

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 581.9:504.54

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ БУРОГО ВУГІЛЛЯ У ВИХРОВІЙ
ТОПЦІ ШЛЯХОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Д-р техн. наук І. О. Редько, асистенти Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко,
асп. Р. Л. Джиоєв

RESEARCH OF BROWN COAL BURNING PROCESSES IN THE VORTEX FIREPLACE
BY COMPUTER MODELING

Dr. Sc. (Tech.) I. Redko, assistant Y. Burda, assistant Y. Pivnenko,
postgraduate student R. L. Dzhyoiev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262683>

Анотація. Використання в паливному балансі України дорогого імпортованого природного газу стимулює розвиток промислової та малої енергетики на основі дешевих місцевих палив і горючих відходів. Використання дешевого вугілля, торфу, деревних відходів дозволяє знизити собівартість вироблення теплоти на підприємствах житлово-комунального господарства, промислових підприємствах. Наведено результати спалювання бурого вугілля у вихровій топці (ТЗЗП) для різних теплових схем і режимів спалювання.

Ключові слова: буре вугілля, комп'ютерне моделювання, технології спалювання, вихрова топка.

Abstract. As part of the course for European integration in Ukraine, a new Energy Strategy was approved to reduce the share of coal among primary sources to 12.5 % by 2035, the share of electricity generation at TPPs and CHPs to 3 2%. In 2021, Ukraine joined the EU's Green Deal strategy with a commitment to completely stop coal production and close coal energy and close coal energy by 2050.

At the same time, coal energy has advantages - significant reserves of domestic coal (first in Europe and eighth in the world), which make it a guarantor of energy independence.

Given the growing share of "green" generation in Ukraine, the share of pulverized coal production should be kept at least 30% of total energy production

The use of expensive imported natural gas in Ukraine's fuel balance stimulates the development of industrial and small energy based on cheap local fuels and combustible waste. The use of cheap coal, peat, wood waste can reduce the cost of heat production in housing and communal services, industrial enterprises.

Combustion of low-grade fuels is constrained due to the complexity of organizing a sustainable combustion process.

Local fuels are characterized by high humidity and ash content, low heat of combustion. The zone of autogenous (self-sustaining) combustion is defined by the limits: combustible - more than 25 %, moisture - less than 50 %, ash - less than 60% by working weight.

Vegetation and wood are the starting point for the stages of metamorphism (carbonization): plant residues, peat, brown coal, coal, anthracite.

Characteristics of humolites, the organic part of the fuel, by stages of metamorphism. Fuels of different types and different degrees of carbonization - peat, lignite is peroxidized and contain a lot of oxygen in the combustible mass, have the lowest thermal stability and the highest yield of volatile substances.

In the process of metamorphism, oxygen is removed and the thermal stability of the organic matter of the fuel is increased.

Keywords: lignite, computer simulation, combustion technology.

Вступ. У рамках курсу на євроінтеграцію в Україні затверджена нова Енергетична стратегія з метою зниження до 2035 року частки вугілля серед первинних джерел до 12,5 %, частки вироблення електроенергії на ТЕС та ТЕЦ – до 32 %. У 2021 році Україна приєдналась до стратегії Євросоюзу «Green Deal» із зобов'язанням повного припинення видобутку вугілля та закриття вугільної енергетики до 2050 року.

При цьому вугільна енергетика має переваги – значні запаси вітчизняного вугілля (перше місце в Європі та восьме у світі), що роблять його гарантом енергетичної незалежності.

В умовах зростання «зеленої» генерації в Україні частку вироблення пилувугільних ТЕС слід утримувати на рівні не менше 30 % загального вироблення енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання в паливному балансі України дорогого імпортованого природного газу стимулює розвиток промислової та малої енергетики на основі дешевих місцевих палив і горючих відходів. Використання дешевого вугілля, торфу, деревних відходів дозволяє знизити

собівартість вироблення теплоти на підприємствах житлово-комунального господарства, промислових підприємствах [1].

Спалювання низькосортних палив стримується через складність організації сталого топкового процесу.

Місцеві палива характеризуються високою вологістю і зольністю, низькою теплою згорання. Зона автогенного (самопідтримуваного) горіння визначена межами: горючих – понад 25 %, вологи – менше 50 %, золи – менше 60 % за робочою масою.

