
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 621.182

СПАЛЮВАННЯ КОМПЗИТНИХ ТОРФО-ВУГІЛЬНИХ СУМІШЕЙ У ВИХРОВІЙ ТОПЦІ

Аспірант Норчак В. І.

COMBUSTION OF COMPOSITE PEAT-COAL MIXTURES IN A VORTEX FIREPLACE

Postgraduate student Norchak V. I.

Анотація. Наведено результати чисельного дослідження процесів спалювання торфу та бурого вугілля у вихровій топці потужністю 2,5 МВт. Розмір частинок палива становить від 25 до 250 мкм. Теплота згоряння торфу становить 12,3 МДж/кг, вихід летких $V^P = 38\%$, теплота згоряння бурого вугілля – 13,9 МДж/кг, вихід летких – 25-35 %, зольність палив змінювалася від $A^P=20\%$ до $A^P=35\%$. Вміст зольності та вологості $A^P+W^P>65\%$. Встановлено, що механічний недопал при вихровому спалюванні палива становить $q_4=0,06\%$. Показано можливість спалювання торфо-вугільної композитної суміші у вихровому передтопку.

Ключові слова: вихрова топка, процеси спалювання, зустрічні закручені потоки, торф, буре вугілля, композитна суміш.

Abstract. The results of the numerical study of peat and brown coal combustion processes in a vortex furnace with a power of 2.5 MW are presented. The processes in a vortex furnace with counter swirling flows with an upper supply of fuel and primary air and a supply of secondary air at the bottom of the furnace are studied. The removal of slag occurs in the bottom of the furnace. The particle size of fuel is from 25 microns to 250 microns. The calorific value of peat is 12.3 MJ/kg, the volatile content is $V_{daf}=38\%$, humidity is $W^p=40\%$, the stoichiometric coefficient is 7 kg air/kg fuel. The calorific value of brown coal is 13.9 MJ/kg, volatile content $V_{daf}=25-35\%$, humidity $W^p=30\%$, stoichiometric coefficient is 4.3 kg air/kg fuel. The ash content of the fuel varies from $A^p=20\%$ to $A^p=35\%$. Ash content and humidity are $A^p+W^p=65\%$. It has been found that at ash content of $A_p=30-35\%$ and humidity $W^p=30-35\%$ the combustion process is unstable due to the problem of removing moisture and ash from the furnace volume. The temperature of the flue gases at the outlet of the furnace when burning peat is found to be 1711 °C, and the temperature of the ash is 1380 °C, which ensures solid ash removal. The temperature of flue gases during the combustion of brown coal is 1888 °C. A higher air excess coefficient is noted: $a=2.36$ in the process of burning peat and $a=2.0$ when burning brown coal. The calculation results indicate that this ensures a high degree of coke combustion in the particles that are captured: 99.8 % (peat particles) and 93.9 % (lignite). The underburning of fuel particles that are carried away is 0 % (peat) and 3.04 % (lignite). The underburning of fuel particles that are captured is 0.06 % (peat) and 0 % (lignite). The ratio of oncoming flows is 0.2, which ensures the minimum hydraulic resistance of the furnace. Peat and brown coal are similar to each other in chemical composition after the stages of coalification. Therefore, similar characteristics of combustion processes can be obtained by burning a composite

mixture of peat/lignite (50 %/50 %), both in pulverized combustion and in the combustion of briquette granules and water-fuel suspension – water-peat-lignite.

Keywords: *vortex furnace, combustion processes, counter swirling flows, peat, brown coal, composite mixture.*

Вступ. Видобуток бурого вугілля у країнах ЄС ведеться у Німеччині (171,5 млн т 2016 р.), Польщі (60,2 млн т), Чехії (38,5 млн т), Болгарії (31,2 млн т). У Туреччині видобуток бурого вугілля становить 50,9 млн т. Польща виробляє 80 % електроенергії з вугілля, а до 2050 р. має намір знизити цю частку до 50 %. Висока енергоємність ВВП України та недостатність власних ресурсів визначають залежність від постачання енергоносіїв. Тому актуальним є залучення місцевих поновлюваних джерел енергії до паливно-енергетичного балансу країни. Особливо це актуально для вироблення теплоти у системі житлово-комунального господарства (котельні установки систем муніципального теплопостачання). Використання місцевих палив (торф, буре вугілля) дозволяє знизити споживання природного газу, що імпортується.

