

УДК 662, 66-6

Ю.В. Радич, магістрант

Т.Б. Шилович, канд. техн. наук

Національний технічний університет України "КПІ", м. Київ, Україна

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ НИЗЬКОКАЛОРИЙНОГО ПАЛИВА У ВИГЛЯДІ ПИЛУ

Розглянуто процес спалювання твердого подрібненого палива у потоці. Розроблено математичну та числову моделі нестационарного дифузійного згоряння подрібненого твердого палива. Проведено верифікацію розробленої числової моделі теплогідродинамічного стану торф'яного пальника.

Ключові слова: торф, подрібнене (пилоподібне) паливо, спалення у потоці, топка-реактор.

Рассмотрен процесс сжигания твердого измельченного топлива в потоке. Разработана математическая и числовая модели нестационарного диффузионного сгорания измельченного твердого топлива. Проведена верификация разработанной числовой модели теплогидродинамического состояния торфяной горелки.

Ключевые слова: торф, измельченное (пылевидное) топливо, сжигание в потоке, топка-реактор.

This work shows the process of hard grinded fuel burning. The mathematical and digital models of non-standard diffusion burning are developed for this purpose. It also depicts the verification of a developed digital model of a peat-fueled burner's thermo-hydrodynamic states.

Key words: peat, grinded fuel, burning in the flow, reactor fuelbox.

Вступ. Україна належить до числа держав світу, які мають запаси всіх видів паливно-енергетичної сировини (нафта, природний газ, вугілля, торф, уран та ін.), але ступінь забезпеченості запасами, їх видобуток та використання неоднакові й у сукупності вони не створюють необхідний рівень енергетичної незалежності. Геологічні запаси торфу в Україні становлять близько 2,17 млрд т [6]. Унікальною властивістю цієї корисної копалини є здатність до відновлення [1]. Щорічно на торфових родовищах, збережених у природному стані, та заболочених землях утворюється близько 1,6 млн т торфу або 0,65 млн т умовного палива.

Сьогодні використання торфу стає все актуальнішим через зростання цін на енергоносії, застосування нових технологій переробки та спалювання торфу, що дозволяють автоматизувати такий процес. Україна має достатньо запасів твердого палива, перехід на яке надав би можливість зупинити зростання собівартості теплової енергії комунальної теплоенергетики та зменшити енергетичну залежність держави.

Аналіз досліджень і публікацій. Використання торфу як палива обумовлено його складом: великим вмістом вуглецю, малим вмістом сірки, шкідливих негорючих залишків та домішок. Основними недоліками цього виду палива є: невисока теплота згоряння (8,38-10,72 МДж/кг); більш низька, ніж у вугілля енергетична калорійність і труднощі спалювання за високого вмісту вологи (до 65 %). Проте цей вид палива має: низьку собівартість виробництва; екологічну чистоту згоряння (малу частку сірки); повне горіння (малий залишок золи), що робить торф перспективним джерелом отримання теплової та електричної енергії, яка є більш дешевою, ніж під час використання кам'яного вугілля і рідкого палива та більш екологічно чистою [5]. Незважаючи на це, питання щодо використання торфу як палива з розвитком сучасних технологій спалювання і застосування екологічно чистих процесів одержання енергії є недостатньо вивченим. Провідні вчені і фахівці оцінюють використання торфу як палива найбільш перспективним розвитком енергетики в наступному столітті.

Найпоширенішим способом використання торфу є спалення брикетованого торфу для отримання теплової енергії. Тому розроблення комплексу, який дозволить комплексно підготувати торф до використання з максимальною ефективністю та з мінімальними витратами на його попередню підготовку, є актуальним технічним завданням.

У зв'язку з цим **метою роботи** є аналіз особливостей роботи і дослідження гідродинаміки та теплового стану топки-реактора під час спалювання твердого подрібненого торфу у потоці.

