

УДК 62-664.2

Технологічні параметри процесу спалювання бурого вугілля у вихровій топці

В.І. Норчак¹

¹ асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID 0000-0003-4048-7159

Анотація. Наведено результати чисельного розрахунку параметрів процесу спалювання бурого вугілля у вихровій топці із зустрічними закрученими потоками. Фракційний склад палива змінюється від 25 мкм до 250 мкм. Виконано порівняння схем подачі паливоповітряної суміші знизу і згори топки. Показано, що подача палива знизу топки забезпечує видалення золи у твердому вигляді у верхній частині топки, призводить до більш рівномірного розподілу температури топкових газів всередині топкового об'єму та зменшення вмісту коксу в частинках палива під час спалювання бурого вугілля. Результати чисельного моделювання процесів спалювання бурого вугілля у вихровій топці із зустрічними потоками показують, що серед розглянутих трьох схем кращі характеристики має третя схема з нижньою подачею палива і видаленням золи у твердому вигляді згори топки. При цьому, забезпечується 99,4 % уловлювання частинок, які не накопичуються в топковому об'ємі через вилучення золи. Однак механічний недопал частинок коксу діаметром від 25 мкм до 250 мкм, що уловлюються, становить 8,1 % та вимагає допалювання. Друга схема не забезпечує ефективне спалювання вугілля через накопичення частинок у топковому об'ємі.

Ключові слова: зустрічні вихрові потоки, розподіл температур газів в топці, буре вугілля.

Вступ. Україна посідає сьоме місце в міжнародному переліку країн за кількістю запасів вугілля на території країни. Оптимальне використання даного природного ресурсу є запорукою активного розвитку промисловості та основою для підвищення енергетичної незалежності країни.

Актуальність дослідження. На території України знаходяться великі поклади вугілля, тому історично даний вид палива був основою енергетичного сектору економіки. Незважаючи на великий досвід, на сьогодні не встановлено оптимальний шлях спалювання вугілля. Навіть незначні зміни у конструкції твердопаливних топковок значною мірою впливають на ефективність процесу теплопередачі всередині котлоагрегатів. Тому дослідження різних конструктивних особливостей топковок є актуальним і перспективним.

Останні дослідження та публікації. Запаси бурого вугілля (лігніту) в Україні в Мокрокальгорском родовищі становить близько 7,76 млн. т [1]. Видобуток бурого вугілля в 60-80 роки 20 століття в Україні становив 10 млн. т., в Німеччині 183 млн. т, Китаї 147 млн. т.

Склад бурого вугілля такий: 50...77 % вуглецю, 20...30 % вологи і до 50 % летких. Теплоота згорання становить близько 20...26 МДж/кг. Наявність вологи, що утворюється при спалюванні золи, ускладнює процес спалювання бурого вугілля в топках з малим топковим об'ємом.

Ефективне спалювання бурого вугілля забезпечується в механічних топках ТШПМ,

ТЛЗМ, ТИЗМ, ТЛПХ з ротаційним закиданням (ПМЗ-РПК). Спалювання бурого вугілля має вихід летких $V^e = 11...45\%$ і зольність $A^e = 8...35\%$. Найбільш ефективним є спалювання кам'яного вугілля з виходом летких $V^e = 25\%$ (марки вугілля Г, Д, Ж) і бурого вугілля з теплоото згорання $Q_{н}^p > 12600$ кДж/кг. Вологість палива при невисокій зольності не лімітує топкові процеси, якщо паливо проходить через живильники закидувача. Важко забезпечити ефективне спалювання високовологого та багатозольного бурого вугілля через складність видалення золи з топки. При цьому підігрів дуттьового повітря до 170 °С інтенсифікує топкові процеси.

