

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)**

---

УДК 581.9:504.54

**ЧИСЛОВЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ  
СПАЛЮВАННЯ НИЗЬКОКАЛОРИЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВ**

Д-р техн. наук І. О. Редько, асистенти Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко,  
канд. техн. наук Г. В. Біловол, магістранти Є. О. Москальов, В. І. Бойко

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF LOW-CALORIE GAS FUELS  
COMBUSTION PROCESSES**

Dr. Sc. (Tech.) I. Redko, assistant Y. Burda, assistant Y. Pivnenko, PhD (Tech.) H. Bilovol,  
master Y. Moskalov, master V. Boiko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273496>



***Анотація.** Метан, що міститься у вугільних пластах, давно розглядається як альтернатива імпортованому природному газу. Уловлювання та використання метану можуть суттєво підвищити додану вартість гірничодобувних робіт, підвищити безпеку умов праці та зменшити негативний вплив на довкілля. Але існує низка технічних і технологічних труднощів, що гальмують розвиток видобутку та утилізації метану. У роботі проведено експериментальне моделювання процесу спалювання вугільного метану в подових пальниках модернізованої конструкції. Виконано аналіз зміни екологічних параметрів процесу спалювання. Наведено результати показників спалювання метану в подових пальниках, встановлено діапазон зміни абсолютної швидкості та температури газу.*

***Ключові слова:** шахтний метан, комп'ютерне моделювання, технології спалювання, подовий пальник.*

***Abstract.** Methane, which is found in coal seams, has long been seen as an alternative to imported natural gas. Capturing that victorious methane can immediately increase the versatility of the production of footwear, increase the safety of the minds of the workforce, and change the negative impact to dovkillya. And yet, there are low technical and technological folds, which galmuyut the development of the type of bottle and utilization of methane.*

*One of the main directions of extraction of coal mine methane is the generation of thermal energy in boiler houses and other heat generators. However, this type of paliva is unstable in concentration and important, due to the fact that the technical riven has the same characteristics. The current development of technology and technology, in general, allows you to successfully improve the nutrition of methane. There are very few data on environmental and energy indicators for the process of scalding with different palnikov outbuildings.*

*In the coal mines of the Donbass, there is a widespread stagnation of the boiler room with bottom (hollow) toe shoes. Further indications of scalding with different design features of this type of stokers will help to improve nutrition by reducing the chemical insufficiency of scalding gas and increasing the thermal pressure of the boiler.*

*It is shown that the computer simulation and re-verification of the efficiency of coal mine methane scorching in scorching boilers from the stoking of bottom (hollow) stokers is shown to be possible.*

*In the robot, an experimental simulation of the process of burning coal methane in the bottom of the burners of a modernized design was carried out, and tests were carried out on the distribution of medium-mass parameters in the gas at the exit from the fire line from the vicarious grids. And also, an analysis of stationary watering of the average characteristics of the flow-fluidity, temperature, concentration of components, nitrogen oxide and nitrogen oxide fluidity was carried out.*

**Keywords:** mine methane, computer modeling, combustion technologies, floor burner.

**Вступ.** В останні десятиліття у світі різко зросла увага до проблем метану, бо його присутність в атмосфері впливає на температуру Землі та клімат. Метан – другий, найбільш поширений, парниковий газ після діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). Уловлювання метану та використання його як палива має енергетичні, економічні переваги, а також переваги, пов'язані з питаннями безпеки вуглевидобутку та охорони навколишнього середовища. Уловлювання метану на вугільних шахтах дозволяє підвищити безпеку за рахунок зниження ризику вибухів метаноповітряної суміші в шахтах.