Відповідно до «Енергетичної Стратегії України 2035» вугілля залишається одним із основних джерел в енергопостачанні України і продовжує бути основним гарантом безпеки держави. Проте використання місцевих палив потребує модернізації газових котелень. Одним з технічних рішень є розміщення вихрових передтопок, які дають змогу спалювати різні види палив за мінімальної модернізації котельної установки. Актуальним напрямом дослідження вихрової технології спалювання твердих палив (торф, буре вугілля) є розроблення технологічних схем спалювання композитного палива в топках із зустрічними закрученими потоками (ТЗЗП). Робочі процеси спалювання композитного палива в ТЗЗП є актуальним об'єктом для дослідження.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Основними споживачами природного газу в Україні є населення та

бюджетні організації (34 %), промислові підприємства (45 %), комунальні ТЕЦ та котельні (20 %). На сьогодні видобуток в Україні енергетичного вугілля (марки А, Т, Д, ДГ, Г) становить 58 млн т, а споживання енергетичного вугілля на ТЕС та ТЕЦ становить близько 50 млн т, залишок складає близько 3,4 млн т. Цей обсяг вугілля не може забезпечити необхідне заміщення природного газу [1].

Як альтернативні паливні ресурси можуть бути використані:

- буре вугілля Дніпропетровського басейну;
- вуглецевмісні шлакові та сухі відходи вуглеутворення;
- вуглецевмісний матеріал золівідвалів антрацитових ТЕС.

Запаси бурого вугілля зосереджені на території Кіровоградської області, в Донецькому, Львівсько-Волинському та Дніпропетровському вугільних басейнах.

Запаси бурого вугілля складають більше 2 млрд т. Видобуток вугілля ведеться ВАТ «Олександрія-вугілля» відкритим способом. Родовище бурого вугілля – Мокрокалігірське (Черкаська область) – планова продуктивність 300–600 тис. т/р. Розглядається питання розробки Новодмитрівського родовища бурого вугілля в Барвінківському районі Харківської області з запасами понад 390 млн т.

Крім родовищ бурого вугілля в Україні є значні запаси торфу. В Україні обсяг родовищ торфу, що розробляються, становить близько 1160 млн т. Найбільші родовища зосереджені у Рівненській області (330 родовищ), Волинській (226 родовищ), Чернігівській (198 родовищ), Житомирській (187 родовищ) (ТОВ МПВФ «Енергетик»).

В Харківській області розвідано 6 родовищ торфу. Потужність торфу

коливається від 1,1 до 1,89 м, зольність від 30,5 до 41,0 %. Загальні запаси шести родовищ торфу складають 952,7 тис. т [2].

Заторфованість Рівненської та Волинської областей сягає 6,5 %. Тернопільська, Полтавська, Сумська, Харківська – не перевищує 2 % усієї території [3].

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. У табл. 1 наведено енергетичний потенціал торфу.

Таблиця 1

Енергетичний потенціал торфу в Україні

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 табл. 2 наведено обсяги видобутку торфу. В Україні працювало 37

торфобрикетних заводів (1991 р.), у 2010 р. їх залишилося 6 [www.biowatt.com.ua].

Таблиця 2

Обсяги видобутку торфу (2010)

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

Сучасні технології спалювання торфу, бурого вугілля. В Україні перебуває в експлуатації 235 комунальних та промислових ТЕЦ, понад 66 тис. промислових та 26 тис. комунальних

котельнь. На підприємствах експлуатуються парові та водогрійні котли. Це котли малої потужності НІСТУ-5 та «Універсал», парові котли ДКВР, водогрійні котли з камерними топками типів КВГ, ТВГ,

ПТВМ, КВГМ тепловою потужністю від 2 до 200 МВт. Промислові ТЕЦ оснащені паровими котлами з камерними топками типів Е, БКЗ, ТП, ГМ паропроодуктивністю від 35 до 220 т/год.

У роботі [33] наведено результати дослідження процесів спалювання бурого вугілля в середовищі з більш високим вмістом кисню.

Модернізація котлів можлива шляхом застосування топок низькотемпературної вихрової технології, вихрових передтопок, топок з киплячим шаром і топок, в яких поєднуються технології вихрового, шарового спалювання та технології киплячого шару, та шляхом заміни застарілих котлів на сучасні [5-14].

