

УДК 620.9; 662.939.9

КОБЗАР С. Г., ТОПАЛ О. І.*, ГАПОНІЧ Л. С., ГОЛЕНКО І. Л.
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУМІСНОГО СПАЛЮВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З RDF В МОДЕЛЬНІЙ КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ**

Виробництво та утилізація палива, отриманого з твердих побутових відходів (RDF/SFR), є ефективним методом економії викопного палива та зменшення викидів шкідливих речовин та парникових газів на полігонах та сміттєзвалищах. Україна має потенціал для виробництва щорічно близько 2,5–3,5 млн. тонн палива з твердих побутових відходів з теплою згорання 10–25 МДж/кг. У разі залучення цих видів палива в енергетику України можна отримати до 2500 ГВт×год електроенергії та 4500 ГВт×год теплоти щорічно. Одним з перспективних варіантів залучення палива з твердих побутових відходів до енергетичного сектору є їх спалювання, включаючи спільне спалювання з природним газом, спрямоване на виробництво теплоти та електроенергії, зокрема на існуючих котлах малої та середньої потужності пари, з дотриманням суворих екологічних вимог (Директива ЄС 2010/75 про промислові викиди та ін.).

Для проведення цього дослідження ми вибрали газомазутний пальник ГМП-16, встановлений у циліндричній камері згорання. Газомазутні водогрійні котли марки КВГМ, які призначені для опалення та гарячого водопостачання, оснащені пальниками цього типу. При комп'ютерному моделюванні процесу спалювання було вивчено вплив додавання палива з твердих побутових відходів на процес спільного спалювання для визначеної геометрії елемента камери згорання (з пальником теплової потужності 18,6 МВт). Ми отримали розрахункові залежності температур, швидкостей, розподілу концентрацій газових компонентів, залишку вуглецю у твердій фазі, а також концентрації оксидів азоту та оксиду вуглецю в камері згорання. Наші розрахунки показують, що додавання частки палива з твердих побутових відходів у кількості до 20% (за теплом по входу) під час їх спільного з природним газом істотно не змінює техніко-екологічні показники роботи камери згорання.

Ключові слова: *тверді побутові відходи, відходи в енергію, паливо з твердих побутових відходів*

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2021.248946

*Corresponding author: dr.topal@gmail.com

Received 21 Juny 2021; Accepted 31 August 2021

За офіційною статистикою в Україні у 2020 р. обсяг збирання твердих побутових відходів (ТПВ) становив понад 54,1 млн. м³, або понад 15,4 млн. тонн, які захоронюються на 6 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9 тис. га. У 2020 р. в Україні перероблено і утилізовано лише 4,2% ТПВ, з них 1,2% спалено, а 3,0% потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні установки. Захоронення майже 95% необроблених ТПВ на полігонах призводить до щорічної втрати значної кількості енергоресурсів та цінних матеріалів, які містяться у відходах. За нашими розрахунками теплота згорання ТПВ становить для міст України 4,8–7,0 МДж/кг, вона подібна до теплоти згорання торфу та бурого вугілля [1].

Сортування ТПВ не вирішує завдання повної утилізації відходів, а їх відокремлена частина, що містить органічну складову, має використовуватись для виробництва електричної та теплової енергії в екологічно безпечний спосіб. ТПВ мають значний енергетичний потенціал, який можна використати шляхом вилучення з них вторинного палива, щорічний обсяг якого в Україні може сягати близько 2,5–3,5 млн т з теплою згорання в межах 10–25 МДж/кг. Отже, розробка та впровадження екологічно безпечних методів утилізації ТПВ та альтернативних палив на їх основі, зокрема RDF (refuse derived fuel), є актуальною проблемою, вирішення якої потребує системного та науково-обґрунтованого підходу. Водночас, термічна утилізація відходів, яка відбувається без урахування особливостей морфологічного та елементного складу ТПВ, може призводити до утворення вкрай небезпечних для людини сполук – діоксинів та фуранів. Для запобігання небезпечному спалюванню ТПВ в ЄС існують жорсткі директиви (2010/75/ЄС, 2000/76/ЄС та інші [1-3]) щодо режимних параметрів нових теплових установок, які утилізують ТПВ та палива на їх основі. Вітчизняні

нормативні документи, що розробляються, також сприяють поступовому витісненню спалювання несортованого ТПВ, замінюючи його або спалюванням палива з ТПВ – RDF гарантованої якості, або іншими технологіями термохімічної переробки [1]. Мета роботи полягала у дослідженні процесу спільного спалювання палива з ТПВ з природним газом та оцінці впливу заміщення частини природного газу RDF/SRF на експлуатаційні та екологічні характеристики процесу спалювання.