Постановка проблеми. У представлений роботі розглядається технологія спалювання твердого подрібненого палива у потоці.

Математична модель. Фізичну модель реактора для спалювання подрібненого (пилоподібного) палива можна сформулювати таким чином. Реактор складається з топки, що являє собою циліндричну обичайку, яка всередині футерована вогнеликими матеріалами, пальника для розігріву топки і підпалювання твердого палива, пальника подрібненого палива і вентиляторів (рис. 1).

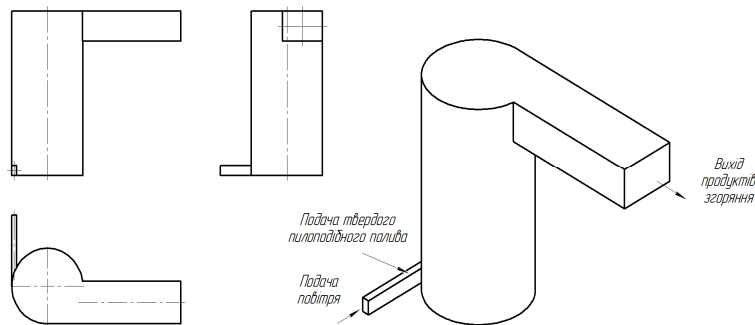


Рис. 1. Схема реактора для спалювання подрібненого палива

Робота реактора (установки) починається з підпалювання пальника розігріву, що працює на скрапленому газі. Після розігріву футеровки реактора запускається пальник твердого палива. Під час виходу на усталений режим горіння пилоподібного палива, пальник розігріву і підпалу переходить у черговий режим (тобто пальник не працює, але при необхідності підтримки процесу горіння може включатися автоматично).

Відповідно до сформульованої фізичної моделі (рис. 3) математична модель нестационарного дифузійного згоряння подрібненого твердого палива в турбулентному потоці може бути побудована на базі осереднених за Рейнольдсом рівнянням Нав'є-Стокса в наближенні $k - \epsilon$ моделі з врахуванням стисливості рідини [8] і включити в себе рівняння нерозривності, збереження кількості руху, транспорту хімічних компонентів реакції горіння, енергії в ентальпійному вигляді, турбулентної кінетичної енергії і швидкості її дисипації [9]:

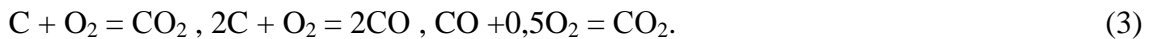
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}}) = 0; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}}}{\partial \tau} + (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{V}} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_{\text{eff}} + \bar{\rho} \mathbf{g}; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}} \tilde{Y}_k) = \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_k + \bar{\omega}_k, \quad k = \overline{1, N}; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}} \tilde{h}) = \bar{\omega}_t + \frac{Dp}{D\tau} + \nabla \cdot \left(\lambda \nabla T + \frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla h \right) + \bar{\tau}_{\text{eff}} : (\nabla \cdot \mathbf{V}) - \nabla \cdot \left(\rho \sum_{k=1}^N \mathbf{J}_k h_k \right) + E(\tilde{T}); \\ \frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \bar{\rho} \epsilon - Y_M; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \epsilon}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{V}} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \bar{\rho} C_1 S \epsilon - \bar{\rho} C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b. \end{array} \right. \quad (1)$$

Перший член у правій частині рівняння енергії (1) пов'язаний з джерелом теплоти хімічної реакції, другий – з роботою тиску, третій – з теплопровідністю, четвертий – з дисипацією в'язкості, п'ятий – з дифузиею компонентів хімічної реакції і шостий – з тепловим випромінюванням.