Рослинність і деревина є вихідною позицією за стадіями метаморфізму (вуглефікації): рослинні залишки, торф, буре вугілля, кам'яне вугілля, антрацит [2-3].

Характеристики гумолитів, органічної частини палива за стадіями метаморфізму наведено в табл. 1. Палива різних типу і ступеня вуглефікації – торф, буре вугілля - переокиснені і містять у горючій масі багато кисню, мають найменшу термічну стійкість і найбільший вихід летких речовин [4].

У процесі метаморфізму видаляється кисень і підвищується термічна стійкість органічної речовини палива (табл. 1).

Таблиця 1

Зміна складу палива за стадіями вуглефікації

Паливо	Склад органічної маси, %				Температура початку поділу, °С	Вихід летких, %
	С	Н	О	N	t_0 , °С	V_{daf} , %
Торф	60-65	5-6	33-38	0,5-1,5	160	70
Буре вугілля	64-77	5-6	15-25	0,5-1,5	230-260	35-50
Кам'яне вугілля	75-90	5-6	4-15	0,5-1,5	300-340	12-45
Антрацит	94-97	1-2	2-4	0,5-1,5	230	4-7

Енергетичний потенціал біомаси становить 23 млн т н. е./р. (дані 2018 рік), у тому числі деревна біомаса становить 3,08 млн т н. е./р.

Оцінка запасів та енергетичного потенціалу бурого вугілля та торфу в Україні. В Україні є великі запаси бурого вугілля. Україна посідає сьоме місце серед

світових родовищ бурого вугілля (після США, Росії, Китаю, Індії, Німеччини, Казахстану) і перше місце в Європі [5].

Родовища бурого вугілля зосереджені в Донецькому, Львівсько-Волинському та Дніпровському вугільних басейнах. Карта родовищ наведено на рис. 1.



Рис. 1. Карта вугільних басейнів України

В Україні є 77 родовищ бурого вугілля (з них 42 у Кіровоградській області та 21 у Дніпропетровській області) із запасами понад 2904,3 млн т, з яких 0,5 млрд т придатні для відкритої розробки. Потужність вугільних пластів досягає 25 м, середня – 3-4 м. Глибина залягання вугілля – від 5 до 160 м. За ступенем метаморфізму вугілля належить до групи Б1 (м'яке буре вугілля). Вологість вугілля 55-60 %, зольність – 15-25 %, вміст сірки – 2,3-3 %. Найнижча теплота згорання вугілля – менше 25 МДж/кг.

Обсяг видобутку вугілля у Львівсько-Волинському басейні становить близько 14 млн т/р. [6].

У Дніпровському вугільному басейні (що включає Житомирську, Вінницьку, Черкаську, Кіровоградську, Дніпропетровську та Запорізьку області) зосереджено понад 200 родовищ, розробка яких ведеться

відкритим способом. Основними центрами видобутку бурого вугілля є міста Ватутіне (Черкаська область) та Олександрія (Кіровоградська область). Останніми роками значні запаси бурого вугілля (більше 400 млн т) виявлено за межами Українського щита – на території Харківської області [7-9].

Родовища бурого вугілля в північно-західній частині Донецького вугільного басейну (Харківська область): Бантишевське, Ново-Дмитрівське, Берекське, Степківське, Лозовеньківське, Біляївське, Миронівське.

Запаси бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища становлять 1,2 млрд т при Квск. менше 2 м³/т. Розглядається питання розробки Ново-Дмитрівського родовища бурого вугілля в Барвінківському районі Харківської області [10-12].

Видобуток бурого вугілля ведеться на родовищі бурого вугілля – Мокрокалигорське (Черкаська область), планова продуктивність якого становить 300-600 тис. т/р. Буре вугілля містить 65-70 % вуглецю; зольність – до 12 %; вихід летких – 31,3 %; калорійність – 5539 ккал/кг (23263,8 кДж/кг).

Відповідно до стандартів України ДСТУ 3472-96 до бурого вугілля належить вугілля з $R_o < 0,40$ %, $V^{daf} = 50 - 70$ % та $Q_p^r < 24$ МДж/кг.