Одним із основних напрямів використання шахтного метану є вироблення теплової енергії в котельних та інших генераторах теплоти. Однак такий вид палива є нестабільним за концентрацією і важливо, щоб технічний рівень обладнання відповідав його особливостям. Сучасний стан розвитку техніки та технологій у цілому дозволяє досить успішно вирішувати питання використання метану. Але даних за екологічними та енергетичними показниками процесу спалювання при використанні різних пальникових пристроїв вкрай мало. На гірничодобувних шахтах Донбасу широко застосовується опалювальне котельне обладнання з подовими (щільними) пальниками. Дослідження показників спалювання при різних конструктивних особливостях такого типу пальників допоможе вирішити питання зі зниження хімічної неповноти

спалювання газу та підвищення теплової потужності котла.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підприємства вугільної промисловості в Донецькому вугільному басейні України отримують і викидають в атмосферу близько 1,2 млрд  $\text{м}^3/\text{р.}$  шахтного метану, близько 15 % обсягу уловлюється [1, 2]. Раціональне використання шахтного метану – це його спалювання на котельнях і радіаційних випромінювачах, сушильних установках, змішувальних повітро-нагрівачах для обігріву шахтних стволів, у когенераційних установках при виробництві електроенергії, технологічних процесах та ін. Використання вугільного метану дає змогу збільшити енергоозброєність шахт на 20 %. Найбільш ефективним за енергетичним критерієм є використання вугільного метану як палива мобільних електростанцій [3].

Шахтний метан характеризується змінним складом і витратами через різні газоносності вугільних пластів. Запобігання небезпечним скупченням метану у виробках пластів вугільних шахт здійснюється шляхом дегазації через вертикальні дегазаційні свердловини [4]. Система дегазації шахт України відрізняється від європейської. В Україні її проєктували на викид отриманого шахтного метану за межі гірничої виробки, не враховуючи перспектив його використання. Тому значна частина метану видаляється через систему вентиляції. Україна є найбільшим джерелом викидів шахтного метану, за кількістю викидів

займає четверте місце у світі [4]. Далі, через низьку герметичність до системи дегазації надходить повітря і в метано-повітряній суміші концентрація метану змінюється в широких межах від 2,5 до 42 % (2,5-25 % некондиційний метан), при цьому в суміші міститься крапельна і парова волога, вугільний пил, тому потрібна додаткова підготовка газу. Концентрація кисню становить від 5 до 12 об'ємних відсотків. Концентрація діоксиду вуглецю змінюється в межах 18-21 %. При цьому концентрація компонентів суміші може змінюватися стрибкоподібно, що ускладнює використання суміші в газових двигунах для вироблення електроенергії. Система утилізації містить дороге устаткування і тому найпростіше рішення – це енергетичне використання шахтного метану в котельних установках. Промисловістю випускаються автономні модульні котельні, оснащені вузлом підготовки шахтного метану, використання спеціальних автоматизованих пальникових блоків. Але на сьогодні на шахтних котельнях, оснащених котлами типу ДКВР, використовуються подові, ГМГ, вертикальні щілинні пальники. Пальники цих типів не комплектуються системами автоматики.

Видобуток і використання метану сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища [2]. Дані щодо екологічних і енергетичних характеристик у різних пальникових пристроях при спалюванні вугільного метану практично відсутні. У роботах [5, 6] наведено дані моделювання процесу дифузійного спалювання природного газу в прямоточно-вихровому пальнику.

Найбільш простими є дифузійні пальники [5]. Газ впливає з отворів, а необхідне для горіння повітря надходить з навколишнього середовища. Процеси змішування газу і повітря відбуваються на виході газу з пальника.

Дифузійні пальники застосовують для спалювання штучних низькокалорійних

газів (сланцевий, коксовий, генераторний та ін.), спалювання природного і скрапленого газу.

Застосування подових (щілинних) пальників в опалювальних котлах недостатньо ефективно, оскільки низька ефективність процесів змішування газу і повітря зумовлюють підвищення коефіцієнта надлишку повітря, при цьому збільшується довжина факела, що при зіткненні полум'я з теплообмінними поверхнями призводить до зростання хімічної неповноти спалювання газу.

Отже, збільшення споживання газу та теплової потужності котла обмежена технологічними та екологічними режимами спалювання палива.

Однак подові пальники широко застосовуються, тому в цій роботі проведено дослідження спалювання вугільного метану в пальниках такої конструкції.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою цієї роботи є комп'ютерне моделювання та перевірка ефективності спалювання шахтного метану в опалювальних котлах із застосуванням подових (щілинних) пальників.

