Scale Municipal Solid Waste Incineration Fluidized Bed Furnace", *Energy Fuel*, Vol. 34, no. 2, pp. 2346–2354, available at: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03793>.
24. Astrup, T., Møller, J., Fruergaard, T. (2009), "Incineration and co-combustion of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions", *Waste Management & Research*, Vol. 27, pp. 789–799, DOI: 10.1177/0734242X09343774.
25. Psomopoulos, C.S. (2014), "Residue Derived Fuels as an Alternative Fuel for the Hellenic Power Generation Sector and their Potential for Emissions Reduction", *AIMS Energy*, Vol. 2, no. 3, pp. 321–341, DOI: 10.3934/energy.2014.3.321.
26. Vekemans, O., Chaouki, J. (2016), "Municipal Solid Waste Co-firing in Coal Power Plants: Combustion Performance", *Developments in Combustion Technology*, pp. 117–143, DOI: 10.5772/63940.
27. Chyang, C.S., Han, Y.L., Wu, L.W. et. al. (2010), "An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal", *Waste Management*, Vol. 30, pp. 1334–1340.
28. O, N.-C., Pak, H.-S., Sin, Y.-C. et. al. (2018), "A feasibility study of energy recovery of RDF from municipal solid waste", *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, Vol. 40, no. 24, pp. 2914–2922, DOI: 10.1080/15567036.2018.1514431.
29. Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/Mar/E3). Final Report. Ref: Co5087-4 (2003), *Wrc*, available at: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>.
30. Weber, K., Quicker, P., Hanewinkel, J. (2020), "Status of waste-to-energy in Germany, Part I – Waste treatment facilities", *Waste Management & Research*, Vol. 38, no. 1, pp. 23–44, available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X19894632>
31. Magnussen, B.F., Hjertager, B.W. (1981), "On the structure of turbulence and a general eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow", *19th AIAA Aerospace Meeting*, USA, St. Louis, January 12–15, 1981.
32. Westbrook, C. K., Dryer, F. L. (1981), "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 27, pp. 31–43.

33. Bartok, W., Sarofim, A.F. et al. (1991), Fossil Fuel Combustion: A Source Book, JohnWiley&Sons, NY, USA.
34. Liedann, B., Arnold, W., Kruger, B. et al. (2017), “An approach to model the thermal conversion and flight behaviour of refuse derived fuel”, *Fuel*, Vol. 200, pp. 252–271, available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.069>.
35. Weber, R., Kupka, T., Zajac, K. (2009), “Jet flames of a refuse derived fuel”, *Combust Flame*, Vol. 156, pp. 922–927, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.12.011>.
36. Ansys Fluent 14.0. Theory Guide. (2011), ANSYS Inc., USA.
37. URL: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>.

Received 09.10.2020

S.H. Kobzar, O.I. Topal, L.S. Haponych., I.L. Holenko

INVESTIGATION OF CO-FIRING FOR FUEL DERIVED FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN A MODEL COMBUSTION CHAMBER

The production and utilization of fuel derived from municipal solid waste (RDF/SFR) represents a method of the saving of organic fuel and decrease in the emission of harmful substances and greenhouse gases at landfill and refuse dumps. Ukraine has a potential for the production of 1.5–2 million tons of RDF/SFR with a calorific value of 10–25 MJ/kg annually. In the case of involving these fuels to power sector, it is possible to obtain about 1500 GW-h of electricity and 3000 GW-h of heat annually. The potential to substitute natural gas is estimated to be more than 0.6 billion nm³ annually. One of the promising variants to involve RDF/SFR to power sector is their combustion, including co-firing with natural gas, aimed at production of heat and electricity, in particular on the existing boilers of small and middle steam capacity while meeting rigorous ecological requirements (Directive EU 2010/75 etc.). Such co-firing could be made in the case of the above boiler modernization. For performing this investigation, we chose a gas-and-oil-fired burner GMP-16, mounted into a cylindrical combustion chamber. The gas-and-oil-fired hot-water boilers of grade KVGМ, designed for heating and hot water supply, are equipped with burners of this type. In computer modeling, we determined the influence of addition of RDF on the process of their co-firing with natural gas for a given geometry of an element of the combustion chamber (with a burner of heat output 18.6 MW). We obtained calculated dependences of temperatures, velocities, distributions of gas components concentrations, carbon remained in the solid phase, as well as the concentrations of nitrogen oxides and carbon monoxide over the combustion chamber. According to preliminary assessments, we established a possibility of the addition of part of RDF about 20% (by heat at input) in their co-firing with natural gas, which will not change substantially the technical and ecological parameters of the work of combustion chamber.

К е у в о р д s: waste to energy, fuel derived from municipal solid waste, computer modeling, combustion, nitrogen oxides.

КОБЗАР Сергій Григорович, канд. техн. наук, ст. наук співроб., провід. наук співр. Інституту технічної теплофізики НАН України; ст. наук співр. Інституту вугільних енерготехнологій НАН України. У 1991 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — інтенсифікація теплообміну, математичне моделювання процесів горіння.

ТОПАЛ Олександр Іванович, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., завідувач відділу Інституту вугільних енерготехнологій НАН України. У 1993 р. закінчив Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Область наукових досліджень — математичне моделювання, застосування програмних пакетів для CFD-моделювання, розробка сучасних енергетичних технологій, інформаційні технології в енергетиці.

ГАПОНИЧ Людмила Станіславівна, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., провід. наук. співр. Інституту вугільних енерготехнологій НАН України. У 1991 р. закінчила Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — термічна переробка твердих палив, розробка сучасних енергетичних технологій.

ГОЛЕНКО Ірина Львівна, канд. техн. наук, вчений секретар Інституту вугільних енерготехнологій НАН України. У 1984 р. закінчила Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — термічна переробка твердих палив, розробка сучасних енергетичних технологій.