Для дослідження вибрано інтегрований в циліндричну камеру згоряння газомазутний пальник ГМП-16 [4]. Стандартний пальник ГМП-16 оснащено отвором для мазутної форсунки. Отвір для мазутної форсунки розташований на осі пальника та має діаметр 48 мм. Організація подачі RDF в пальник потребує окремого розгляду та технічних рішень. Паливо, що подається, має бути належним чином подрібненим та дрібнодисперсним.

Всі розрахунки було 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 CH_4 50,1 МДж/кг витрата газу становить 0,371 кг/с, витрата повітря при надлишку 1,05 – 6,72 кг/с. В модельній камері згоряння повітря подавалося з закрученням, моделювався аксіально-лопатковий завихрювач з лопатками, встановленими під кутом 45°. RDF подавалося разом з димовими газами з вмістом кисню 2% (за масою) зі швидкістю 20 м/с при температурі 100 °С. Приймалося, 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 Re 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 використовувалася RNG k - ε модель турбулентності. Густина суміші газів розраховувалася за допомогою закону ідеального газу для суміші газів. Вплив гравітації враховувався шляхом завдання сили земного тяжіння в напрямку протилежному напрямленню осі Y . Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer).

Для моделювання горіння природного газу зроблені наступні припущення:

1. Природний газ складається тільки з метану.
2. Горіння метану відбувається за двостадійним механізмом (реакції 1, 2):



Для розрахунку процесу горіння застосована гібридна схема. Середня швидкість хімічної реакції компоненти визначалася як мінімальне значення швидкості реакції визначене за моделлю дисипації вихорів (R_{EDC}) [5] та закону Ареніуса (R_{Ar}) [6]: $R = -\min(R_{EDC}, R_{Ar})$, (3)

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

Значення коефіцієнтів в формулі (4) наведені у табл. 1 [5, 6].

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів

Реакція	A	b	c	d	e	E_a , ккал/моль
(1)	$1,5 \cdot 10^7, 1/\text{с}$	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

Швидкість реакції за моделлю дисипації вихорів Магнусена [5], визначалася за формулою:

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

де \bar{Y}_{fuel} , \bar{Y}_{ox} – масова концентрація палива та окислювача, s – стехіометричне відношення реакції паливо/окислювач; A_{EDC} и B_{EDC} константи моделі. В моделі дисипації вихорів використовувалися стандартні значення констант $A_{EDC}=4$ и $B_{EDC}=0,5$.

В дослідженні використовувався склад ТПВ, який характерний для великих міст. В табл. 2 наведено масові частки складових ТПВ, які використовувалися для створення RDF [7].

Таблиця 2 – Фізико-хімічні характеристики складових ТПВ та отриманого RDF

Складова	Масова частка, %	Технічний аналіз, %				Елементний склад, %			
		W ^r , %	A ^r , %	V ^r , %	Q _i ^r , МДж/кг	C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	O ^{daf}
Поліетилен	22,0	1,05	1,04	97,91	37,73	78,93	12,03	0,07	8,98
Пластмаса	24,0	0,95	5,09	93,96	37,80	80,42	12,86	0,22	6,50
Папір, картон	19,0	25,68	10,68	53,19	10,78	45,72	6,74	0,24	47,30
Текстиль	8,0	6,26	10,99	73,18	20,61	64,96	7,47	1,39	26,18
Дрібні волок-на поліетиле-ну, пластмаси	27,0	28,48	17,51	42,55	10,22	60,48	8,30	1,47	29,75
RDF	100,0	13,53	9,09	71,54	23,83	66,88	9,85	0,62	22,65

Для моделювання горіння частинок твердого палива використовувалася вбудована в пакет Fluent стандартна модель. Згідно цієї моделі транспорт частинок моделювався шляхом розв'язання рівняння руху частинки в постановці Лагранжа. Зміну розміру діаметру частинки твердого палива прийнято пропорційною зміні її зовнішньої поверхні чи масі (у разі, коли частинка вважається непроникною для газів реагентів).