Для досягнення сформульованої мети необхідно виконати моделювання утворення монооксиду вуглецю, тестові розрахунки середньомасових параметрів газу на виході з вогневої щілини з використанням сіток, а також провести аналіз стаціонарних полів усереднених характеристик течії – швидкості, температури, концентрацій компонентів, оксиду азоту та швидкості утворення оксиду азоту.

**Основна частина дослідження.** Склад шахтного газу такий (%):  $\text{CH}_4$  – 38,6;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 1,32;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,25;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,07;  $\text{C}_5$  < 0,008;  $\text{CO}$  – 0,0001;  $\text{H}_2$  – 0,008;  $\text{CO}_2$  – 0,08;  $\text{N}_2$  – 47,1;  $\text{O}_2$  – 13,4;  $\text{Ar}$  – 0,86.

Теплота згоряння шахтного газу становить близько 13 МДж/м<sup>3</sup>.

Подовий пальник складається з двох елементів: сталева безшовна труба

(колектор) з просвердленими в ній отворами для виходу паливного газу і вогневої частини. Остання являє собою щілину, викладену з вогнетривкої цегли і розташовану над трубою пальника. Отвори

розташовуються на трубі у два ряди в шаховому порядку. Загальну інформацію щодо вихідних даних для розрахунку подано в табл. 1.

Таблиця 1

Конструктивні параметри пальника та показники спалюваного газу

Параметр	Серійний пальник	Модифікований пальник
Зовнішній діаметр труби $d_n$ , мм	40	57
Діаметр отворів паливного газу $d_o$ , мм	1,9	2,1
Напівкрок між отворами $\delta$ , мм	8	8
Ширина вогневої щілини $a$ , мм	86	108
Висота вогневої щілини $h_{щ}$ , мм	266	266
Температура повітря у вузькому перерізі щілини, К	273	273
Швидкість повітря у вузькому перерізі щілини, м/с	2,44	2,44
Температура паливного газу на виході з отворів, К	273	273
Швидкість паливного газу на виході з отворів, м/с	27	27
Склад паливного газу, % (об):		
метан	100,0	38,6
кисень	-	13,4
азот	-	48,0

Виходячи з припущення про те, що горіння контролюється змішуванням, а не кінетикою, для моделювання турбулентного горіння використана модель дроблення турбулентних вихорів Магнуссен і Хертагера [7].

Моделювання утворення монооксиду вуглецю засновано на використанні двустадійної реакції окиснення метану. Для знаходження масової частки оксидів азоту система рівнянь доповнюється рівнянням перенесення для NO, що утворюються з термічного механізму [8]. Автором роботи [9] було доведено, що утворення оксидів азоту не пов'язано безпосередньо з реакцією горіння, а йде через дисоціацію молекулярного кисню при температурі вище 1800 К. Механізм утворення NO складається з елементарних реакцій [10].

Вводиться припущення про те, що утворення NO не впливає ні на гідродинамічну структуру течії, ні на температуру газу в пальниковому пристрої.

Теплова потужність пальників (серійної і модифікованої) однакова, тобто витрати вугільного метану збільшено у 2,7-2,8 рази порівняно з витратами природного газу. Подовий пальник складається з двох елементів: сталевий безшовної труби (колектора) з просвердленими в ній отворами для виходу паливного газу і вогневої частини. Остання являє собою щілину, викладену з вогнетривкої цегли, і розташовується над трубою пальника. Отвори розташовуються на трубі у два ряди в шаховому порядку. Розрахункові схеми подового пальника і щілинного каналу подано на рис. 1.

