

© В.Г. Лозинський¹¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРИ СТІНКИ ПІДЗЕМНОГО КАНАЛУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ

© V. Lozynskyi¹¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

NUMERICAL ANALYSIS OF WALL TEMPERATURE IN UNDERGROUND CHANNEL DURING PULVERIZED COAL COMBUSTION MODELING

Мета. Визначення оптимального підходу до оцінки температурних характеристик стінки каналу та його аналіз при чисельному моделюванні горіння вугільного пилу.

Методика. Дослідження проведено шляхом чисельного моделювання процесу горіння вугільного пилу в циліндричному каналі довжиною 30 м та діаметром 1 м, який формується після бурошнекового видобутку вугілля. Для моделювання використано програмний продукт Ansys Fluent із застосуванням моделі незмішуваного горіння та k-ε моделі турбулентності. Розрахунки виконано для часових інтервалів 1, 12, 24, 36 і 48 годин.

Результати. Аналіз отриманих температурних полів показав, що максимальна температура в зоні горіння зростає з 1220°C (1 година) до 1540°C (24 години). Процес стабілізується на 12-ту годину із температурою 1490°C. Виявлено, що температура в каналі швидко падає після 7–10 м від входу, стабілізуючись на рівні 490–520°C. Основною причиною втрат тепла є висока теплопровідність вміщуючих порід. Визначено, що параметр T_{wall} найбільш адекватно відображає реальний температурний режим стінки та дозволяє оцінити термічний стан системи.

Наукова новизна. Вперше проведено комплексний аналіз динаміки температурного поля стінки каналу при тривалому горінні вугільного пилу в каналі пласта вугілля. Визначено критичні зони теплових втрат та стабілізації температури, що дозволяє обґрунтовано вибрати оптимальний параметр температури стінки для чисельного моделювання. Отримано показники зміни процентного розподілу статичної температури в каналі та температури стінки навколо каналу з часом.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методик чисельного моделювання процесів підземного спалювання та когазифікації вугілля. Визначені закономірності розподілу температури дозволяють оптимізувати параметри подачі палива та повітря для покращення ефективності термохімічних перетворень. Запропонований підхід може бути застосований при проектуванні технологій когазифікації.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, горіння вугільного пилу, температура стінки, теплопередача, когазифікація.

Вступ. Вугілля є ключовим викопним паливом для забезпечення світового паливно-енергетичного балансу, забезпечуючи значну частку електроенергії та промислового виробництва. Незважаючи на зростання частки відновлюваних джерел енергії, вугілля залишається стратегічно важливим паливом для багатьох країн, включаючи Україну [1, 2].

Значні запаси кам'яного та бурого вугілля дозволяють розглядати цей ресурс як основу для розвитку сучасних технологій газифікації, когазифікації та ефективного використання вугільного палива.

Горіння вугільного пилу є складним фізико-хімічним процесом, що супроводжується інтенсивним теплообміном між газовими продуктами горіння та стінками каналу [3]. В умовах газифікації, спалювання або когазифікації, коли термохімічні процеси відбуваються в циліндричному каналі вугільного пласта з обмеженою геометрією, особливого значення набуває правильний вибір методу оцінки температури стінок каналу. Оскільки температурні режими визначають ефективність процесів горіння та газифікації, важливо враховувати як теплофізичні характеристики матеріалу стінок, так і механізми передачі тепла від газової фази до твердої поверхні [4–6]. Неправильна оцінка температури може призвести до неточностей у прогнозуванні процесу вигорання палива, а також неконтрольованого теплового розширення порід, що впливає на стійкість гірського масиву [7].

Комп'ютерне моделювання процесу горіння вугільного пилу в циліндричному каналі вугільного пласта дає змогу визначити температурний розподіл в матеріалах стінки. Оцінка цього параметра дає змогу визначити теплове навантаження на стінки та потенційну зону руйнування вміщуючих порід, аналізувати глибину прогрівання вугільного пласта й оптимізувати умови горіння для здійснення стабільного процесу газифікації та когазифікації. Крім того, чисельне моделювання дає можливість дослідити вплив різних параметрів, таких як швидкість подачі палива та окислювача, склад газового середовища, рівень турбулентності та теплофізичні властивості гірських порід. Коректна оцінка дає змогу не лише прогнозувати температурний режим, а й оцінювати довготривалу стійкість стінок каналу до термічних навантажень, що є критично важливим при проєктуванні термохімічних процесів перетворення вугілля в генераторний газ.

Чисельне моделювання горіння вугільного пилу охоплює багатофазні фізико-хімічні процеси, такі як турбулентність, радіація, виділення летких речовин тощо [8, 9]. Для ефективного моделювання використовуються підходи Ейлера-Лагранжа та дворівневі моделі турбулентності. Виділення летких компонентів у більшості досліджень описується скінченно-швидкісними або феноменологічними моделями, тоді як реакції коксу моделюються з урахуванням дифузійно-кінетичного контролю або внутрішніх механізмів горіння [8].

