

УДК 620.9:662.92

## Числове моделювання процесів спалювання твердого палива в топці із зустрічними закрученими потоками

І. О. Редько<sup>1</sup>, А. О. Редько<sup>2</sup>, О. В. Приймак<sup>3</sup>, В. Є. Костюк<sup>4</sup>, О. І. Кирилаш<sup>5</sup>, В. М. Норчак<sup>6</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків, Україна, germes\_s2006@ukr.net

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, andrey.ua-mail@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-2331-7273

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, 02opriymak@gmail.com

<sup>4</sup>к.т.н., с.н.с., в.н.с. НАУ «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, vlakos@ukr.net,  
ORCID: 0000-0003-0142-8060

<sup>5</sup>к.т.н., ас. НАУ «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, kirilashelena@gmail.com,  
ORCID: 0000-0003-2949-3577

<sup>6</sup>асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, super.jeep2000@ukr.net

*Анотація. Метою роботи є числове дослідження процесів спалювання пилоподібного торфу в циліндричній вихровій топці із зустрічними закрученими потоками. Наведено результати комп'ютерного моделювання процесів спалювання низькосортного твердого палива – пилоподібного торфу із вологістю 40 %, зольністю 6 % і вищою питомою теплотою згоряння  $Q_{в.р.}=12,3$  МДж/кг. Визначено поля розподілу температури й швидкості газів і частинок в об'ємі та на виході з топки. Наведено траєкторії руху частинок діаметром 25 мкм і 250 мкм у об'ємі топки. У результаті отримано, що вздовж всієї висоти топки концентрація кисню близька до нуля, на виході з топки концентрація кисню дорівнює 5...6 %, оскільки кисень подають із надлишком ( $\alpha_* = 1,2$ ). Механічний недопал становить 0,06 %. Показано, що топка забезпечує повноту спалювання пилоподібних частинок торфу 99,8 %, летких – 100 %.*

*Ключові слова: числове моделювання, процеси спалювання, тверде паливо, топка котла.*

**Вступ.** Підвищення енергоефективності в системах теплопостачання можливе шляхом застосування низькосортних твердих палив, деревинних і вугільних відходів. Проте шарові топки котельних установок потребують їхньої модернізації для спалювання низькокалорійних твердих палив із високими вологістю й зольністю, полідисперсним складом [1, 2, 3, 4, 5]. Топки з киплячим шаром потребують поліпшення сепарації частинок, що виносяться, та їхнього повернення до топок для допалювання [6]. Вихрові топки є ефективними [3, 7, 8]. Проте вони також характеризуються значним механічним недопалом, що вимагає їхньої модернізації.

**Останні дослідження та публікації.** Вихрова технологія є ефективною сучасною технологією використання твердого палива й пиловидалення. Її широко застосовують в енергетиці з 1970 року [1, 2, 3, 4, 5] і аспіраційних системах [9]. До основних переваг низькотемпературної вихрової (НТВ) технології спалювання належать поліпшені екологічні показники, стійкість запалювання й горіння твердого палива без підсвічування газом або мазутом, використання безмлинових схем підготовки палива. НТВ-технологія спалювання твердого палива може бути реалізованою в традиційній камерній топці шляхом її

модернізації. НТВ-технологія забезпечує спалювання таких твердих палив, як кам'яне й буре вугілля, горючі сланці, торф, відходи обробки деревини та інші види біопалива.

НТВ-технології, реалізовані в камерних топках, використовують принцип організації низькотемпературного спалювання твердого палива в умовах багатократної циркуляції частинок у камерній топці.

У камерних топках організовано дві зони горіння: вихрова й прямоочна. У топці зона активного горіння займає значний об'єм топкового простору, що дозволяє знизити максимальну температуру у вихровій топці на 100-300 °С. Проте, об'єм топки залишається великим, що визначає габарити й металоемність котельного агрегату. У камерній топці, що реалізує розімкнену вихрову схему топкового процесу, крупні вихори не забезпечують цілісність потоку.