При потрапленні частинки твердого палива в модельну камеру згорання з нею відбуваються наступні процеси: сушка; термічна деструкція; горіння вуглецю. В дослідженні було прийнято, що процес термічної деструкції твердого палива починається після досягнення температури виходу летких $T_{devol} = 550$ К. Передбачалося, що RDF при цьому розкладається на коксовий залишок (*CHAR*) та леткі (*Fuel GAS*): $RDF \rightarrow CHAR + Fuel\ GAS$.

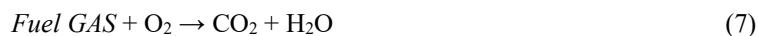
Зміна маси частинки залежить від матеріалу твердого палива, залишку летких у матеріалі та задовольняє закону Ареніуса з властивими конкретному матеріалу значеннями енергії активації E_{vol} та передекспонентним фактором k_{vol0} :

$$k_{vol} = k_{vol0} \exp\left(-\frac{E_{vol}}{RT_p}\right). \quad (6)$$

Кінетичні параметри у виразі (6) були взяті відповідно до рекомендацій роботи [7], де для RDF відповідного складу (див. табл. 2) були запропоновані наступні значення $E_{vol} = 106,5$ кДж/моль та $k_{vol0} = 2,47 \times 10^6$ 1/с.

Для моделювання гетерогенного горіння коксового залишку використовувалася стандартна дифузійно-кінетична модель горіння вуглецю. Прийнято, що горіння відбувається на зовнішній поверхні за сумарною (брутто) реакцією $C + O_2 = CO_2$.

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



Середня швидкість хімічної реакції летких визначалася як мінімальне значення швидкості реакції визначене за моделлю дисипації вихорів та закону Ареніуса згідно виразам (3) – (5). В моделі дисипації вихорів використовувалися стандартні значення констант $A_{EDC} = 4$ и $B_{EDC} = 0,5$, а для залежності (4) використовувалися кінетичні параметри для одностадійного механізму горіння метану відповідно до [6, 9]. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використовувалися термічний, промрт та паливний механізми утворення оксидів азоту.

Результати дослідження. На рис. 1–7 наведені результати комп'ютерного моделювання спільного процесу спалювання у модельній камері [4] природного газу та дрібнодисперсних частинок RDF у кількості, що становить 10% вхідної потужності суміші (по теплу). На рис. 1–3 наведено концентрацію вуглецю в частинках RDF, зміну часу руху частинок по траєкторії вздовж камери згорання та концентрацію летких.

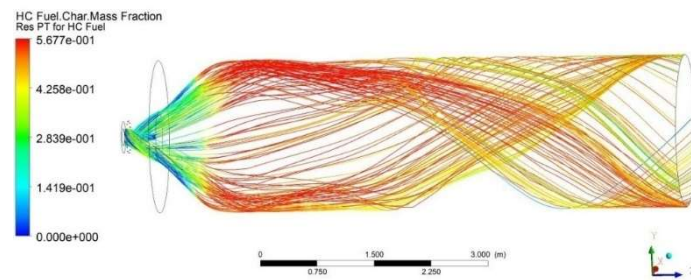


Рис. 1 – Концентрація коксового залишку в частинках твердої фази

Аналіз отриманих результатів показує, що вихід летких відбувається в межах пальникового пристрою, після чого, під дією відцентрових сил частинки палива, які на цей момент переважно складаються з вуглецю та золи, відносяться до периферії камери згоряння та рухаються в граничному шарі, який характеризується низькими значеннями концентрацій кисню та температурою, що потребує більшого часу перебування для повного згоряння вуглецю. Це пов'язано в першу чергу з використанням сильного завихрення, що характерно для стандартного пальника ГМП-16, який розрахований на спалювання газоподібного та рідкого палив.