Для твердих елементів реактора система рівнянь (1) спрощується до одного рівняння енергії (теплопровідності) виду

$$\frac{\partial \rho h}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (2)$$

Аналіз горіння подрібненого твердого палива в реакторі ґрунтується на таких основних реакціях:



Реакції (3) визначаються стехіометричними коефіцієнтами і миттєвими термодинамічними параметрами, від яких залежить їх швидкість. Турбулентне змішування реагентів є фактором, що обмежує швидкість реакції. Турбулентно-хімічна взаємодія під час горіння за реакціями (3) описується за допомогою двох моделей: перша – модель обмеженої швидкості реакції на основі закону Ареніуса [9]; друга – модель вихрової дисипації (Магнусен) [10]. У результаті використовується менше з отриманих значень за швидкістю реакції.

Числова модель. Для проведення числового аналізу гідродинаміки газових потоків, динаміки руху твердого подрібненого палива і теплового стану під час спалювання торфу у топці-реакторі виконано розроблення тривимірної числової моделі. Дискретизація тривимірної числової моделі топки-реактора для спалювання торфу представлена на рис. 2 [7; 4].

Представлена числова модель дозволяє виконувати розрахунки теплового стану пального обладнання при різних технологічних параметрах, зокрема при різних витратах повітря та твердого палива, а також враховувати різні фізичні властивості вихідного торфу – його вологість та вміст золи.

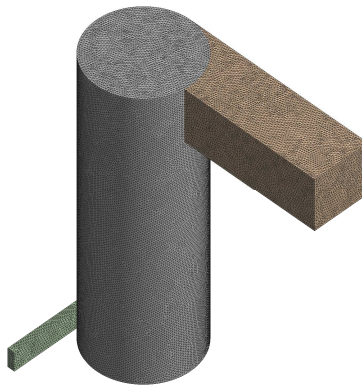


Рис. 2. Дискретизація твердотільної моделі реактора – топки для спалювання торфу
($N_{el} = 2753603$ – кількість елементів, $N_{nod} = 478524$ – кількість вузлів)

Результати роботи. Розроблено та виготовлено експериментальну установку для спалювання та сушіння торфу на підприємстві ДП «Помгазпарат». Схема сушки та подрібнення представлена на рис. 3.

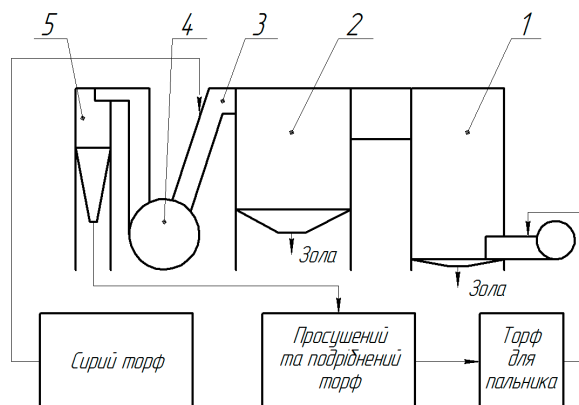


Рис. 3. Схема сушки та подрібнення вологого торфу:

1 – топка-реактор; 2 – золоосаджувальна камера; 3 – газохід; 4 – дробарка-сушарка; 5 – циклон

Торф за допомогою вентиляторів подається у топку-реактор, а разом з ним надходить і повітря, що необхідне для процесу горіння. Значні витрати повітря забезпечуються вентилятором подачі торфу та основним вентилятором. У топці-реакторі тверде паливо згоряє, виділяючи при цьому теплоту та утворюючи продукти згоряння. Далі відхідні гази надходять у пилозбірну камеру, де видаляється зола та пилоподібні залишки твердого палива. Потім димові гази надходять до газоходу, куди одночасно подається сировина – торф. Матеріал інтенсивно підсушується та надходить до дробарки-сушарки, в якій торф подрібнюється до потрібної тонини та підсушується. Отриманий кінцевий продукт відділяється від димових газів за допомогою циклону. Частина подрібненого та підсушеного торфу використовується як тверде пилоподібне паливо в торф'яному пальнику топки-реактора.