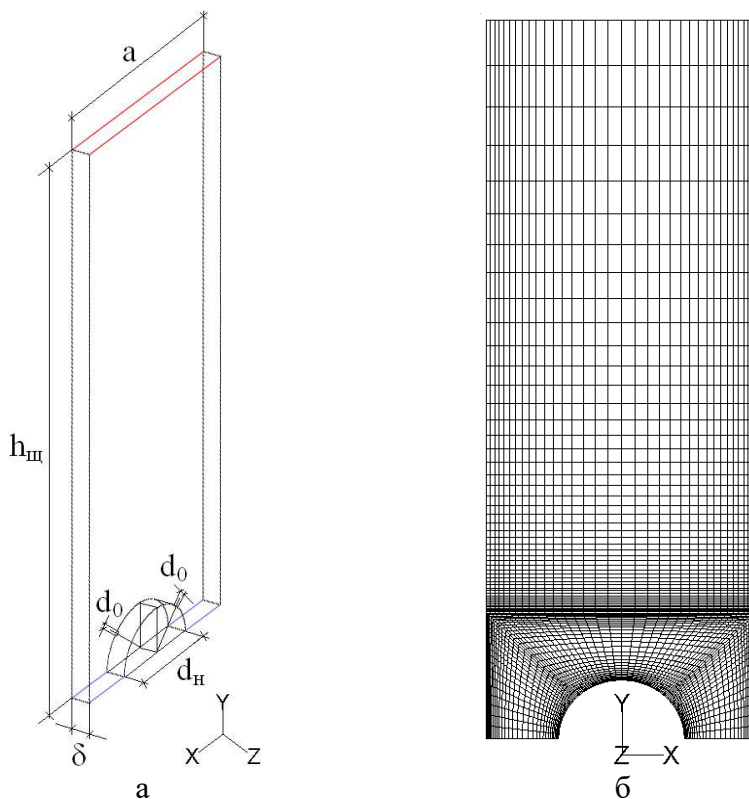


Рис. 1. Розрахункові схеми (а) подового пальника і (б) щілинного каналу

Пальник має такі характерні розміри:

- зовнішній діаметр труби  $d_n$ ;
- діаметр отворів для виходу паливного газу  $d_0$ ;
- напівкрок між отворами  $\delta$ ;
- ширина вогневої щілини  $a$ ;
- висота вогневої щілини.

Виконано тестові розрахунки з використанням сіток з різною кількістю осередків. Встановлено, що сітка (близько  $10^6$  контрольних обсягів) забезпечує прийнятну низьку чутливість результатів до подальшого подрібнення сітки.

Пальник має такі розміри: зовнішній діаметр труби  $d_n = 57$  мм; діаметр отворів для виходу паливного газу  $d_0 = 2,1$  мм; напівкрок між отворами  $\delta = 8$  мм; ширина вогневої щілини  $a = 108$  мм; висота вогневої щілини  $h_{щ} = 266$  мм. Температура повітря у вузькому перерізі щілини дорівнює 273 К. Швидкість повітря у

вузькому перерізі щілини становить 2,44 м/с. Температура паливного газу на виході з отворів дорівнює 273 К. Швидкість паливного газу на виході з отворів становить 27 м/с.

Паливний газ має такий склад (за об'ємом):

варіант 1: метан  $CH_4$  – 100 %;

варіант 2: метан  $CH_4$  – 38,6 %; кисень  $O_2$  – 13,4 %; азот – 48,0 %.

Результати обчислювального експерименту наведено в табл. 2. Результати показують, що значення швидкості і температур у модифікованому пальнику значно нижче (9,41 і 5,34 м/с відповідно, 1803 і 1033 К відповідно). При цьому забезпечується повне спалювання вугільного метану ( $CH_4$  і  $CO$  у продуктах згорання практично відсутні). Низькі швидкості і температура згорання забезпечують також факел малої довжини.

Таблиця 2

Середньомасові параметри газу на виході з вогневої щілини

Параметр	Варіант 1	Варіант 2
Швидкість, м/с	9,41	5,34
Температура, К	1803	1033
Масова частка $\text{CH}_4$	0,0047	$2,8 \cdot 10^{-07}$
Масова частка $\text{O}_2$	0,0622	0,1604
Масова частка $\text{CO}$	0,0055	$4,1 \cdot 10^{-06}$
Масова частка $\text{CO}_2$	0,1029	0,0467
Масова частка $\text{H}_2\text{O}$	0,0914	0,0383
Масова частка $\text{N}_2$	0,7332	0,7546
Масова частка $\text{NO}$	$7,6 \cdot 10^{-06}$	$9,4 \cdot 10^{-07}$
Швидкість утворення $\text{NO}$ , кмоль/ $(\text{м}^3 \cdot \text{С})$	0,0066	$8,9 \cdot 10^{-07}$
Щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,1945	0,3466
Удавана молекулярна маса	28,4598	28,4562

Екологічні параметри, що характеризуються вмістом оксидів азоту і вуглецю в продуктах згорання, мають значення значно нижче в модифікованому пальному. Так, масова частка  $\text{NO}$  становить  $8,9 \cdot 10^{-07}$ ,  $\text{CO}$  –  $4,1 \cdot 10^{-06}$ . У роботі аналізуються стаціонарні поля усереднених характеристик течії – швидкості,

температури, концентрацій компонентів, оксиду азоту та швидкості утворення оксиду азоту. Швидкість газу (вугільного метану) на виході з отворів подового пальнока становить 25-27 м/с. Результати розрахунку наведено на рис. 2, 3.