У роботах [5, 6] наведено параметри камерних топок енергетичних котлів. Конструкції топок, які реалізують технологію, що поєднує спалювання палив у киплячому шарі та вихрове спалювання наведено в [9, 10]. Огляд зарубіжних технологій спалювання твердих палив наведено в [34].

Спалювання місцевих палив та паливних відходів можливе у шарових топках та топках киплячого шару [4, 8] котлів малої потужності. Процеси спалювання торфу, бурого вугілля, біомаси розглянуто в роботі [19].

Опис топок з високотемпературним киплячим шаром (ВТКС) за технологією IGNIFLUID наведено в [26, 27]. Результати промислових випробувань фірмою ВАВСОСК наведені у [28, 29]. Показано, що переваги ВТКС-технології не було реалізовано через великі коефіцієнти надлишку повітря та втрати теплоти, а також через проблему спікання золи та шлакоутворення [8, 9] та шлаковидалення [10]. Топки з низькотемпературним киплячим шаром наведені в [11]. У роботах [12, 13] показано застосування НТВ-технології для котлів малої потужності.

Вихрову технологію спалювання твердих палив (НТВ-технологія) розроблено

та впроваджено на енергетичних котлах великої потужності.

Технологія факельного спалювання твердого палива – бурого вугілля (котли з кільцевою топкою) застосовується на великих енергоблоках потужністю від 300 до 1200 МВт [7].

Модернізація котлів малої потужності виконується шляхом розміщення передтопок, що охолоджуються повітрям [8, 9], та зміни технологічної схеми.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – дослідження процесів спалювання торфу та бурого вугілля у вихровій топці ТЗЗП та розробка композитної суміші торф – буре вугілля.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

– для використання торфу та бурого вугілля в паливному балансі підприємств та населених пунктів необхідно оцінити енергетичний потенціал родовищ;

– для створення та використання композитної суміші торф – буре вугілля виконати чисельні розрахунки процесу спалювання.

Основна частина дослідження. Методику чисельного розрахунку процесів спалювання торфу та бурого вугілля наведено у роботі [15]. У цій роботі наведено розрахунки вихрової топки з верхньою подачею палива та первинного повітря, знизу топки – подача вторинного повітря. Характеристики палива такі.

Хімічний склад торфу (на горючу масу): С (вуглець) – 56 %; Н (водень) – 6 %; О (кисень) – 35 %; N (азот) – 2 %; S (сірка) – 1 %. Технічний склад торфу (на робочу масу): леткі – 38 %; кокс – 16 %; зольність – 6 %; вологість – 40 %; вища питома теплота згорання торфу (на робочу масу) – 12,3 МДж/кг. Склад шлаку торфу: SiO₂ (25–40 %), Al₂O₃ (5–30 %), CaO (30–55 %), MgO (0–10 %), F₂O₃ (0–30 %). Температура плавлення золи становить 1070–1200 °С. Співвідношення SiO₂/Al₂O₃=1,33>1,2, що задовольняє вимоги для топок з рідким шлаковидаленням.

Хімічний склад бурого вугілля: С (вуглець) – 70 %; Н (водень) – 6 %; О (кисень) – 35 %; N (азот) – 2 %, S (сірка) – 1 %. Технічний склад бурого вугілля (на робочу масу): варіант А: зольність $A^P=20\%$, вологість $W^P=30\%$, вихід летких $V^P=25\%$; варіант Б: зольність $A^P=35\%$, вологість $W^P=30\%$, вихід летких $V^P=30\%$.

Результати комп'ютерного моделювання процесів спалювання торфу та бурого вугілля в вихровій топці із закрученими зустрічними потоками: недопал механічний – 0,06 % (горючої маси), винос золи – 52 % (маси золи), кінцева температура золи до 1380 °С, температура газів на виході – 1711 °С (табл. 3).