Організація ефективного процесу спалювання твердого подрібненого палива – це складне технологічне завдання. Ефективним рішенням може бути конструкція топки-реактора, яка дозволяє спалювати подрібнений торф і отримувати теплоту з одночасним видаленням золи, що утворюється у процесі горіння. Вказаним вимогам відповідає така конструкція (рис. 4).

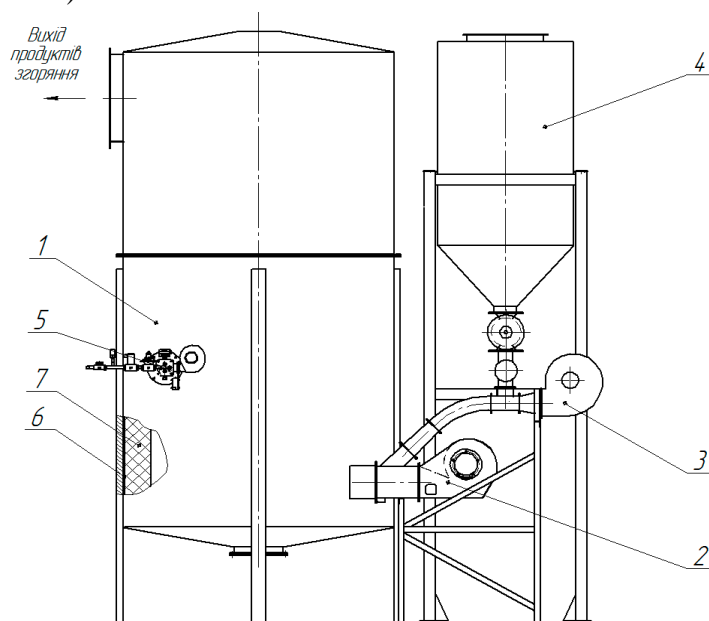


Рис. 4. Реактор для спалювання подрібненого палива (торфу, коксу):

1 – топка-реактор; 2 – вентилятор подачі повітря; 3 – вентилятор для подачі подрібненого палива;
4 – витратний резервуар з подрібненим паливом; 5 – пальник для розігріву топки і підпалювання
твердого палива; 6 – сталеві обичайки; 7 – вогнетривка футеровка

Топка-реактор являє собою циліндр, футерований вогнетривкими матеріалами. Тангенціально до обичайки реактора підводиться повітря та тверде паливо. Така схема приводить до того, що повітря разом з гранулами палива рухається по спіралі вздовж стінок реактора у турбулентному потоці, що підвищує ефективність процесу його горіння.

Результати числових експериментів. Розрахунки гідродинаміки та теплового стану топки-реактора під час спалювання твердого подрібненого торфу проводились при таких вихідних даних: основний вентилятор та вентилятор подачі торфу разом нагнітають повітря, яке рухається зі швидкістю $v = 20$ м/с; торф подається у кількості $G = 0,1$ кг/с; стінки топки-реактора футеровані вогнетривким матеріалом та оточені сталеву обичайкою, що віддає частину теплоти через конвективний теплообмін з навколишнім середовищем.

Аналіз отриманих даних показує в цілому високу ефективність роботи пальника для згоряння твердого палива – торфу. Результати числових експериментів показують, що під час згоряння торфу виділяється 0,96 МВт теплової енергії, вихід продуктів горіння (димових газів) становить 9648 м³/год з температурою 846 °С.

Розроблена числова модель пройшла верифікацію на експериментальних даних, що отримані на реальному прототипі топки-реактора для спалювання твердого подрібненого палива – торфу. Результати запусків та виходу на стаціонарний режим роботи підтверджують ефективність та конкурентоспроможність цього обладнання.

Порівняння робочих параметрів, що отримані за допомогою числової моделі тепло-гідродинамічного стану топки-реактора, з даними експериментальної установки наведені у табл.