Методи прогнозування поширення полум'я, швидкостей горіння і структури полум'я в сумішах вугільного пилу і повітря були розроблені в роботах [10]. Вони враховують гетерогенні поверхневі реакції, газофазне горіння летких речовин, а також вплив швидкості нагріву частинок на виділення летких компонентів [10, 11]. Крім того, розглядаються нестационарні моделі, що враховують процеси піролізу твердого палива, горіння газової фази, масо- та тепловиренесення [12].

На сьогодні для прогнозування процесів горіння пиловугільного палива широко застосовують методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) [13]. Нові методологічні рішення для підготовки пилу та його згорання передбачають

апроксимацію розподілу розмірів частинок за допомогою функції частинко-лінійного наближення [14]. CFD-моделювання також застосовувалося для вивчення самозаймання і горіння вугільного пилу при зміні кутів нахилу, що дало змогу встановити, що мінімальна температура займання змінюється синусоїдально залежно від кута нахилу частинок [15, 16].

Ansys Fluent є одним із найпоширеніших програмних продуктів для моделювання горіння вугільного пилу та біомаси. Дослідження показують, що цей підхід дає змогу аналізувати процеси згоряння у вихрових пальниках [17], режими повітряного та кисневого горіння вугілля [18], а також спільного спалювання вугілля з вуглецевмісною сировиною [19].

Основними факторами, що впливають на горіння, є швидкість подачі повітря, коефіцієнти завихрення і моделі радіаційного переносу [17]. Встановлено, що додавання вуглецевмісної сировини впливає на швидкість вигорання палива і температурні профілі [19].

CFD-моделювання за допомогою Ansys Fluent широко використовується для аналізу горіння пиловугільного палива в різних конфігураціях реакторів. Залежно від конфігурації, застосовуються різні моделі горіння: модель переносу компонентів і незмішаного горіння [20], а також дискретно-фазові субмоделі [19]. В низці робіт досліджено вплив швидкості подачі повітря, завихрення потоку, розміру частинок та моделей радіації на температурні профілі, теплопередачу, швидкість вигорання та утворення викидів [17, 20]. Крім того, розглянуто можливість спільного спалювання вугілля і біомаси для підвищення ефективності та утилізації відходів [2119]. CFD-моделювання дозволило оптимізувати параметри горіння та визначити ключові фактори, що впливають на ефективність спалювання вугільного пилу.

Аналіз літературних джерел показує, що чисельне моделювання є ефективним інструментом для дослідження горіння вугільного пилу. Різні підходи, включно з моделями турбулентності, теплообміну і хімічної кінетики, дають змогу детально вивчити процеси спалювання і теплопередачі. Використання Ansys Fluent та інших CFD-інструментів забезпечує високоточні результати, що узгоджуються з експериментальними даними.

Для чисельного моделювання процесу горіння у середовищі Ansys Fluent використовуються різні параметри температури стінки, які можуть суттєво впливати на точність прогнозування процесів теплопередачі. Основними характеристиками, що застосовуються у моделюванні, є:

- температура стінки (Wall Temperature) – реальна температура стінки, що враховує теплопровідність та внутрішній розподіл тепла;
- температура прилеглого шару (Wall Adjacent Temperature) – температура газової суміші в найближчій до стінки комірці сітки;
- температура тонкої стінки (Wall Temperature, Thin) – температура поверхні тонкої стінки, що не має власної теплопровідності.

Метою даного дослідження є обґрунтування вибору параметра температури стінки для чисельного моделювання горіння вугільного пилу в циліндричному каналі вугільного пласта та подальший аналіз результатів моделювання.

Математичний опис та вибір основного параметру визначення температури стінки. Температура стінки T_{wall} є основним параметром, що визначає реальну температуру поверхні стінки каналу. Його значення залежить від внутрішнього розподілу температури в матеріалі та теплопровідності вугільного пласта або вміщуючих породах і визначається як температура поверхні стінки з урахуванням її властивостей і внутрішнього процесу теплопровідності. Для визначення температурного розподілу T_{wall} використовується рівняння Фур'є для стаціонарного теплопровідного процесу:

$$q = -k \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

де: q – тепловий потік через стінку, Вт/м²; k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К); $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури у напрямку, перпендикулярному до стінки.

Знак «–» у рівнянні Фур'є свідчить про те, що теплота передається у напрямку, зворотному градієнту температури. У випадку багат шарової стінки температура на зовнішній поверхні визначається як:

$$T_{wall} = T_{\infty} + \frac{q\delta}{k}, \quad (2)$$

де: T_{∞} – температура внутрішньої поверхні стінки (контакт із потоком); δ – товщина шару вугілля або породи.