Таблиця 3

Конструктивні та режимні параметри вихрової топки (паливо – торф, буре вугілля)

Параметр, одиниця виміру	Торф	Буре вугілля
D, діаметр топки, мм	600	600
H, висота топки, мм	3645	3645
W, теплова потужність, МВт	2,5	2,5
m_n , масова витрата палива, кг/с	0,18	0,184
m_1 , масова витрата первинного повітря, кг/с	1,26	1,26
t_1 , температура первинного повітря, °С	377	377
m_2 , масова витрата вторинного повітря, кг/с	0,315	0,315
t_2 , температура вторинного повітря, °С	377	377
d_{\min} , мінімальний діаметр частинок палива, мкм	25	25
d_{\max} , максимальний діаметр частинок палива, мкм	250	250
\bar{d} , медійний діаметр, мкм	57	57
α_Σ , коефіцієнт надлишку повітря	2,36	2,0
температура газів на виході з топки, °С	1711	1888
концентрація кисню у вихідних газів, %	5,2	3,4
ступінь вигорання летких, %	100	100
ступінь вигорання коксу з частинок, що вловлюються, %	99,8	93,9
недопал механічний частинок, що виносяться, % (горючої маси)	0	3,04
недопал механічний частинок, що вловлюються, % (горючої маси)	0,06	0
уловлювання частинок, %	47,6	100
винос частинок, %	52,4	0

Порівнюючи результати розрахунку процесів спалювання торфу та бурого вугілля (рис. 1, 2), видно, що температурні

поля, поля швидкості та траєкторії руху частинок у топці ідентичні.

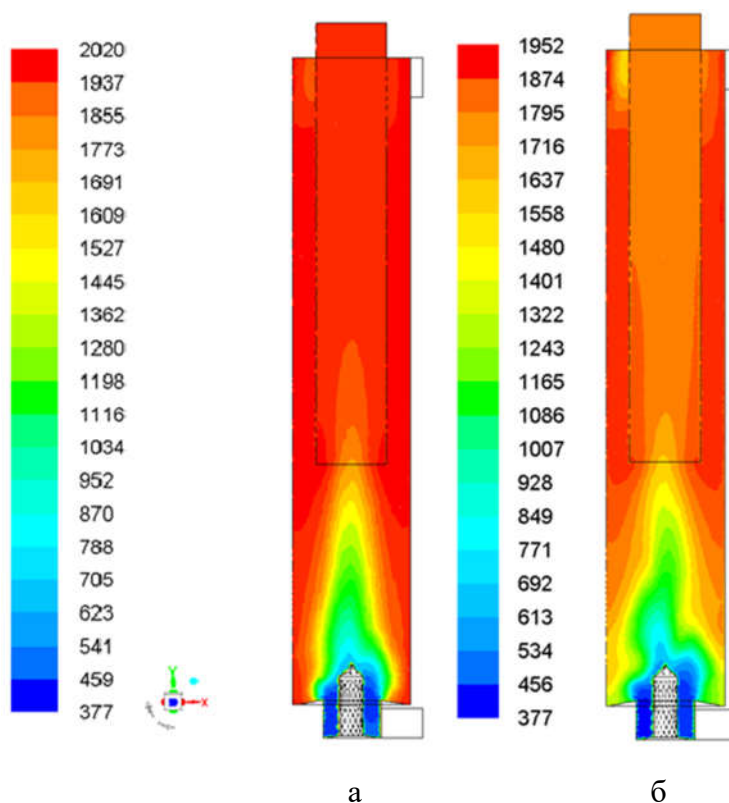


Рис. 1. Розподіл температури газу, градуси Цельсія (°C), у поздовжньому перерізі топки:
а – торф; б – буре вугілля