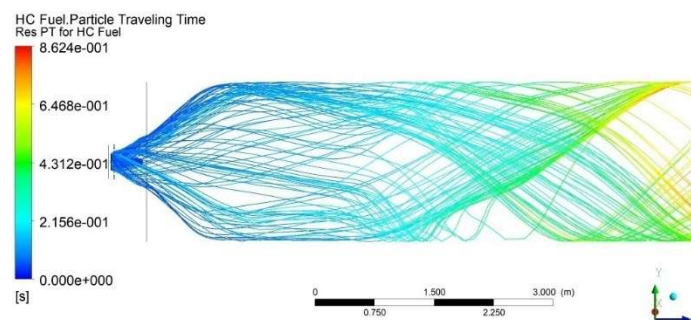


Рис. 2 – Тривалість перебування частинок твердого палива в камері згоряння

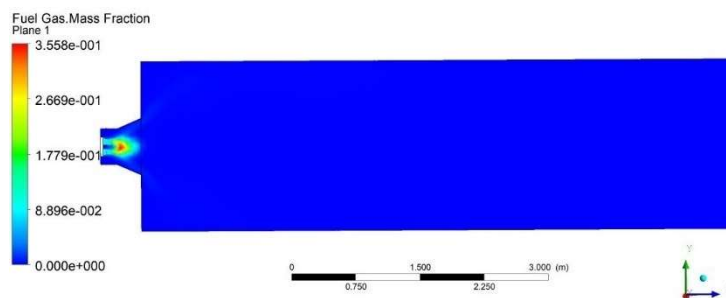


Рис. 3 – Концентрація летких

На рис. 4 показано поле осьової швидкості, що викликається аксіально-лопатковим завихрювачем. Зона зворотних потоків, що утворюється на вісі камери дозволяє добре спалювати газоподібне паливо, що підтверджується розподілом концентрації оксиду вуглецю (дивись рис. 5).

При спалюванні RDF з характеристиками, наведеними в табл. 2, внаслідок високої концентрації летких в твердому паливі та швидкого їх виділення значно зменшується розмір частинок. Це призводить до збільшення відносної густини частинок та зменшення їх лобового опору. Сукупність зазначених факторів призводить до відтиснення частинок на периферію камери згоряння.

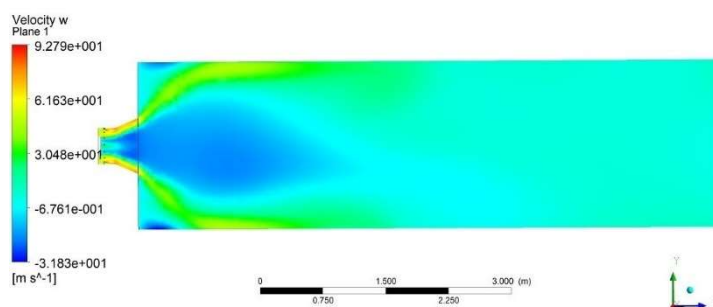


Рисунок 4 – Розподіл осьової швидкості

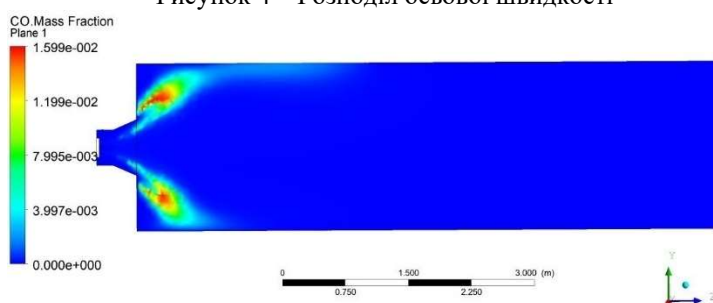


Рисунок 5 – Розподіл концентрації оксиду вуглецю

На рис. 6 показано температурне поле на вісі камери згоряння. Характер температурного поля обумовлений особливостями гідродинаміки, що описані вище. На рис. 7 показано розподіл концентрації оксидів азоту в центральному перерізі камери згоряння. Зони підвищеної генерації NO_x, що розташовані на бокових поверхнях камери згоряння можна пояснити паливним механізмом утворення оксидів азоту.