Температура в ядрі факела досягає значень 2060-2160 К (рис. 3).

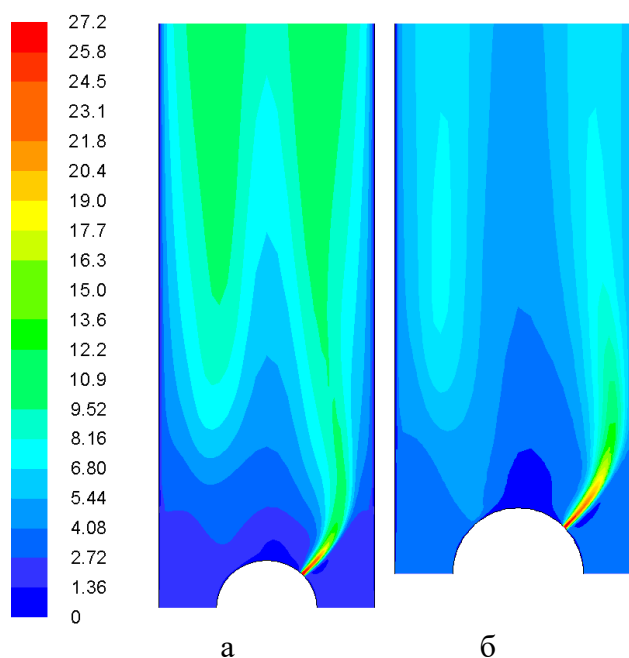


Рис. 2. Абсолютна швидкість газу (м/с) у площині  $xO_y$ , що проходить через центр отвору для виходу паливного газу: а – варіант 1; б – варіант 2

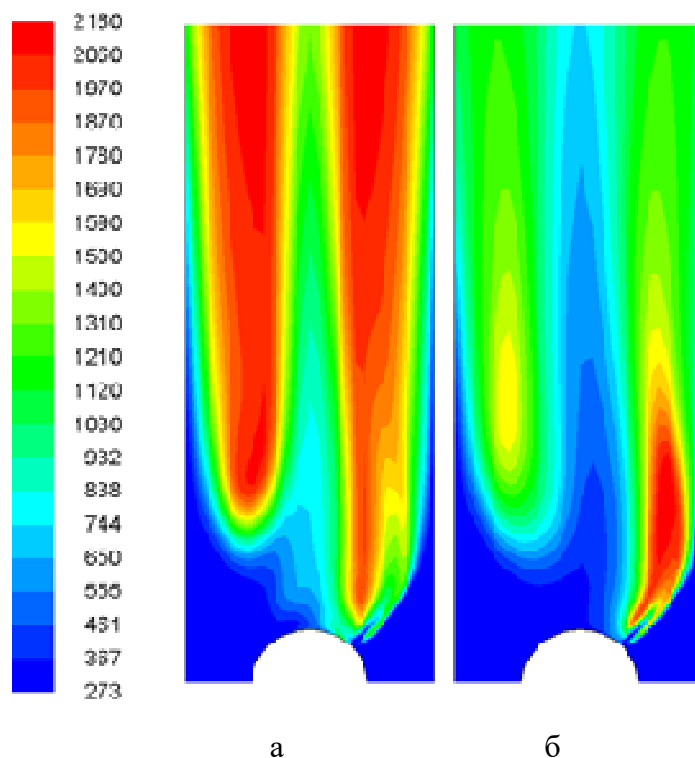


Рис. 3. Температура газу (К) у площині  $xO_y$ , що проходить через центр отвору для паливного газу: а – варіант 1; б – варіант 2

У структурі полум'я виділяється кілька зон: підготовча, зона горіння і зона продуктів згорання [6]. У дифузійному полум'ї горюча суміш утворюється в зоні горіння за рахунок дифузії горючого газу з підготовленою зоною і повітря – з навколишнього середовища. Якщо в складі газоповітряної суміші достатньо кисню, то вуглець, що утворюється при термічному розкладанні в підготовчій зоні, встигає попередньо окиснюватися до монооксиду вуглецю (CO), що згорає в зоні горіння з утворенням діоксиду вуглецю ( $CO_2$ ). Газ горить безбарвним або блакитним полум'ям.