Для котлів тепловою потужністю від 4 до 30 МВт є ефективним застосування технології високотемпературного киплячого шару, що циркулює. Проте висока швидкість руху газів і частинок вимагають значних габаритів топкового об'єму, а багатократна циркуляція твердих частинок потребує високоефективних сепараційних пристроїв.

**Актуальність дослідження.** Циклонно-

вихрова технологія спалювання твердого палива дозволяє зменшити топковий об'єм котельного агрегату, його габарити і масу. Інтенсивне перемішування частинок палива і повітря в закрученому потоку забезпечує інтенсивний тепломасообмін і спалювання палива. Для котлів тепловою потужністю менше 30 МВт організувати НТВ-технологію складно.

Використання циклонно-вихрової технології у передтопках котлів для спалювання рідких і газоподібних палив дозволяє розміщувати передтопки в топковому об'ємі котлів [7, 8]. Цю технологію для спалювання твердих палив досліджено недостатньо.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є числове дослідження процесів спалювання пилоподібного торфу в циліндричній вихровій топці із зустрічними закрученими потоками.

**Методика дослідження.** При математичному описі фізико-хімічних процесів у топці приймали такі основні припущення:

- течія несучого газового середовища є тривимірною, квазістаціонарною, турбулентною, нестисливою, багатоконпонентною, в якій перебігають хімічні реакції;
- швидкість газозфазних хімічних реакцій є нескінченно великою;
- газова суміш знаходиться в стані термодинамічної рівноваги;
- плавучістю, об'ємною в'язкістю, в'язким нагрівом нехтуємо;
- частинки торфу є сферичними, полідисперсними;
- об'ємом, який займають частинки, нехтуємо;
- при горінні торфових частинок перебігають процеси виходу і займання летких і вигоряння коксового залишку;
- враховано теплообмін випромінюванням;
- турбулентність є ізотропною;
- частинки не впливають на параметри турбулентності;
- враховано турбулентне розсіювання частинок.

Пилоторфову аеросуміш моделювали як двофазну суміш із ейлеровим описом газової фази (суцільне середовище) й лагранжевим описом руху частинок торфу (траєкторна модель). Взаємодію фаз враховували на основі моделі «частинка – джерело в комірці», згідно з якою наявність частинки в потоку виявляється через додаткові джерела в рівняннях збереження суцільної фази [10]. Вважали, що миттєвий термохімічний стан потоку однозначно

визначається консервативною скалярною величиною – безрозмірною функцією Шваба-Зельдовича  $f$ , яка має сенс масової долі відновленого палива. Взаємодію хімічних процесів і турбулентності описували статистично за допомогою функції густини розподілу імовірності [11, 12, 13, 14, 15].

При зроблених вище припущеннях поведінку газової фази можливо описати системою диференціальних рівнянь у частинних похідних (ДРЧП), яку складено з усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, двох рівнянь диференціальної моделі турбулентності  $k$ - $\varepsilon$  типу [11], рівнянь збереження для безрозмірних функцій Шваба-Зельдовича  $f_n$  і для пульсацій цих функцій  $g_n = f_n^2$  [12] й інтегродиференціального рівняння переносу випромінювання [13].

Дискретизацію вихідних ДРЧП здійснювали методом контрольних об'ємів. Розв'язок отриманих у результаті систем лінійних алгебраїчних рівнянь виконували методом Гауса-Зейделя із застосуванням алгоритму SIMPLE [15]. Інтегро-диференціальне рівняння розв'язували методом сферичних гармонік [16]. Інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь здійснювали методом Рунге-Куты. Для розрахунку умов хімічної рівноваги застосовували алгоритм, оснований на мінімізації вільної енергії Гіббса.

Траєкторії частинок торфу моделювали шляхом інтегрування рівняння балансу сил, що діють на частинку, яке урівнює інерцію частинки із силою аеродинамічного опору.

Тепломасообмін частинок описували трьома моделями: моделлю теплообміну інертної частинки, моделлю виходу летких і моделлю вигоряння коксового залишку [14].

Рішення відшукували в розрахунковій області, що відповідала проточній частині топки. Розрахункову область було покрито нерівномірною комбінованою сіткою, яку складено з 64265 контрольних комірок (рис. 1).