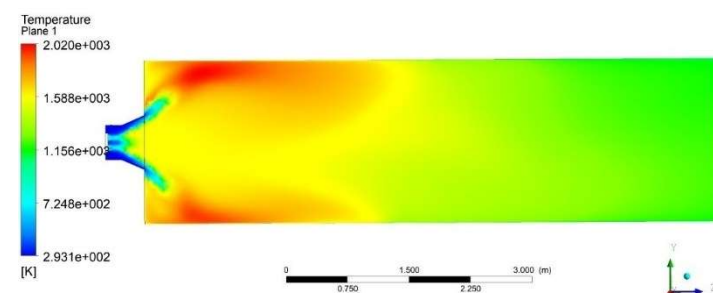


Рисунок 6 – Розподіл температури

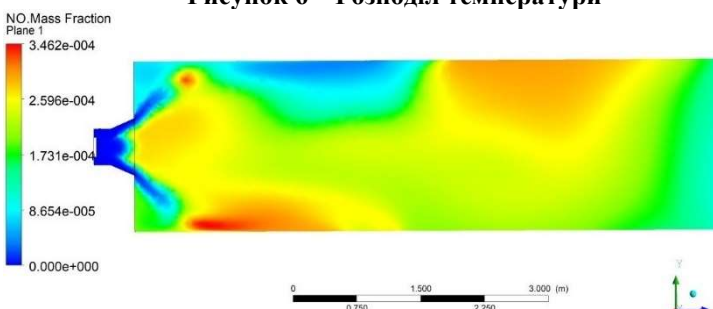


Рисунок 7 – Концентрація оксидів азоту

Як видно з рис. 3, вихід летких відбувається в межах паливкового пристрою та амбразури. Далі частинки RDF під дією відцентрових сил відносяться на периферію потоку де відбувається утворення оксидів азоту за паливним механізмом. Перша зона підвищеної концентрації NO_x, що знаходиться знизу розрахункової зони

обумовлена сумарною дією відцентрових та гравітаційних сил, під дією яких частинки з більшою масою попадають у цю зону. В табл. 3 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.

Таблиця 3 – Інтегральні характеристики модельної камери згоряння при сумісному спалюванні метану та RDF в камері згоряння

Q газу, %	QRDF, %	Емісія CO, мкг/с	Емісія вуглецю, г/с	Втрати палива, %	T_{\max} , К	Емісія NO _x , мкг/с
100	0	2,459	~0	~0	2011	109
90	10	2,29	4,43	0,781	2020	844
80	20	2,294	7,11	1,25	1993	843
70	30	2,30	8,83	1,56	1907	1198

Розрахунки показують, що збільшення частки RDF в складі паливної суміші призводить до зростання емісії NO_x та зниженню ККД, обумовленого зростанням втрат палива. Втрати палива розраховувалися як сума втрат теплової енергії разом з вуглецем, що не згорів, та оксидом вуглецю, які залишили розрахункову область разом з продуктами згоряння. Для підвищення часу перебування частинок твердого палива необхідно провести зміни у стандартному пальнику ГПМ-16.

ВИСНОВКИ

1. На цей час в Україні поступово набуває актуальності та потребує відповідного науково обґрунтованого вирішення проблема поводження із відходами різних видів, зокрема ТПВ, щорічна кількість яких сягає великих значень – близько 11–12 млн т. ТПВ мають значний енергетичний потенціал, який можна використати шляхом вилучення з них вторинного палива у вигляді RDF, щорічний обсяг якого в Україні може сягати близько 2,5–3,5 млн т з теплою згоряння в межах 10–25 МДж/кг.

2. Одним із шляхів термічної утилізації RDF є їх спалювання, у тому числі спільне із природним газом, з додержанням жорстких екологічних вимог (Директива ЄС 2010/75 тощо) з метою виробництва теплової та електричної енергії (зокрема у існуючих котлах малої та середньої паропроодуктивності за умов їх модернізації).

3. Визначено вплив додавання RDF на процес їх спільного спалювання із природним газом для заданої геометрії елементу камери згоряння. Отримано розрахункові залежності температур, швидкостей, розподілу концентрацій газових компонентів, залишку вуглецю у твердій фазі, концентрації оксидів азоту та монооксиду вуглецю у камері згоряння. За попередніми оцінками визначено можливість додавання частки RDF у кількості до 20% (за теплом по входу) під час їх спільного з природним газом спалювання, що не змінить суттєвим чином техніко-екологічні показники роботи камери згоряння.