Загалом, температура стінки T_{wall} дозволяє оцінити глибину прогріву та вплив теплового навантаження на систему, зокрема з часом.

Температура прилеглого шару T_{adj} визначає температуру газового середовища в першій комірці сітки біля стінки. Вона застосовується для оцінки теплового потоку між потоком та поверхнею і обчислюється за рівнянням Ньютона:

$$q = h(T_{wall} - T_{adj}), \quad (3)$$

де: q – щільність теплового потоку через стінку, Вт/м²; h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{adj} – температура газу в першій комірці біля стінки.

Щоб отримати більш точне розуміння теплового стану в граничному шарі, потрібно враховувати температурний градієнт біля стінки:

$$\left(\frac{dT}{dy} \right)_{wall} = \left(\frac{T_{wall} - T_{adj}}{y^+} \right), \quad (4)$$

де: y^+ – безрозмірна координата граничного шару, що визначає розташування першої комірки сітки.

Відповідно, температура прилеглого шару є важливим параметром для визначення ефективності теплообміну, але не враховує теплопровідність самої стінки, проте дозволяє оцінити ступінь інтенсивності конвекційного теплообміну, особливо в турбулентних режимах течії.

Температура тонкої стінки T_{thin} використовується у випадках, коли стінка моделюється як ідеально тонка основа та не має власної теплопровідності. Вона розраховується за аналогічним до T_{wall} принципом, але без урахування теплопровідності:

$$T_{thin} = T_{wall, external} \cdot \quad (5)$$

Оскільки теплопровідність самої стінки не враховується, рівняння визначає лише температурний баланс між середовищами з обох боків тонкої стінки, що описується рівнянням теплового потоку:

$$q = h_1(T_{\infty,1} - T_{thin}) = h_2(T_{thin} - T_{\infty,2}), \quad (6)$$

де: q – тепловий потік через стінку, Вт/м²; h_1, h_2 – коефіцієнти тепловіддачі на відповідних сторонах стінки, Вт/(м²·К); $T_{\infty,1}, T_{\infty,2}$ – температури газу з обох боків тонкої стінки, К;

Якщо стінка відділяє два середовища і її власна теплопровідність ігнорується, то температура поверхні може бути визначена як:

$$T_{thin} = \frac{h_1 T_{\infty,1} + h_2 T_{\infty,2}}{h_1 + h_2}. \quad (7)$$

Рівняння (7) показує, що температура тонкої стінки є зваженим значенням середніх температур двох середовищ, залежно від коефіцієнтів тепловіддачі. Така модель ігнорує температурний градієнт у матеріалі стінки, що призводить до неточностей у випадках, коли вугільний пласт або вміщуючі породи мають значну товщину, тобто у випадках, коли немає потреби враховувати розподіл температури всередині стінки.

Таким чином, для порівняння підходів до визначення температурного режиму стінки при спалюванні вугільного пилу в циліндричному каналі вугільного пласта було розглянуто три основні параметри: температура стінки (T_{wall}), температура прилеглого шару (T_{adj}) та температура тонкої стінки (T_{thin}). Кожен з них базується на різних фізичних принципах та має власні обмеження щодо застосування у задачах моделювання теплопередачі. Узагальнені характеристики цих параметрів наведено у табл.

На основі проведеного аналізу зазначимо, що визначення температури прилеглого шару T_{adj} підходить для оцінки теплового потоку між потоком і стінкою, але не дозволяє аналізувати теплопровідність вугілля та вміщуючих порід. В свою чергу визначення температури тонкої стінки T_{thin} може бути використане для тонких перегородок, але не враховує глибинний градієнт температури, тоді як визначення температури стінки T_{wal} є найбільш релевантним параметром, оскільки дозволяє оцінити реальний температурний розподіл у вугільному пласті та вміщуючих породах. Таким чином, для дослідження температурного режиму стінок підземного каналу вибрано T_{wal} як найбільш фізично обґрунтований параметр.