На межах розрахункової області задавали такі граничні умови суцільної фази: на вхідних ділянках – значення незалежних змінних; на стінках – умови прилипання; на вихідній ділянці – «м'які» граничні умови. Для опису турбулентного примежового шару застосовували емпіричні пристінкові функції [13].

При моделюванні дискретної фази задавали початкові умови для кожної розрахункової частинки: положення частинки (координати  $x_j$ ), її швидкість (компоненти  $u_{ps}$ ), діаметр, температуру, а також масову витрату частинок, що прямують вздовж траєкторії.

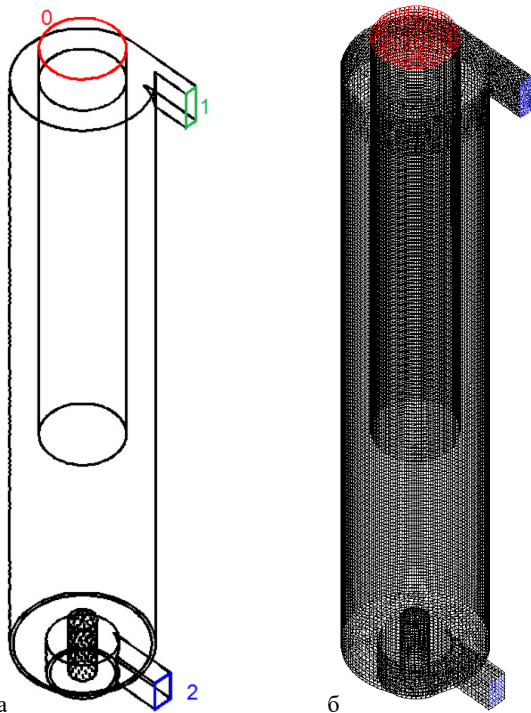


Рис. 1. Конструкція топки із зустрічними закрученими потоками:  
а – розрахункова область, б – розрахункова сітка:  
1 – вхід аеросуміші; 2 – вхід вторинного повітря;  
0 – вихід топкових газів

Прийнято, що при зіткненні зі стінками частинки пружно відбиваються від них. В основу створення топки із зустрічними закрученими потоками (рис. 1) покладені дослідження [9]. Зовнішній діаметр топки дорівнює 200 мм, а висота топки становить 3465 мм. Теплова потужність топки становить 2,5 МВт. Сумарний коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha_e = 1,25$ . 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 %. Стехіометричний коефіцієнт торфу  $L_0 = 7$ . Температура початку виходу легких торфу 100 °С. Вища питома теплота згоряння торфу (на робочу масу)  $Q_{e.p.} = 12,3$  МДж/кг.

**Аналіз результатів.** Результати чисельного дослідження показано на рисунках 2 і 3. Поля розподілу температури газів у топковому об'ємі показано на рис. 2 а. Як видно, температура газів збільшується вздовж висоти топки й сягає значення 1711 °С на виході з топки. Далі гази, очищені від твердих частинок, надходять в область топки, екрановану трубними пучками, й охолоджуються. Повноту спалювання частинок твердого палива підтверджують поля розподілу кисню по висоті топки (рис. 2б).

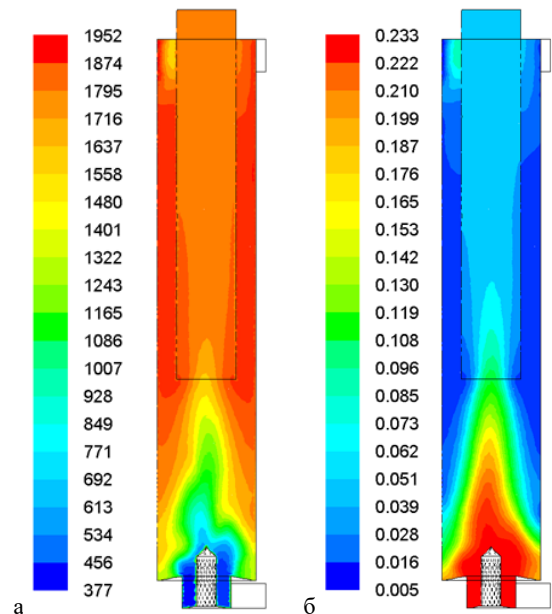


Рис. 2. Розподіл параметрів газової фази в поздовжньому перерізі топки із зустрічними закрученими потоками:  
а – температура газів, б – масова доля кисню