Суттєво впливає на робочі процеси фракційний склад бурого вугілля. При зниженні теплоти згорання бурого вугілля або сланцю можливе спільне спалювання кам'яного вугілля та сланцю [3] в топках котла ТП-101. Можливе і спільне спалювання бурого вугілля з біомасою [4]. Однак сучасні котельні агрегати не забезпечують стійкого займання і горіння бурого вугілля. У зв'язку з цим застосовується підсвічування факела високореакційним паливом (мазутом або газом). Це призводить до підвищених викидів в атмосферу CO , NO_x і SO_x . При цьому істотним є зниження механічного недопалу, яке визначає споживання палива. Тому підвищуються вимоги до організації процесу паливо-приготування. Тонкий помел палива забезпечує вихід летких і високу швидкість вигорання коксу.

Спалювання бурого вугілля у вихрових топках дозволяє забезпечити стабілізацію процесу

горіння твердого палива і знизити втрати від механічного недопалу.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є визначення оптимального варіанту конструкції топки із зустрічними вихровими потоками для спалювання вугілля. При цьому розглядається залежність розподілу температури газу всередині топки та траєкторії частинок бурого вугілля залежно від масової долі коксу.

Основна частина. У даній роботі при математичному описі фізико-хімічних процесів в топці приймалися такі основні припущення:

- потік носійного газового середовища тривимірний, хімічно реагує, квазістаціонарний, нестисливий, турбулентний, багатокомпонентний, швидкість газофазних хімічних реакцій нескінченно велика;
- газова суміш знаходиться в стані термодинамічної рівноваги;
- плавучість, об'ємну в'язкість, в'язке нагрівання не враховано;
- частинки бурого вугілля сферичні, полідисперсні;
- об'єм, який займають частинки, не враховано;
- горіння торф'яних частинок передбачає процеси виходу та займання летких і вигорання коксового залишку;
- теплообмін випромінюванням слід враховувати;
- турбулентність ізотропна;
- частинки не впливають на параметри турбулентності;
- враховується турбулентне розсіювання частинок.

Пилепаливна аеросуміш моделювалася як двофазна суміш з ейлеровим описом газової фази (суцільне середовище) і лагранжевим описом руху частинок вугілля (траєкторна модель). Взаємодія фаз враховувалася на основі моделі «частинка - джерело в осередку» [6], відповідно до якої присутність частки в потоці проявляється через додаткові джерела в рівняннях збереження суцільної фази. Вважалося, що миттєвий термохімічний стан потоку однозначно визначається консервативною скалярною величиною – безрозмірною функцією Шваба – Зельдовича f , яка має значення масової частки відновленого палива. Взаємодія хімічних процесів і турбулентності описувалася статистично за допомогою функції густини розподілу ймовірності.

За наведених вище припущень поведінка газової фази описується системою диференціальних рівнянь у похідних, що складаються з

усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, двох рівнянь диференціальної моделі турбулентності k - ϵ типу [7], рівнянь збереження для безрозмірних функцій Шваба – Зельдовича f_n і для пульсацій цих функцій $g_n = f_n'^2$ [8] та інтегро-диференціального рівняння переносу випромінювання [9].

Дискретизація вихідних диференціальних рівнянь у похідних проводилася методом контрольних об'ємів із застосуванням схеми першого порядку точності для апроксимації конвективних членів. Метод об'ємного контролю використовувався також у роботах [10, 11, 12]. Розв'язки знаходяться в результаті розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь за методом Гаусса-Зейделя з використанням алгоритму SIMPLE [7]. Інтегро-диференціальне рівняння вирішувалося методом сферичних гармонік [8]. Інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь здійснювалося методом Рунге-Кутта. Для розрахунку умов хімічної рівноваги використовувався алгоритм, заснований на мінімізації вільної енергії Гіббса.

На межах розрахункової області задавалися такі граничні умови суцільної фази:

- на вхідних ділянках – значення незалежних змінних;
- на стінках – умови прилипання;
- на вихідній області – «м'які» граничні умови.

Для опису турбулентного примежового шару застосовувалися емпіричні пристінкові функції [6]. При моделюванні дискретної фази задавалися початкові умови для кожної розрахункової частинки:

- стан частинки – координати x_j , м;
- її швидкість – компоненти u_{ps} , м/с;
- діаметр, м
- температура, К
- масова витрата частинок, що прямують уздовж траєкторії.