На Олександрійському родовищі видобували близько 10 млн т бурого вугілля. У 1976 році видобули 11722 тис. т, 4079,7 тис. т паливного буровугільного брикету [13-15].

У західних областях України видобуток бурого вугілля становив: Закарпаття – 400 тис. т, Львівська область – 454 тис. т, Івано-Франківська область – 68 тис. т.

Потенціал видобутку вугілля підприємствами буровугільного комплексу на період до 2047 року. Видобуток бурого вугілля дозволяє збільшити видобуток

вуглеводнів на понад 5 млн т нафтового еквівалента на рік. При цьому економія при заміні газу становить близько 995 млн дол./р.

Найперспективнішими є запаси для відкритого видобутку на територіях Кіровоградської, Дніпропетровської, Харківської та Полтавської областей. Найбільш перспективними є

Олександрійський буровугільний район і Ново-Дмитрівське бурокутне родовище Харківської області. Потенціал видобутку бурого вугілля показує, що бюджетна ефективність може становити близько 250 млн дол./р.

Поряд із бурим вугіллям Україна має значні запаси торфу.

Заторфованість Рівненської та Волинської областей сягає 6,5 %, Тернопільської, Полтавської, Сумської, Харківської не перевищує 2 % усієї території [16-18].

За даними Держкомгеології, на території України розвідано 3118 торф'яних родовищ із геологічними запасами близько 2,2 млрд т. Загальна площа родовищ близько 3 млн га (табл. 2).

Таблиця 2

Енергетичний потенціал торфу в областях України

Область	Енергетичний потенціал, млн МВт·год
Вінницька	136,4
Волинська	1370,1
Дніпропетровська	0,25
Житомирська	290,5
Івано-Франківська	452
Київська	716,5
Львівська	690,6
Миколаївська	126
Полтавська	364,3
Рівненська	1176,2
Сумська	331,2
Тернопільська	304,3
Харківська	15,7
Хмельницька	236
Черкаська	192
Чернігівська	818,5

В Україні обсяг розвіданих родовищ торфу становить близько 1160 млн т. Найбільші родовища зосереджені в Рівненській області (330 родовищ), Волинській (226 родовищ), Чернігівській

(198 родовищ), Житомирській (187 родовищ) [19-20].

Торф'яне родовище Закльовщина (Заріченський район Рівненської області [21]) має потужність покладу 1,2 м і середню зольність торфу 16 % (табл. 3).

Таблиця 3

Обсяги видобутку торфу (2010)

Підприємства	Обсяг видобутку, т
Волинь торф	192000
Житомир торф	17700
Київ торф	37500
Поділля торф	1200
Рівне торф	166600
Чернігів торф	44270

Торф'яні родовища: Збищене і Стобихівське (Камінь-Кширський район Рівненської області); Вілія, Каровиця, Стеризівка (Рокитнівський район Рівненської області); Бабій Мох (Дубровський район Рівненської області) [22].

За даними роботи [23], у Харківській області розвідано шість родовищ торфу. Потужність торфу коливається від 1,1 до 1,89 м, зольність від 30,5 до 41,0 %. Загальні запаси шести торфу складає 952,7 тис. т.

В Україні працювало 37 торфобрикетних заводів (1991 рік), у 2010 році їх залишилося шість.

Брикетти – найбільш збагачений вид торф'яного палива. Висока природна вологість торфу (75-80 %) знижується до 40-50 % під час польового сушіння на технологічних майданчиках видобутку і до 14-18 % у процесі штучного сушіння на брикетних заводах [24]. Найнижча теплота згорання торфобрикетів становить 16-

17 МДж/кг, зольність – менше 15 %, насипна щільність – близько 700 кг/м³.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є комп'ютерний аналіз і перевірка ефективності спалювання бурого вугілля у вихровій топці (ТЗЗП) для різних теплових схем і режимів спалювання.

Для досягнення сформульованої мети необхідно виконати аналіз дисперсного складу бурого вугілля, провести аналіз структури та режимів аеродинамічних процесів і визначити конструктивні параметри й показники якості дослідженого ТЗЗП.

Основна частина дослідження. Дисперсний склад бурого вугілля подано на рис. 2 гістограмою розподілу масових частинок вугілля за їхніми розмірами та зерною характеристикою (рис. 2-3). Пил характеризується такими залишками на ситах: R90 = 17 %, R200 = 2,5 % і є пилом тонкого помелу.