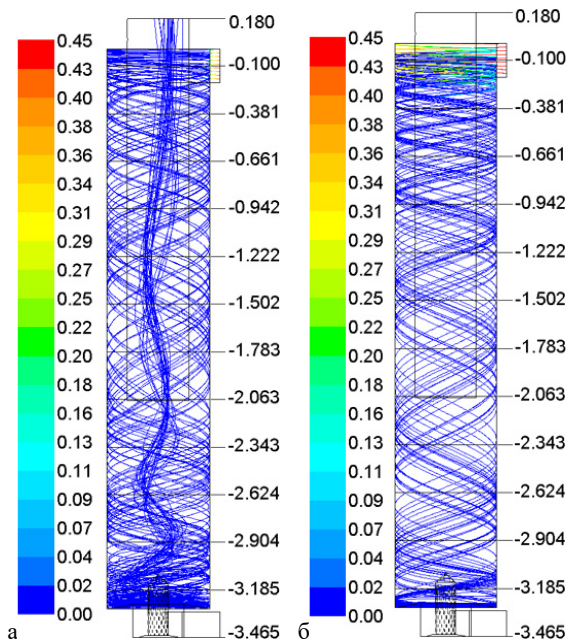


Рис. 3. Траєкторії частинок торфу з різним початковим діаметром  $d_{i,0}$ , мкм, пофарбовані відповідно до масової частки вологи в їхньому складі; праворуч – шкала висоти, м: а –  $d_{i,0} = 25$  мкм, б –  $d_{i,0} = 250$  мкм

Вздовж всієї висоти топки концентрація кисню близька до нуля. На виході з топки концентрація кисню дорівнює 5...6 %, оскільки кисень подають із надлишком ( $\alpha_e = 1,2$ ). Механічний недопал становить 0,06 %.

Траєкторії руху твердих частинок показано на рис. 3. Видно вплив діаметра твердих частинок. Грубі частинки значний час перебувають у топці до повного згоряння. Частинки малого діаметра (близько 25 мкм) знаходяться у топці

недовго, але достатньо для їхнього згоряння. При спалюванні торфу при високій температурі в топковому об'ємі можливо утворення рідкого шлаку, який видаляють через отвір у нижній частині топки.

**Висновки.** Результати чисельного дослідження показали, що діаметр частинок торфу впливає на процес їхнього згоряння: кокс частинок із початковим діаметром від 25 мкм до

250 мкм вигоряє на 96 %. Зі збільшенням діаметра частинок до 1000 мкм ступінь вигорання коксу зменшується, але водночас знижується їхній винос. У цілому результати моделювання вказують на ефективність використання технології спалювання пилоподібних низькокалорійних твердих палив у циліндричних вихрових топках із зустрічними закрученими потоками.