Також враховано, що при зіткненні зі стінками частинки пружно відбиваються від них. Більш докладний опис математичної моделі наведено в [5]. В основу створення топки із зустрічними закрученими потоками покладено дослідження [6].

Результати та їх відображення. Розглянуто топку згідно з рис. 1. У роботі розглядалися три технологічні схеми. Перша схема (рис. 1а) характеризується подачею палива згори топки, а вторинного повітря – знизу. Друга схема (рис. 1б) відрізняється нижньою подачею палива, а вторинного повітря – знизу топки. Видалення золи відбувається в рідкому вигляді знизу топки.

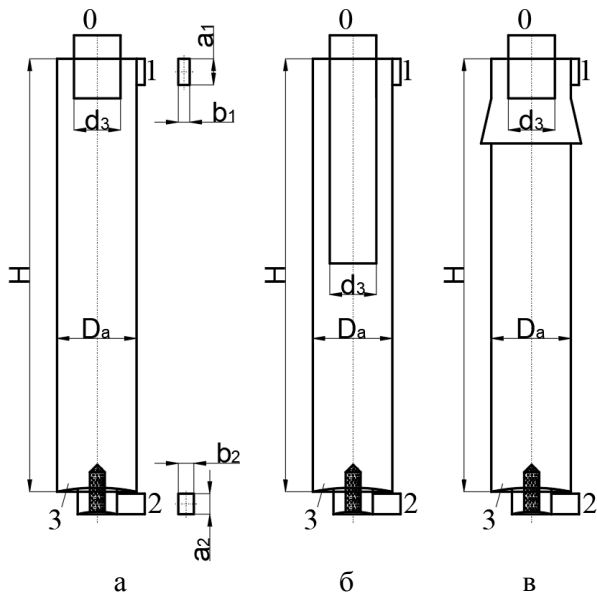


Рис. 1. Конструкція камери згоряння із зустрічними вихровими потоками: а – схема I (табл.); б – схема II (табл.); в – схема III (табл.):
 1 – подача повітряної суміші;
 2 – подача вторинного повітря;
 0 – випускний вихід пічного газу;
 розміри завихрювачів: $a_1 = 0,198$ м,
 $b_1 = 0,06$ м; $a_2 = 0,15$ м, $b_2 = 0,05$ м

Третя схема (рис. 1в) відрізняється подачею палива знизу, а вторинного повітря зверху топки. Видалення золи відбувається зверху топки в твердому вигляді.

Теплова потужність топки становить 2,5 МВт. У топці спалюється пиловидне паливо розміром від 25 мкм до 250 мкм, середній розмір частинок складає 57 мкм.

За результатами моделювання технологічні параметри досліджуваних схем відповідають

табл. 1. Також отримано розподіл температури газу у поздовжньому перерізі топки (рис. 2) та траєкторії частинок бурого вугілля з початковим діаметром 25 мкм, які пофарбовано за масовою часткою коксу в їхньому складі (рис. 3). Порівняння теплової схеми з верхньою та нижньою подачею палива показує, що ступінь вигорання коксу становить 93,9 % (схема I) і 92,5 % (схема II), а недопал частинок коксу, які уловлюються, становить 3,04 % (схема I) і 3,7 % (схема II). При цьому, спостерігається винесення частинок 19,2 % (схема II) і витання 80 % маси частинок в топковому об'ємі.

Для схеми III значення характеристик становить відповідно: винесення частинок – 0,4 %, витання часток (рис. 2) – 0,2 %, ступінь вигорання коксу – 83,8 %. При рециркуляції частинок в топці кокс буде вигорати повністю. Відмінністю схеми II є наявність холодної зони і можливість реалізувати тверде шлаковидалення при високотемпературному процесі спалювання твердого палива.

Основна проблема, яка виникає в процесі спалювання вугілля при нижній подачі палива за схемою II, – це тривале витання часток золи у верхній зоні топки, збільшення їхньої концентрації, складність видалення і порушення процесу горіння. У схемі III ця проблема вирішується шляхом конструктивної зміни технологічної схеми і встановлення кільцевої щілини та конфузора у верхній частині топки, через яку видаляється зола і незгорілі частинки, що потім повертаються в топку для допалювання. Не згорілі частинки палива вловлюються також у сепараторі та повертаються до топки. Це забезпечує циркуляцію частинок.