Список використаної літератури

1. Гапонич Л. С., Голенко І. Л., Топал А. І. Нормативне регулювання, сучасний стан поводження та перспективи енергетичного використання твердих побутових відходів в Україні // Проблеми загальної енергетики, 2019, 3(58), с. 45–54. URL: DOI: <https://doi.org/10.15407/page2019.03>.
2. Neuwahl F., Cusano G., Benavides J. G., Holbrook S., Roudier S. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019, 764 p.; EUR 29971 EN; DOI:10.2760/761437.
3. 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>.
4. Кобзар С. Г., Топал О.І., Гапонич Л.С., Голенко І.Л., Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів // Електронне моделювання, 2020, Т. 42, №6, с. 74–92. URL: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>.
5. Magnussen B. F., Hjertager B. W. On the structure of turbulence and a general is eddedy dissipati on concept for chemical reaction in turbulent flow//19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.
6. 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.
7. Liedann 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>.

8. Weber R, Kupka T, Zajac K. Jet flames of a refuse derived fuel // *Combust Flame*, 2009, 156, pp. 922–927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.12.011>.
 9. Bartok W., Sarofim A. F. et al. *Fossil Fuel Combustion: A Source Book*. NY: JohnWiley&Sons, 1991, 866 p.
-

Sergii Kobzar, Olexandr Topal, Liudmyla Haponych, Iryna Golenko

INVESTIGATION OF THE CO-FIRING OF NATURAL GAS AND RDF IN A MODEL COMBUSTION CHAMBER

The production and utilization of fuel derived from municipal solid waste (RDF/SFR) is an effective method for saving organic fuel and decreasing emissions 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, about 2500 GW-h of electricity and 4500 GW-h of heat can be produced annually. One of the promising variants to involve RDF/SFR to power sector is their combustion, including co-firing with natural gas, aimed at the production of heat and electricity, in particular, using the existing boilers of small and middle steam capacity in compliance with stringent ecological requirements (Directive 2010/75/EU etc.).

For performing this investigation, we chose a GMP-16 gas-and-oil-fired burner, mounted into a cylindrical combustion chamber. The gas-and-oil-fired hot-water boilers of KVGM grade, designed for heating and hot water supply, are equipped with burners of this type. In computer modeling, we determined the influence of RDF additions on the co-firing with natural gas for a given geometry of the combustion chamber components (with a burner of 18.6 MW heat output). We obtained calculated dependences of temperatures, velocities, distributions of gas component 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 that additions of up to 20% RDF/SFR (by heat at input) in their co-firing with natural gas will not change substantially the technical and ecological parameters in operation of the combustion chamber.

Keywords: municipal solid waste, waste to energy, fuel derived from municipal solid waste

References

1. Haponych L. S., Golenko I. L., Topal A. I. Legislation, current situation and prospects of using municipal solid waste as energy resource in Ukraine // *Problemy zahalnoyi enerhetyky*, 2019, Vol. 3, no. 58, pp. 45–54. URL: DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2019.03>.
2. Neuwahl F., Cusano G., Benavides J. G., Holbrook S., Roudier S. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019, 764 p.; EUR 29971 EN; DOI:10.2760/761437.
3. 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>.
4. Kobzar S. H., Topal O. I., Haponych L. S., Holenko I. L. Investigation of co-firing for fuel derived from municipal solid waste in a model combustion chamber // *Elektron. model.* 2020, 42(6):72-90. URL: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>.
5. Magnussen B. F., Hjertager B. W. On the structure of turbulence and a general is edddy dissipati on concept for chemical reaction in turbulent flow//19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.
6. 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.
7. Liedann 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>.
8. Weber R, Kupka T, Zajac K. Jet flames of a refuse derived fuel // *Combust Flame*, 2009, 156, pp. 922–927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.12.011>.
9. Bartok W., Sarofim A. F. et al. *Fossil Fuel Combustion: A Source Book*. NY: JohnWiley&Sons, 1991, 866 p.