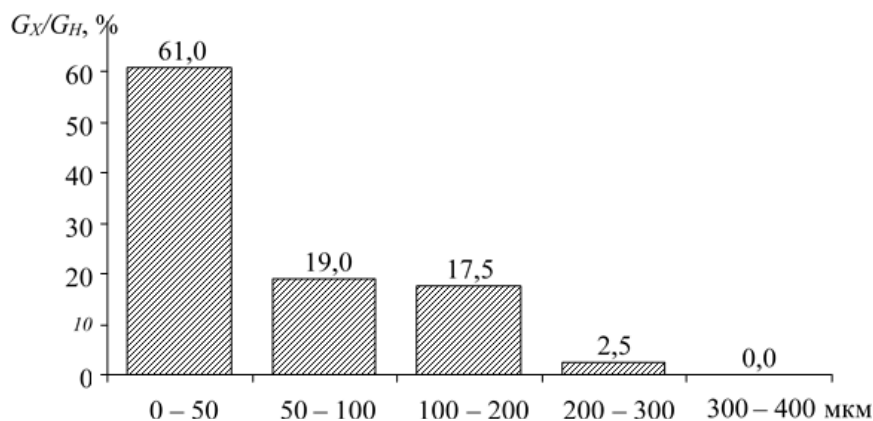


Рис. 2. Розподіл масових частинок вугілля за їхніми розмірами

1. Склад бурого вугілля:

Технічний склад (на робочу масу):

$A^p = 20 \%$, $W^p = 30 \%$, $V^p = 25 \%$ (варіант 1): $A^p = 35 \%$, $W^p = 30 \%$, $V^p = 30 \%$ (варіант 2 – limit).

$A_p = 20 \%$;

$W_p = 30 \%$;

$V_p = 25 \%$.

Елементарний склад (на горючу масу):

$C_r = 70 \%$;

$H_r = 5 \%$;

$O_r = 22,5 \%$;

$N_r = 1 \%$;

$S_r = 1,5 \%$.

2. Фізичні властивості бурого вугілля:

густина 1250 кг/м^3 ;

питома теплоємність $1190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;

вища теплота згорання (на робочу масу) $13,9 \text{ МДж/кг}$;

стехіометричний коефіцієнт $4,3 \text{ кг повітря/кг палива}$;

температура виходу летких $160 \text{ }^\circ\text{C}$.

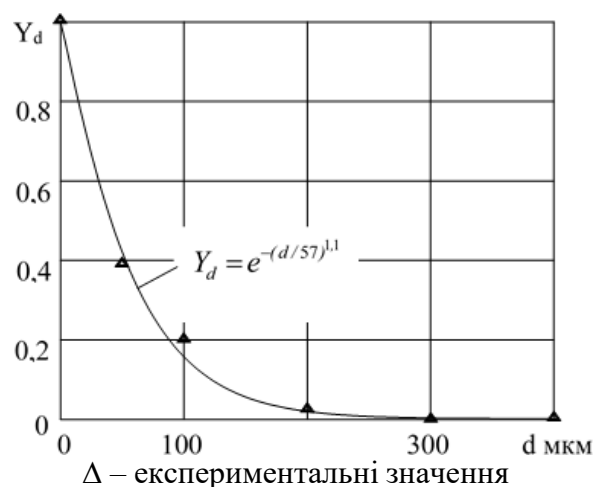


Рис. 3. Інтегральні зернові характеристики вугільного пилу

Аналіз результатів розрахунків, наведених у табл. 1, показує таке: на вході в топку при згоранні торфу температура топкових газів досягає значення 1952 °С, мінімальна частка кисню становить 0,5 %. При змішуванні з вторинним повітрям температура в об'ємі топки знижується до 1300-1450 °С, і при цьому масова доля кисню становить 5,2 % на виході з топки. При русі газів у димовій трубі 0 вони нагріваються і на виході з топки температура становить 1711 °С. Температура золи, що видаляється вздовж стінки топки, становить 1380 °С. Випаровування вологи та вихід летких, їх згорання призводить до того, що максимальна абсолютна швидкість газів досягає 372 м/с у верхній частині топки і знижується до значень 150-170 м/с у середній зоні топки, у зоні факела. Вторинне повітря подається з високою швидкістю, що забезпечує рівномірне заповнення факела в обсязі топки, а отже, при цьому зростає час перебування коксових частин у топці [25].