Таблиця

Порівняння схем камери згоряння

Схе-ма	Крес-лення	Подача		Видалення золи		Тем-пе-ра-тура топ-кових газів на ви-ході, °С	Вигоран-ня, %		Меха-нічний недо-пал час-тинок, що вло-влю-ються, %	Улов-лю-вання час-тинок на ви-ході, %	Накопичення в топковому об'є-мі частинок па-лива, що вита-ють тривалий час і ускладню-ють процес го-ріння, %
		палива	повітря	стан	поло-жен-ня		лет-ких	кокс-у			
I	Рис. 1а	верхня	знизу	–	–	1888	100	93,9	3,04	100	0
II	Рис. 1б	нижня	знизу	рідкий	знизу	1919	100	92,5	3,7	0,8	80
III	Рис. 1в	нижня	згори	твердий	згори	1870	100	83,8	8,1	99,4	0,2

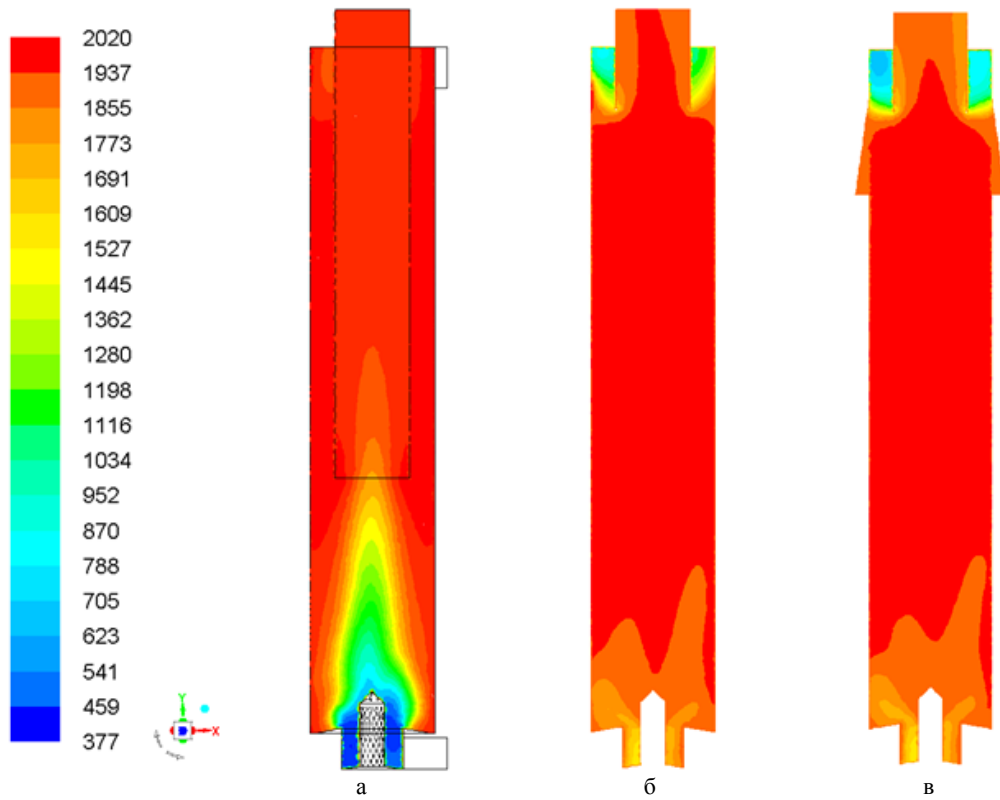


Рис. 2. Розподіл температури газу (°C) у поздовжньому перерізі топки:
а – схема I, б – схема II, в – схема III