### Література

1. Серант Ф. А. Сжигание немолодых азейских бурых углей в низкотемпературной вихревой топке по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10 / Ф. А. Серант, С. М. Шестаков, В. В. Померанцев и др. // Теплоэнергетика. – 1983. – № 7. – с. 35-41.
2. Померанцев В. В. Опытно-промышленный котёл БКЗ-420-140-9 с низкотемпературной топкой ЛПИ / В. В. Померанцев // Энергомашиностроение. – 1985. – № 8. – с. 32-34.
3. Рундыгин Ю. А. Модернизация котлов на основе низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив / Ю. А. Рундыгин, В. Е. Скудицкий, К. А. Григорьев и др. // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2000. – № 4. – с. 19-22.
4. Финклер Ф. З. Зажигание дробленых назаровских углей на котле ПК-38 по схеме «Политехэнерго» / Ф. З. Финклер, И. Б. Кубышкин, А. Г. Митрюхин и др. // Новое в Российской электроэнергетике. – 2005. – № 5. – с. 35-41.
5. Шестаков С. М. Технология сжигания местных видов твердого топлива / С. М. Шестаков, А. Л. Аронов. – ESCO, 2014.
6. Баскаков А. П. Котлы и топки с кипящим слоем / А. П. Баскаков, В. В. Мацнев, И. В. Раскопов. – Москва: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
7. Штым А. Н. Котельные установки с циклонными предтопками / А. Н. Штым, К. А. Штым. – Владивосток : издат. дом Дальневосточный федеральный университет, 2012. – 421 с.
8. Штым К. А. Совершенствование циклонно-вихревой технологии сжигания топлива: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 05.14.04 / К. А. Штым; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет». – Красноярск, 2015. – 36 с.
9. Сажин Б. С. Вихревые пылеуловители / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. – Москва: Химия, 1995. – 194 с.
10. Кроу Д. Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц / Д. Кроу // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – № 32. – с. 114 – 122.
11. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding // Academic Press, London, 1972.
12. Jones W. P. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review / W. P. Jones, J. H. Whitelaw // Combust and Flame. – 1982. – vol. 48. – pp. 1-26.
13. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский – Москва: Наука, 1978. – 736 с.
14. 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. – no 4. – pp. 521-530.
15. Vandoormaal J. P. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows / J. P. Vandoormaal, G. D. Raithby // Numer. Heat Transfer. – 1984. – no 7. – pp. 147-163.
16. Суржигов С. Т. Тепловое излучение газов и плазмы / С. Т. Суржигов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 544 с.

### References

1. Serant F. A., Shestakov S. M., Pomerancev V. V. i dr. “Szhiganie nemolodykh azeiskikh burykh uglei v nizkotemperaturnoi vikhrevoi topke po skheme LPI-ITEC-10”, *Teploenergetika*, no 7, 1983.
2. Pomerantsev V. V. “Opytno-promyshlenni kotel BKZ-420-140-9 s nizkotemperaturnoi topkoi LPI”, *Energomashynostroenie*, no 8, 1985.
3. Rundygin V. V., Skuditskii V. E., Grigorev K. A. i dr. “Modernizaciia kotlov na osnove nizkotemperaturnoi vikhrevoi tekhnologii szhyganiia tverdykh topliv”, *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiia*, no 4, 2000.
4. Finkler F. Z., Kubyshkin I. B., Mitriukhin A. G. i dr. “Zazhiganie droblenykh nazarovskikh uglei na kotle PK-38 po scheme “Politekhenego”, *Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike*, no 5, 2005.
5. Shestakov S. M., Aronov A. L. *Tekhnologiia szhyganiya mestnykh vidov tverdogo topliva*, ESCO, 2014.
6. Baskakov A. P., Matsnev V. V., Raskopov I. V. *Kotly i topki s kipyashchim sloem*. Energoatomizdat, 1996.
7. Shtym A. N., Shtym K. A. *Kotelnye ustanovki s tsyclonnyimi predtopkami*. Izdat. Dom Dalnevostochnyi federalnyi universitet, 2012.
8. Shtym K. A. *Sovershenstvovanie tsyklonno-vikhrevoi tekhnologii szhyganiia topliva*. Diss. abstract. Dalnevost-

tochnyi federalnyi universitet, 2015.

9. Sazhin B. S., Gudim L. I. *Vikhrevye pyleuloviteli*. Khimiia, 1995.

10. Krou D. "Chislennye modeli techenii gaza s nebolshim soderzhaniem chastits", *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*, no 32, 1982.

11. Launder B. E. "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", *Academic Press*, 1972.

12. Jones W. P., Whitelaw J. H. "Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review", *Combust. Flame*. Whitelaw, vol. 48, 1982.

13. Loitsianskii L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*, Nauka, 1978.

14. Badzioch S., Hawksley P. G. W. "Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 9, no 4, 1970.

15. Vandoormaal J. P., Raithby G. D. "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", *Numer. Heat Transfer*, no 7, 1984.