Аналіз траєкторій руху частинок показує, що частинки діаметром 25 мкм потрапляють у висхідний потік топкових газів і виносяться з топки, а частинки діаметром 250 мкм осідають у нижній частині топки. Леткі вигорають із частинок діаметром 25 і 250 мкм. Кокс (порошковий нелеткий залишок – вуглець і мінеральна частина) вигорає з частинок діаметром 25 мкм. Залежно від діаметра частинок кокс вигорає по-різному: кокс із частинок з початковим діаметром до 200 мкм вигорає повністю; кокс із частинок початковим діаметром 250 мкм у складі дрібнодисперсного пилу від 25 до 250 мкм вигорає на 96 %; кокс із частинок з початковими діаметрами 100, 325 і 550 мкм у складі грубодисперсного пилу від 100 до 1000 мкм вигорає на 79, 35 і 5 % відповідно; кокс із частинок із початковими діаметрами більше 775 мкм у складі грубодисперсного пилу від 100 до 1000 мкм практично не вигорає [26].

На траєкторію руху частинок у топці впливають вихід вологи і летких частинок

палива. Волога видаляється на вході в топку у верхній частині, концентрація дрібних частинок висока в нижній зоні топки, а великі частинки концентруються у верхній зоні топки. Леткі виділяються з дрібних частинок (25 мкм) на вході в топку, і концентрація їх збільшується в нижній зоні топки, а великі частинки концентруються у верхній зоні топки, тому що вихід летких з них більш повільний [27].

Отже, волога виділяється з частинок на вході в топку у верхній зоні та видаляється з топковими газами (близько 52 %). Зола дрібних частинок видаляється з топки разом із топковими газами, а зола великих частинок уловлюється і видаляється в бункер у нижній зоні топки (44,3–47,6 %) [28, 29]. Леткі згорають повністю (100 %), а тверді частинки мають механічний недопал (до 0,06 %), винос золи 52 % масштабування топки шляхом збільшення її геометричних розмірів в 1,83 раза та номінальної теплової потужності втричі (варіант 2) призводять до зниження кінцевої температури золи до 1000 °С і зниження механічного недопалу; зниження теплового навантаження до 50 та 15 % (варіанти 3, 4) призводять:

- 1) до зниження температури газу на виході на 1,6 і 9 % відповідно;
- 2) зниження кінцевої температури золи до 1330 і 1280 °С відповідно;
- 3) зниження виносу золи до 56 і до 80 % відповідно.

Висновки. Охолодження корпусу топки (варіант 5) ($t_{ст} = 120$ °С) призводить до зниження температури газів до 704 °С, ступінь вигорання коксу з частинок, що виносяться, становить 61,8 %, з частинок, що вловлюються, – 28,6 %.

Аеродинамічна структура топкової сфери визначається швидкістю руху газів. На вході в топку абсолютна швидкість паливно-повітряної суміші становить 100-110 м/с. Вища швидкість газів (до 150-170 м/с) за перетином топки спостерігається поблизу стін топки. На осі топки утворюється зона з низькою швидкістю

руху газів (до 20-30 м/с). На виході з топки швидкість газів становить близько 200 м/с. Як видно, аеродинамічна структура визначається траєкторією руху частини палива. Маса дисперсного матеріалу (частини палива) обертається по висоті топки та рухається до вихідного патрубку. Концентрація частини змінюється за висотою топки, при цьому збільшується у верхній частині через подачу зустрічного потоку вторинного повітря. Це обмежує висоту топки та дозволяє зменшити її об'єм. Аналіз структури та режимів аеродинамічних процесів у топці вказує на те, що їх можна визначити як режими киплячого шару, що обертається (SFB). Процеси обертання частини в киплячому шарі забезпечують вищу турбулізацію та інтенсивність термохімічних процесів горіння палива.