Таблиця

Результати верифікації числової моделі теплогідродинамічного стану топки-реактора на експериментальних даних, одержаних на експериментальному обладнанні для спалювання твердого подрібненого палива

Технологічні параметри	Числова модель топки-реактора для спалювання твердого палива – торфу	Експериментальна установка для спалювання твердого палива – торфу
Витрати твердого палива, кг/год	360	360
Вологість твердого палива, %	30	30
Теплова потужність, МВт	0,96	1,1
Об'єм продуктів згоряння, м ³ /год	9648	12000
Температура продуктів згоряння, °С	846	400–800
Вміст CO ₂ у продуктах згоряння, %	11,5	12,1

Аналіз даних (табл.) показує узгодження між даними результатів розрахунків фізичних полів і параметрів експлуатації топки-реактора для спалювання твердого подрібненого палива – торфу з даними натурних експериментів, що були отримані на експериментальному обладнанні. Похибка розрахункових даних оцінюється в межах 5–20 %, що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків режимів експлуатації топки-реактора для згоряння подрібненого твердого палива.

Висновки

1. Розроблено та виготовлено експериментальну установку для спалювання та сушіння торфу на підприємстві ДП «Помгазапарат». Результати експериментальних запусків та вихід на стаціонарний режим роботи розробленої установки підтвердили її здатність роботи та енергоефективність.

2. Розроблено математичну модель нестационарного дифузійного згоряння подрібненого твердого палива.

3. Розроблено числову модель топки-реактора, яка дозволяє теоретично дослідити процес спалювання подрібненого палива у потоці, вибрати конструкцію топки-

реактора, що відповідає параметрам технологічного процесу та відпрацювати раціональний регламент експлуатації обладнання.

4. Виконано верифікацію розробленої числової моделі теплогідродинамічного стану торф'яного пальника за даними натурального експерименту, яка показала, що похибка розрахункових даних оцінюється в межах 5–20 %, що є цілком достатнім для виконання інженерних розрахунків режимів експлуатації топки-реактора для згоряння подрібненого твердого палива.

5. Розроблені методики та на їх базі числові моделі теплового та гідродинамічного стану із врахуванням руху твердих частинок палива та їх горіння рекомендовано застосувати для порівняльного аналізу енергетичної ефективності діючої і модернізованих конструкцій топки-реактора, а також відпрацьовувати раціональні технологічні регламенти його експлуатації.

Список використаних джерел

1. *Богданов Н. Н.* Полукоксование и газификация торфа / Н. Н. Богданов. – М. : Госэнергоиздат, 1947. – 268 с.
2. *Коринчук Д. М.* Исследование массовой теплоты сгорания и зольности композиционных торфяных брикетов / Д. М. Коринчук, Ю. Ф. Снежкин, В. А. Михайлик // Возобновляемая энергетика. – 2008. – № 3. – С. 76-82.
3. *Коринчук Д. М.* Исследование структурно-механических свойств композиционных брикетов на торфяной основе с использованием органических бытовых отходов / Д. М. Коринчук, В. А. Михайлик, К. О. Коринчук // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 53-58.
4. *Краснощеков Е. А.* Задачник по теплопередаче : учеб. пособие / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1969. – 264 с.
5. *ООО Строй Неруд.* Образование торфа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nerud-m.ru/>.
6. *Родовица торфу* [Електронний ресурс]. – Дата доступу : лют., 2013. – Режим доступу : http://plast.vn.ua/0104_5.html.
7. *Физические величины* : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. *A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation* / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // Computers Fluids. – 1995. – Vol. 24, No. 3. – P. 227-238.
9. *Poinsot T.* Theoretical and numerical combustion / Thierry Poinsot, Denis Veynante. – 2nd ed. – Philadelphia : Edwards, 2005. – 522 p.
10. *Magnussen B. F.* On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute. – Pittsburgh, 1976 – P. 719-727.