16. Surzhikov S. T. *Teplovoe izluchenie gazov i plazmy*, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2004.

## УДК 620.9:662.92

### Численное моделирование процессов сжигания твёрдого топлива в топке со встречными закрученными потоками

И.А. Редько<sup>1</sup>, А.А. Редько<sup>2</sup>, А.В. Приймак<sup>3</sup>, В.Е. Костюк<sup>4</sup>, Е.И. Кирилаш<sup>5</sup>, В.М. Норчак<sup>6</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Харьковский национальный университет городского хозяйства им А.Н. Бекетова, г. Харьков, Украина, germes\_s2006@ukr.net

<sup>2</sup>д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

<sup>3</sup>д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02opriymak@gmail.com

<sup>4</sup>к.т.н., с.н.с., в.н.с. НАУ «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, vlakos@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0142-8060

<sup>5</sup>к.т.н., ас. НАУ «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, kirilashelena@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2949-3577

<sup>6</sup>асп. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, super.jeep2000@ukr.net

*Аннотация. Целью работы является численное исследование процессов сжигания пылевидного торфа в цилиндрической вихревой топке со встречными закрученными потоками. Приведены результаты компьютерного моделирования процессов сжигания низкосортного твёрдого топлива – пылевидного торфа с влажностью 40 %, зольностью 6 % и высшей удельной теплотой сгорания  $Q_{в.р.} = 12,3$  МДж/кг. Определены поля распределения температуры и скорости газов и частиц в объёме и на выходе из топки. Приведены траектории движения частиц диаметром 25 мкм и 250 мкм в объёме топки. В результате получено, что по всей высоте топки концентрация кислорода близка к нулю, а на выходе из топки концентрация кислорода составляет 5-6%, поскольку кислород подаётся с избытком ( $\alpha_v=1,2$ ). Механический недожог составляет 0,06%. Показано, что топка обеспечивает полноту сжигания пылевидных частиц торфа 99,8%, летучих - 100%.*

*Ключевые слова: численное моделирование, процессы сжигания, твёрдое топливо, топка котла.*

UDC 620.9:662.92

## Numerical Simulation of Combustion Processes of Solid Fuel in a Furnace with Counter-Current Twisted Streams

I. Redko<sup>1</sup>, A. Redko<sup>2</sup>, A. Priymak<sup>3</sup>, V. Kostyuk<sup>4</sup>, E. Kirilash<sup>5</sup>, V. Norchak<sup>6</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkov, Ukraine, germes\_s2006@ukr.net ORCID: 000-0000-0000-0000

<sup>2</sup>ScD, professor, Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

<sup>3</sup>Ph.D, prof. Kiev National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02opriymak@gmail.com

<sup>4</sup>Ph.D, NAU "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, vlakos@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0142-8060

<sup>5</sup>PhD, assistant professor, NAU "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, kirilashelena@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2949-3577

<sup>6</sup>Post-graduate student, Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, Ukraine, super.jeep2000@ukr.net

*Abstract. The purpose of the work is numerical research of the powdered peat processes in a cylindrical vortex furnace with counter current twisted flows. The results of computer simulation has been presented for burning processes of low-grade solid fuel (powdered peat) with humidity of 40 %, ash content of 6 % and higher specific heat of combustion  $Q_h = 12.3$  MJ/kg. The fields of temperature distribution and gases velocity and particles in volume and at the exit from the furnace are obtained. The particle motion trajectories with a diameter of 25 microns and 250 microns in volume of heating are obtained. It has been calculated that the concentration of oxygen is close to zero along the height of heating. At the outlet of the furnace the concentration of oxygen is equal to 5...6%, since oxygen is supplied from excess ( $\alpha_v = 1,2$ ). Mechanical underburning is 0.06 %. It has been shown that the furnace provides the complete burning of 99.8 % for powdered particles of peat and 100% for volatile particles.*

*Keywords: numerical simulation, combustion processes, solid fuel, boiler heating*

*Надійшла до редакції / Received 09.10.2017*