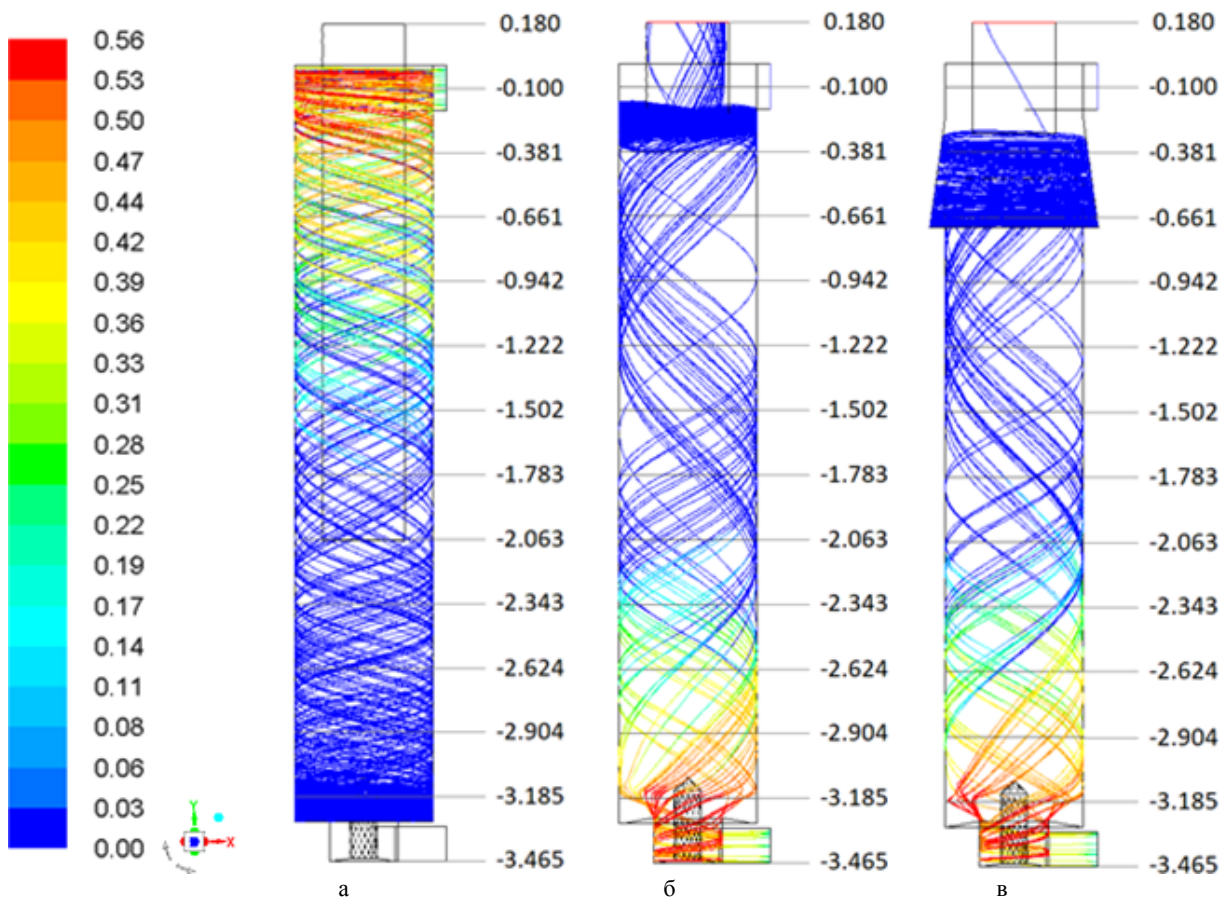


Рис. 3 Траєкторії частинок бурого вугілля з початковим діаметром 25 мкм, пофарбовані за масовою часткою коксу в їхньому складі:
а – схема I, б – схема II, в – схема III

Висновки. Результати чисельного моделювання процесів спалювання бурого вугілля у вихровий топці із зустрічними потоками показують, що серед розглянутих трьох схем кращі характеристики має схема III з нижньою подачею палива і видаленням золи у твердому вигляді згори топки. При цьому забезпечується 99,4 % уловлювання частинок, які не накопичуються в топковому об'ємі через вилучення золи. Однак механічний недопал частинок коксу діаметром від 25 мкм до 250 мкм, що уловлюються, становить 8,1% та вимагає допалювання. Друга схема не забезпечує ефективного спалюва-

ння вугілля через накопичення частинок у топковому об'ємі. Схема I характеризується вигоранням летючих у розмірі 100 %, вигоранням коксу 93,9 %. Механічний недопал становить 3,04 %, уловлювання частинок становить 100 %. Ці частинки не накопичуються в топковому об'ємі. Однак, дана схема характеризується рідким шлаковидаленням.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому планується розглянути аеродинамічні показники паливо-повітряної суміші всередині топки з різними конструктивними особливостями.