Структура полум'я відповідає ламінарному дифузійному полум'ю і

визначається швидкістю витікання газу з отворів подового пальника і швидкістю руху газоповітряної суміші в обмеженому обсязі щілинного каналу. Зона горіння дифузійного полум'я являє собою тонкий шар (2), визначуваний швидкістю молекулярної дифузії кисню з підготовчої зони до фронту горіння. Швидкість дифузії визначається різницею парціальних тисків і температур у зонах. На рис. 4 показана зміна концентрації діоксиду вуглецю. Як видно, концентрація  $CO_2$  змінюється від мінімальних значень на периферії зони горіння до максимальних на осі факела. Концентрація кисню змінюється до мінімальних значень у ядрі факела.

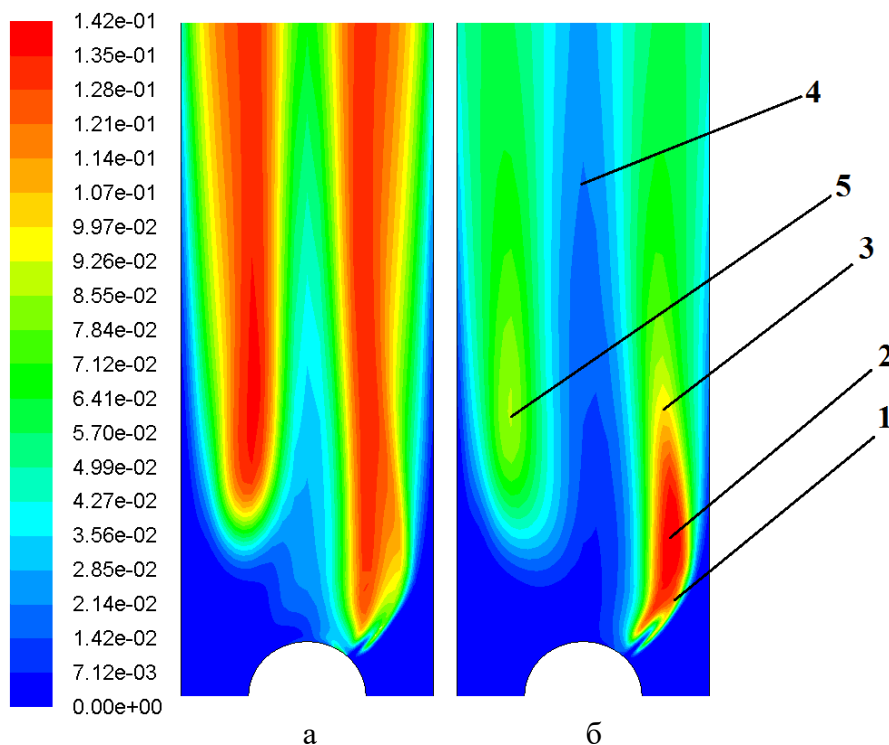


Рис. 4. Масова частка  $\text{CO}_2$  у площині  $xOy$ , що проходить через центр отвору для паливного газу: а – варіант 1; б – варіант 2

Існування зони рециркуляції (5) (поворотні течії) дає можливість різко збільшити час перебування газоповітряної суміші в обмеженому просторі поблизу пальника. Тим самим поліпшуються умови для змішування реагентів і стабілізації факела.

1. Рециркуляційна зона поблизу пальника, у якій температура факела максимальна.

2. Високотемпературний «купол» (зона 3), що накриває рециркуляційну зону; велика частина променевої енергії випромінюється в цій зоні.

3. Зона змішування горючого і повітря, що оточує зони 1, характеризується зниженим вмістом продуктів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) і підвищеним вмістом реагентів.