Розподіл температури в топковому об'ємі визначається процесом горіння твердих частинок і залежить від вологості та зольності палива. Леткі палива швидко згорають у нижній зоні топки. Швидкість утворення золи висока і потребує її видалення, а швидкість виділення вологи

нижча, що обмежує процес горіння. Ці процеси визначають розподіл температури середовища в топковому об'ємі. Показано, що спостерігається ізотермічний розподіл температури по висоті топкового об'єму. При цьому об'ємне тепловиділення становить 2500 кВт/м³.

Траєкторія руху частини палива впливає на розподіл температури в об'ємі топки. Висока швидкість газів на периферії (біля стін) топки створює умови виносу частинок, і горіння відбувається у пристінковій зоні. Частинки з діаметром 25 мм рухаються вгору в топці. Ступінь вигорання становить 100 %. Більші частинки з діаметром 250 мм знаходяться в топці більше 2 с, згорають і видаляються з топки. Для їх повного вигорання можливе їх повернення в режим циркуляції.

Основна проблема, що виникає в процесі спалювання вугілля при нижній подачі палива, – це тривале витання частинок золи у верхній зоні топки, збільшення їхньої концентрації, складність видалення та порушення процесу горіння (табл. 4).

Таблиця 4

Конструктивні параметри й показники якості дослідженого ТЗЗП

Параметр, одиниця вимірювання	Варіант печі					
	1	2	3	4	4a	4a-limit
1	2	3	4	5	6	7
D_a , мм	600	600	600	600	600	600
H , мм	3645	3645	3645	3645	3645	3645
$G_{\text{пал}}$, кг/с	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,2575
W_n , МВт	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,5
$G_{\text{пов.1}}$, кг/с	1,26	1,26	1,26	1,325	1,325	1,325
$t_{\text{пов.1}}$, °C	377	377	377	377	377	377
$G_{\text{пов.2}}$, кг/с	0,315	0,315	0,315	0,25	0,25	0,25
$t_{\text{пов.2}}$, °C	377	377	377	377	377	377
$G_{\text{пов.}\Sigma}$, кг/с	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
$\bar{Q}_{\text{пов.1}}$, %	80	80	80	84	84	84
$\bar{Q}_{\text{пов.2}}$, %	20	20	20	16	16	16
α_1	1,58	1,58	1,58	1,67	1,67	1,66
α_Σ	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,97

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
$d_{ч.мин}$, МКМ	25	25	25	25	25	25
$d_{ч.макс}$, МКМ	250	250	250	250	250	250
\bar{d} , МКМ	57	57	57	57	57	57
n	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
$t_{г.вих}$ °С	1888	1801	1908	1919	1870	1966
$g_{O_2.вих.сер}$, %	3,4	3,2	3,2	3,2	3,8	1,1
Ступінь вигорання легких, %	100	100	100	100	100	100
Ступінь вигорання коксу з частинок, що виносяться, %	-	100	100	100	100	-
Ступінь вигорання коксу з частинок, що вловлюються, %	93,9	81,4	100	92,5	83,8	34,4
Ступінь вигорання коксу з частинок, що витають (накопичуються всередині ТЗЗП), %	-	100	100	100	100	100
Недопал механічний частинок, що виносяться, % (горючої маси)	-	0	0	0	0	-
Недопал механічний частинок, що вловлюються, % (горючої маси)	3,04	9,3	0	3,7	8,1	9,4
Недопал механічний частинок, що витають (накопичуються всередині ТЗЗП), % (горючої маси)	-	0	0	0	0	0
Уловлювання частинок, %	100	0,6	0,4	0,8	99,4	99,6
Винос частинок, %	0	19,4	19,6	19,2	0,4	0
Витання (накопичення всередині ТЗЗП) частинок, %	0	80	80	80	0,2	0,4

Список використаних джерел

1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні. Київ: Видав. Центр НУБіП України, 2011. 28 с.
2. Гелетуха Г. Г. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива: дис. ... д-ра техн. наук. Київ: ІТТФНАНУ, 2021. 332 с.
3. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов І. В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 349 с.
4. Махорін К. Е., Хінкіс П. А. Спалювання палива в псевдозрідженому шарі. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.
5. Кучин Г. П., Скрипко В. Л., Урда Н. Н. Спалювання низькотемпературних палив у псевдозрідженому шарі. Київ: Техніка, 1987. 144 с.
6. Бородуля В. А., Виноградов Л. М. Сжигание твердого топлива в псевдосжиженном слое. Минск: Наука и техника, 1980. 192 с.