Література

1. Стрелина Е.Н. Современные проблемы развития угольной промышленности Украины в контексте энергетической независимости страны / Е.Н. Стрелина, А.И. Йоненко // Эффективная экономика. – 2014. – №4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2950>
2. Нечаев Е. В. Механические точки для котлов малой и средней мощности / Е. В. Нечаев, А. Ф. Лубин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 311 с
3. Росляков П. В. Использование углей для совместного сжигания с эстонскими сланцами / П. В. Росляков, М. Н. Зайченко, Д. А. Мельников и др. // Теплоэнергетика. – 2016. – Т. 63. – №3 – С. 34-42. <https://doi.org/10.1134/S0040363616030103>
4. Передерий С. Совместное сжигание бурого и каменного угля с биомассой / С. Передерий // ЛесПромИнформ. – 2011. – №7(81). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=2462>
5. Redko A. Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows / A. Redko, Y. Burda, R. Dzhyoiev, I. Redko, V. Norchak, S. Pavlovskiiy, O. Redko // Thermal Science. – 2021. – Vol. 25. – Iss. 3. – Part A. – pp. 1905-1919. <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>
6. Hong G. Direct numerical simulations of statistically stationary turbulent premixed flames / G. Hong, G. Paul, A. Arias, et al. // Combustion Science and Technology. – 2016. – Vol. 188. – Iss. 8. – pp.1182-1198. <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1198789>
7. Кроу Д. Численные модели течений газа с наибольшим содержанием частиц / Д. Кроу // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. –Т. 104. – №3. – С. 114-122.
8. Launder B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
9. Jones W.P. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review / W.P. Jones, J.H. Whitelaw // Combustion and Flame. – 1982. – Vol. 48. – P. 1-26 [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90112-2)
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – Москва: Наука, 1978. – 846 с.
11. Badzioch S. Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles / S. Badzioch, P. G. W. Hawksley // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1970. – Vol. 9. – Iss. 4. – pp. 521-530. <https://doi.org/10.1021/i260036a005>
12. Vandoormaal J. P. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows / J. P. Van Doormaal, G. D. Raithby // Numerical Heat Transfer. – 1984. – Vol. 7. – Iss. 2. – P. 147-163. <https://doi.org/10.1080/01495728408961817>

References

1. Strelina E.N., Yonenko A.I. “Sovremennye problemy razvitiia ugolnoi promyshlennosti Ukrainy v kontekste energeticheskoi nezavisimosti strany”. *Efektivna ekonomika*. 2014. №4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2950>
2. Nechaev E.V., Lubin A.F. *Mekhanicheskie topki dlia kotlov maloi i srednei moshchnosti*. Energiia, 1968.
3. Roslyakov P.V., Zaichenko M.N., Melnikov D.A. et al. “Ispolzovanie ugley dlya sovместного szhiganiya s estonskimi slantsami”. *Teploenergetika*. 2016. T. 63. №3 P. 34-42. <https://doi.org/10.1134/S0040363616030103>
4. Perederii S. “Sovместное szhiganie burogo i kamennogo uglia s biomassoii”. *LesPromInform*. 2011. №7(81). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=2462>
5. Redko A., Burda Y., 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*. 2021. Vol. 25. Iss. 3. Part A. pp. 1905-1919. <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>
6. Hong, G., Paul, G., Arias, A., et al. “Direct numerical simulations of statistically stationary turbulent premixed flames”. *Combustion Science and Technology*. 2016. Vol. 188. Iss. 8. pp.1182-1198.