4. Далекий слід (затоплений струмінь) продуктів згорання.

5. Точка утворення зворотних течій (точка 4).

**Висновки.** При температурах вище 1700-1800 К велика частина оксидів азоту утворюється з «теплого» механізму. Максимальна концентрація  $\text{NO}_x$  досягається в зоні з максимальною температурою і середня масова концентрація на виході з пальника становить близько  $15\text{-}20 \text{ мг/м}^3$  (варіант 1) і  $1,8\text{-}2 \text{ мг/м}^3$  (варіант 2). Можливість використання шахтного метану як місцевого палива дозволяє зменшити використання твердого палива або природного газу як основного виду палива. Запропонована у статті методика експериментального дослідження процесів спалювання низькокалорійного газового палива створює умови для подальшого вивчення процесів теплообміну в топці котла. Це дозволить підвищувати показники ефективності спалювання метану та більш якісно контролювати обсяги шкідливих викидів з топки.



Список використаних джерел

1. Махорін К. Е., Хінкіс П. А. Спалювання палива в псевдозрідженому шарі. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.
2. Кучин Г. П., Скрипко В. Л., Урда Н. Н. Спалювання низькотемпературних палив у псевдозрідженому шарі. Київ: Техніка, 1987. 144 с.
3. Stolboushkina A. Yu., Ivanova A. I., Fominab O. A. Use of Coal-Mining and Processing Wastes in Production of Bricks and Fuel for Their Burning. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1496-1502. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.089>.
4. Joana Ribeiroa, IsabelSuárez-Ruib, Colin R.Wardc, Deolinda Floresa. Petrography and mineralogy of self-burning coal wastes from anthracite mining in the El Bierzo Coalfield (NW Spain). *International Journal of Coal Geology*. 15 January 2016. Vol. 154–155. P. 92-106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.011>.
5. Pivnenko Y., Burda Y., Redko I., Cherednik A., Alferov S. Optimization of geometrical parameters of fire wood fluidized bed burner. *Problems of the Regional Energeticsthis link is disabled*. 2021. Vol. 2. P. 49-59.
6. Qin Yan and other. Hourly emission estimation of black carbon and brown carbon absorption from domestic coal burning in China. *Science of The Total Environment*. 25 March 2022. Vol. 814. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151950>.
7. Бородуля В. А., Виноградов Л. М. Сжигание твердого топлива в псевдоожигенном. Минск: Наука и техника, 1980. 192 с.
8. Ісьємін Р. Л. Котел, що працює на низькотемпературному твердому паливі. *Житлове та комунальне господарство*. 2005. № 3. С. 36-37.
9. Пузырев Э. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дисс. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2003. 120 с.

---

Редько Ігор Олександрович, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. E-mail: [ihor.redko1972@gmail.com](mailto:ihor.redko1972@gmail.com).

Бурда Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів, Харківський Національний університет будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: [burda.yurii@kstuca.kharkov.ua](mailto:burda.yurii@kstuca.kharkov.ua).

Півненко Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів, Харківський Національний університет будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: [yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua](mailto:yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua).

Біловол Ганна Володимирівна, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6168-5216. E-mail: [annabel731@gmail.com](mailto:annabel731@gmail.com).

Москальов Євгеній Олександрович, магістрант, група 215-ЕМ-Д21, Український державний університет залізничного транспорту.

Бойко Вадим Іванович, магістрант, група 215-ЕМ-Д21, Український державний університет залізничного транспорту.

Redko Ihor, Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. Email: [ihor.redko1972@gmail.com](mailto:ihor.redko1972@gmail.com).

Burda Yurii, Assistant of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: [burda.yurii@kstuca.kharkov.ua](mailto:burda.yurii@kstuca.kharkov.ua).

Pivnenko Yurii, Assistant of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: [yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua](mailto:yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua).

Bilovol Hanna, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0001-6168-5216. Email: annabel731@gmail.com.  
Moskalyov Yevgeny, master, Group 215-ЕМ-Д21, Ukrainian State University of Railway Transport.  
Boyko Vadym, master, Group 215-ЕМ-Д21, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 17.10.2022 р.