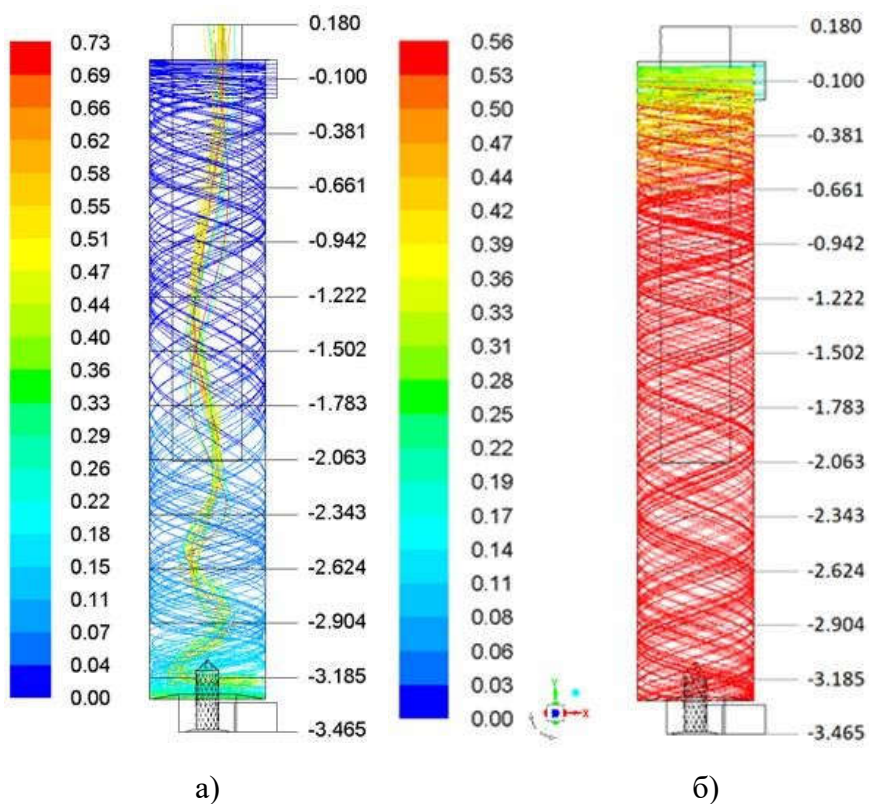


Рис. 2. Траєкторії частинок торфу з початковим діаметром 25 мкм, пофарбовані залежно від часу знаходження коксової частини в топці: а – торф; б – буре вугілля

Можна припустити, що подібні результати будуть отримані і при спалюванні паливної суміші торф-буре вугілля та водопаливної суспензії вода-торф-буре вугілля. Використання твердої композитної суміші торф-буре вугілля дозволить створити паливні пелети, гранули та виробляти їх на брикетних заводах [25].

Виробництво паливних пелет дозволяє вирішити кілька проблем: транспорту палива на великі відстані та повніше використання місцевих паливних ресурсів торфу та бурого вугілля. Виробництво водоторфовугільних палив також дає змогу вирішувати транспортну проблему та ефективність факельного спалювання низькосортних палив у котлах малої потужності, забезпечуючи виконання екологічних вимог [16–18, 20–24].

У роботах [16, 17] наведено характеристики водовугільних суспензій. Результати промислових випробувань процесів спалювання водовугільних

суспензій у котлі ДКВР наведено у [18]. Обґрунтування застосування водовугільних суспензій у топках малих котлів – в [20], а в [21, 22] – результати спалювання водовугільних суспензій у киплячому шарі. У роботах [23, 24] наведено результати застосування паливних гранул та брикетів [25].

Водовугільна суспензія, приготовлена з частинок високореакційного бурого вугілля або торфу, забезпечує швидке запалення і вигоряння. Застосування торфу при розмелі та підготовці формує гель, що сприяє підвищенню стійкості суспензії [21].

Висновки. Результати чисельного дослідження дозволяють обґрунтувати ефективність спалювання композитної суміші торф-буре вугілля. Показано, що пилоподібна і водовугільна суміші можуть спалюватися у вихрових топках ТЗЗП, а гранули та брикети – у шарових топках та топках із киплячим шаром.

Список використаних джерел

1. Чернявский Н. В. О перспективах и особенностях использования угля в промышленности и коммунальной энергетике. *Современная наука*. 2012. № 1 (9). С. 80–88.
2. Рудій М. Г. Мінерально-сировинна база агроруди на території Харківської області. *Вісник Харк. нац. ун-ту ім. Каразіна*. 2017. № 47. С. 56–63.
3. Гнеушев В. А. Украинский торф: некоторые проблемы и перспективы. *Уголь Украины*. 2011. № 11. С. 50–52.
4. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов И. В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 350 с.
5. Померанцев В. В. Основы практической теории горения. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
6. Рундыгин Ю. А., Григорьев К. А., Скудницкий В. Е. Внедрение технологии низкотемпературного вихревого сжигания бурого угля при модернизации котельных установок. *Электрические станции*. 2000. № 5. С. 38–47.
7. Серант Ф. А. Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле производительностью 820 т/ч: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1999.
8. Пузырев Е. В. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул: АГТУ, 2013.
9. Обухов И. В. Исследование низкотемпературной вихревой топки котла малой мощности при сжигании Дальневосточных и Канско-Ачинских бурых углей: дис. ... канд. техн. наук. Владивосток: ДВГТУ, 1999.