7. Опыт сжигания разных видов биомассы в России и Белоруссии / Г. А. Рябов, Д. С. Литун, Е. А. Пищуха и др. *Электрические станции*. 2015. № 9. С. 9-17.
8. Карапетов А. Шаровое сжигание биотоплива. *Обзор технологий. Ленпринформ*. 2016. № 1 (115). 110 с.
9. Ісьємін Р. Л. Котел, що працює на низькотемпературному твердому паливі. *Житлове та комунальне господарство*. 2005. № 3. С. 36-37.
10. Пузырев Э. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2003. 120 с.
11. Научные основы создания высокоэффективных топочных устройств для котлов, работающих на твердом биотопливе: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2019. 110 с.
12. Особенности процессов сжигания биотоплива в котлах из КШ / Г. А. Рябов и др. *Теплоэнергетика*. 2005. № 9. С. 54–60.
13. Водогрійні котли з киплячим шаром і шаром палива, що інтенсивно продувається, для спалювання низькотемпературного вугілля та біомаси / Р. Л. Ісьємін, С. Н. Кузьмін, В. В. Коняних та ін. *Новини теплопостачання*. 2008. № 5 (93). С. 57-63.
14. Вавилов В. И. Эффективное сжигание низкосортных углей в двухъярусной топке. *Безопасность жизнедеятельности*. 2009. № 6. С. 23–27.
15. Саламатов В. В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных пароагрегатов под вихревую технологию сжигания. *Известия Томского политехнического университета*. 2014. № 4 (324). С. 25–38.
16. Redko A., Burda Yu., Dzhyoiev R., Redko I., Norchak V., Pavlovskiiy S., Redko O. Numerical Modeling of Peat Burning Processes in a Vortex Furnace with Countercurrent Swirl Flows. *Thermal science*. 2020. URL: <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>.
17. 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.
18. QinYan 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>.
19. XingruLi and other, Light absorption properties of black and brown carbon in winter over the North China Plain: Impacts of regional biomass burning Atmospheric *Environment*. 1 June 2022. Vol. 278. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119100>.
20. Glushkova D. O., Matiushenkob A. I., Nurpeiisa A. E., Zhuikov A. V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology*. 1 December 2021. Vol. 223. 106986. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.
21. Margarita A., KurgankinaGalina S., NyashinaPavel A. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals. *Applied Thermal Engineering*. 25 January 2019. Vol. 147. P. 998-1008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.133>.
22. 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>.
23. Joana Ribeiroa, IsabelSuárez-Ruizb, Colin R. Wardc, DeolindaFloresa, 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>.

24. Md. Ahasan Habibac, Rahat Khanb, Khamphe Phoungthonga, Evaluation of environmental radioactivity in soils around a coal burning power plant and a coal mining area in Barapukuria, Bangladesh: Radiological risks assessment. *Chemical Geology*. 30 June 2022. Vol. 600. 120865. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120865>.

25. Miriel J. et al. Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions. *Appl Therm Eng*. 2002. Vol. 22 (16). P. 1861-1873.

26. Fonseca N. Experimental analysis and modeling of hydronic radiant ceiling panels using transient-state analysis. *Int. J. of Refrigeration*. 2011. Vol. 34. P. 958-967.

27. Strand R. K. et al. Modeling radiant heating and cooling systems: integration with a whole-building simulation program. *Energy and Building*. 2005. Vol. 37. P. 389-397.

28. Tye-Gingras M. et al. Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine layout. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. P. 1598-1608.

29. Kasilov P.V. Radiative-type Heat-Exchanger of Space-based Power Plant *Electronic scientific and technical periodical Science and Education*. 2011. № 13. P. 10.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. E-mail: ihor.redko1972@gmail.com.

Бурда Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури.

ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: burda.yurii@kstuca.kharkov.ua.

Півненко Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури.

ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua.

Джиоєв Рафаель Леванович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури.

ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

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.

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.

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.

Dzhyoiev Rafael Levanovich, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.

ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Статтю прийнято 16.05.2022 р.