<https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1198789>

7. Crow D. “Chislennyye modeli techenii gaza s naibolshim sodержaniem chastits”. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*. 1982. T. 104. №3. P. 114-122.

8. Launder B. E., Spalding. D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, 1972.

9. Jones W.P., Whitelaw J.H. “Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review”. *Combustion and Flame*. 1982. Vol. 48. P. 1-26 [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90112-2)

10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – Москва: Наука, 1978. – 846 с.

11. Badzioch S., Hawksley P. G. W. “Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles”. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1970. Vol. 9. Iss. 4. pp.521-530. <https://doi.org/10.1021/i260036a005>

12. Vandoormaal J. P., Raithby G. D. “Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows”. *Numerical Heat Transfer*. 1984. Vol. 7. Iss. 2. P. 147-163. <https://doi.org/10.1080/01495728408961817>

УДК 62-664.2

Технологические параметры процесса сжигания бурого угля в вихревой топке

В. И. Норчак¹

¹ асп. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID 0000-0003-4048-7159

***Аннотация.** Приведены результаты численного расчёта параметров процесса сжигания бурых углей в вихревой топке со встречными закрученными потоками. Фракционный состав топлива изменяется от 25 до 250 мкм. Выполнено сравнение схем подачи топливозооушной смеси снизу и сверху топки. Показано, что подача топлива снизу топки обеспечивает удаление золы в твёрдом виде в верхней части топки, приводит к более равномерному распределению температуры топочных газов внутри топочного объёма и уменьшению содержания кокса в частицах топлива при сжигании бурых углей. Результаты численного моделирования процессов сжигания бурого угля в вихревой топке со встречными потоками показывают, что среди рассмотренных трёх схем лучшие характеристики имеет третья схема с нижней подачей топлива и удалением золы в твёрдом виде сверху топки. При этом обеспечивается 99,4% улавливания частиц, которые не накапливаются в топочном объёме из-за извлечения золы. Однако механический недожог улавливаемых частиц кокса диаметром от 25 мкм до 250 мкм составляет 8,1% и требует дожигания. Вторая схема не обеспечивает эффективное сжигание угля из-за накопления частиц в топочном объёме.*

***Ключевые слова:** встречные вихревые потоки, распределение температур газов в топке, бурый уголь*

UDC 62-664.2

Technological parameters of the combustion process of brown coal in a vortex furnace

V. Norchak¹

¹ Post-graduate student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID 0000-0003-4048-7159

***Abstract.** Ukraine ranks seventh in the international list of countries by the number of coal reserves in the country. Optimal use of this natural resource is the key to active industrial development and the basis for increasing the country's energy independence. There are large deposits of coal on the territory of Ukraine, so historically this type of fuel has been the basis of the energy sector of the economy. Despite extensive experience, the optimal way to burn coal has not been established. Even minor changes in the design of solid fuel furnaces significantly affect the efficiency of the heat transfer process inside the boilers. Therefore, the study of various design features of furnaces is relevant and promising. The results of numerical calculation of the parameters of the process of burning brown coal in a vortex furnace with counter-swirling flows are presented. The fractional composition of the fuel varies from 25 μm to 250 μm . A comparison of fuel and air mixture supply schemes from the bottom of the furnace and from the top of the furnace is performed. It has been shown that the supply of fuel from the bottom of the furnace removes solid ash at the top of the furnace, leads to a more even distribution of flue gas temperatures within the furnace volume and reduces coke content in fuel particles during lignite combustion. The results of numerical simulation of brown coal combustion processes in a vortex furnace with counterflows show that among the three schemes considered, the third scheme with lower fuel supply and removal of solid ash from the top of the furnace has the best characteristics. In this case, 99.4% of the capture of particles is provided, the particles do not accumulate in the furnace volume due to the extraction of ash. However, the mechanical underburning of coke particles with a diameter of 25 μm to 250 μm , which is captured, is 8.1% and requires afterburning. The second scheme does not provide efficient combustion of coal due to the accumulation of particles in the furnace volume.*

Keywords: counter vortex flows, temperature distribution of gases in the furnace, brown coal

Надійшла до редакції / Received 16.06.2021