10. Григорьев К. А. Разработка и внедрение технологических решений, повышающих эффективность низкотемпературного вихревого сжигания топлива: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт Петербург: ЦКТИ, 2010.
11. Совершенствование технологии низкотемпературного вихревого сжигания топлива и перспективы модернизации котельных установок / Ю. А. Рундыгин и др. *Энергомашиностроение: труды СПбГПУ*. 2004. № 491. С. 128–135.
12. Рундыгин Ю. А. Модернизация котельной техники на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив. *Повышение эффективности производства и использования энергии на Дальнем Востоке: матер. IV семин. вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике*. Владивосток: ДВГУ. 2006. С. 83–89.
13. Опыт освоения НТВ – сжигания бурых углей в топке котла малой мощности / О. В. Распутин и др. *Вестник УГТУ-УПИ*. 2003. № 8 (28). С. 73–78.
14. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск, 2006. 852 с.
15. Redko A., Burda Y., Dzhyoiev R., Norchak V. et al. Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows. *Thermal Science*. 2021. 25. pp. 1905–1919. URL: <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>.
16. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л. Н. Мальцев и др. *Теплоэнергетика*. 2014. № 7. С. 25.
17. Глушников Д. О., Стрижак П. А., Чернецкий М. Ю. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор). *Теплоэнергетика*. 2016. № 10. С. 31–41.
18. Результаты опытно-промышленных испытаний работы мазутного котла ДКВР 6,5/13 на водоугольном топливе / Е. М. Пузырев, В. И. Мурко и др. *Теплоэнергетика*. 2001. № 2. С. 69–72.
19. Варес В. Справочник потребителя биотоплива. Таллинн: ТТУ, 2005. 183 с.
20. Долинский А. А., Халатов А. А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе. *Пром. Теплотехника*. 2007. Т. 29. № 5. С. 70–79.
21. Исследование реодинамики и горения композиционных водоугольных суспензий / А. П. Бурдуков и др. *Теплоэнергетика*. 1997. № 6. С. 58–62.
22. Пронь Г. П., Пузырев Е. М. Исследование возможности утилизации нетрадиционных видов топлив в котлах с кипящим слоем. *Ползуновский вестник*. 2004. № 1. С. 125–128.
23. Технология приготовления топливных гранул из смеси торфа и вторичного сырья / В. И. Кормилицин и др. *Вестник МЭИ*. 2011. № 5. С. 9–14.
24. Борзов А. И., Баранова М. П. Приготовление водоугольных суспензий из бурых углей с использованием различных мельничных устройств. *Химия твердого топлива*. 2006. № 4. С. 40–45.
25. Кегель К. Брикетирование бурого угля: пер. с нем. Москва: Углекимиздат, 1957. 659 с.
26. Squires A. M. Pulverized-Fuel Combustion in Trouble. *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*. 1970. № 2(14). P. 18–20.
27. Godel A. A. Origin of the «Ignifluid Combustion Process» and conception design, followed by the description of the projector a new fluid bed combustor. *Proceeding of the First Int. Conf. FBC*. 1968. P. 7–8.
28. Yerushalmi J. et al. Agglomeration of Ash in Fluidized Beds Gasifying Coal: The Godel Phenomenon. *Science, New Series*. 1975. № 4177(187). P. 41–46.
29. Kumar R., *Boilers, A Practical Reference*. Boca Raton: CRC Press. 2013. 210 с.

30. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое: пер с чешск. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 112 с.
 31. Simeon O. Fluidized Bed Combustion. New York. 2004. 250 с.
 32. Ohman M., Nordin A. A new method for quantification of fluidized bed agglomeration tendencies: a sensitivity analysis. *Energy and Fuels*. 1998. № 12. P. 18-22.
 33. Chen X., Zhang Y., Zhang Q., et all. Thermal analysis of the lignite combustion in oxygen-enriched atmosphere. *Thermal Science*. 2015. 19. № 3(19). P. 801–811.
 34. Котлер В. Р. Специальные топки энергетических котлов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 104 с.
-
-

Норчак Володимир Іванович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури. ORCID ID: 0000-0003-4048-7159. E-mail: andrey.ua-mail@ukr.net.

Norchak Volodymyr Ivanovich, 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: 0000-0003-4048-7159. E-mail: andrey.ua-mail@ukr.net.

Статтю прийнято 14.02.2022 р.