Таблиця

Порівняльні характеристики параметрів визначення температури стінки

Параметр	Температура стінки	Температура прилеглого шару	Температура тонкої стінки
	T_{wal}	T_{adj}	T_{thin}
Фізичний зміст	Температура поверхні стінки з урахуванням її теплопровідності	Температура газового середовища у першій комірці сітки біля стінки	Температура поверхні ідеально тонкої стінки (без урахування її товщини)
Основне рівняння	Фур'є для теплопровідності	Ньютона для конвекції	Теплового балансу на поверхні
Що враховує?	Внутрішній розподіл температури в матеріалі стінки	Температуру в газовому потоці біля стінки, без урахування теплопровідності стінки	Лише температуру зовнішньої поверхні, без внутрішньої теплопередачі
Врахування теплопровідності стінки	+	—	—
Залежність від товщини стінки	+	—	—
Тип процесу	Провідність (теплопередача через стінку)	Конвекція (теплопередача між стінкою та потоком)	Безтеплопровідна поверхня
Розташування контрольної точки	В матеріалі стінки	В першому осередку сітки біля стінки	На поверхні тонкої стінки
Застосування	Аналіз теплопровідності у товстих стінках	Аналіз теплообміну між потоком і стінкою (коефіцієнт тепловіддачі)	Тонкі перегородки без урахування внутрішнього температурного розподілу
Висновок щодо можливості застосування при спалюванні вугільного пилу в каналі	Найбільш релевантний параметр для оцінки температурного розподілу	Корисний для оцінки конвекційного теплообміну, але не описує стан стінки	Не враховує теплопровідність, що робить його непридатним для аналізу теплових процесів у товстих стінках

Методика дослідження. Обчислювальна область моделює процес горіння вугільного пилу в циліндричному каналі вугільного пласта довжиною 30 м, що був визначений як оптимальний на основі попередніх досліджень [12, 22]. Геометрія області охоплює порожнину діаметром 1 м, яка утворюється після видобутку вугілля бурошнеком, і систему подачі палива та окислювача.

Для подачі компонентів використано концентричну конфігурацію «труба в трубі». Подача вугільного пилу відбувається через внутрішню трубу ($d = 100$ мм), тоді як зовнішня труба ($d = 200$ мм) забезпечує подачу повітря і, за потреби, додаткових реагентів. Така конструкція сприяє змішуванню палива й окислювача, що є важливим для стабільного горіння. Вихідний отвір каналу ($d = 200$ мм) розташований на протилежному кінці порожнини і забезпечує відведення продуктів згоряння. Сітка містить понад 600 тисяч вузлів і елементів, що забезпечує високу роздільну здатність під час моделювання (рис. 1).



Рис. 1. Схематичне зображення обчислювальної області

Для зменшення чисельних похибок і покращення точності рішення застосовано середнє згладжування сітки:

$$\rho \frac{DE}{Dt} + \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \sum h_j J_j + S_h, \quad (8)$$

де: ρ – густина газу; E – повна енергія; k_{eff} – ефективна теплопровідність; h_j – ентальпія компонентів; J_j – дифузійний потік компонентів; S_h – джерело тепла (тепловиділення від хімічних реакцій).

Для коректного моделювання приконтурних ефектів використано інфляційні шари зі згущенням біля стінок (максимальна кількість шарів – 2, коефіцієнт переходу – 0,27), що дозволяє врахувати градієнти температури і швидкості в критичних зонах.

Оскільки горіння вугільного пилу супроводжується високими швидкостями газових потоків, застосовано k - ε модель турбулентності, яка ефективно описує масштабні вихори та їхній вплив на теплообмін:

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} &= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

де: k – кінетична енергія турбулентності; ε – швидкість дисипації турбулентної енергії; G_k – генерація турбулентної енергії.

Для опису процесу горіння використано модель незмішуваного горіння, що ідеально підходить для систем із роздільною подачею палива й окислювача. Основний принцип цієї моделі базується на рівнянні:

$$\rho \frac{Df}{Dt} = \nabla \cdot (D \nabla f) + S_f, \quad (10)$$

де: f – фракція суміші (від 0 для чистого окислювача до 1 для чистого палива); S_f – параметр, який враховує елементи привнесення тепла від подачі палива; D – масова дифузійна здатність.

На вході подача повітря встановлена 30 м/с, а палива – 7,7 м/с. Інтенсивність турбулентності – 5%. Такі параметри дають змогу досягти оптимального змішування і підтримувати стабільне горіння.

Для моделювання використовується транзитивний підхід (transient simulation), що дає змогу аналізувати динаміку горіння протягом 1, 12, 24, 36 та 48 годин. Дискретизація градієнтів виконується методом Least Squares Cell-Based, а рівняння імпульсу, енергії та фракції суміші розв'язуються схемою другого порядку Upwind для мінімізації чисельних помилок. При аналізі температурного поля розглядається статична температура T_s , яка визначає кінетику хімічних реакцій і тепловий баланс у каналі. Вона характеризує теплову енергію частинок газу без урахування їхнього кінетичного руху відносно спостерігача.

Результати та обговорення. Моделювання горіння вугільного пилу в циліндричній порожнині вугільного пласта проведено для аналізу розподілу температури вздовж каналу у визначені моменти часу: 1, 12 і 24 години. Результати моделювання наведені на рис. 2, які демонструють динамічний розвиток температури під час горіння. Хоча температурні розподіли змінюються з часом, їхні основні закономірності залишаються стабільними.

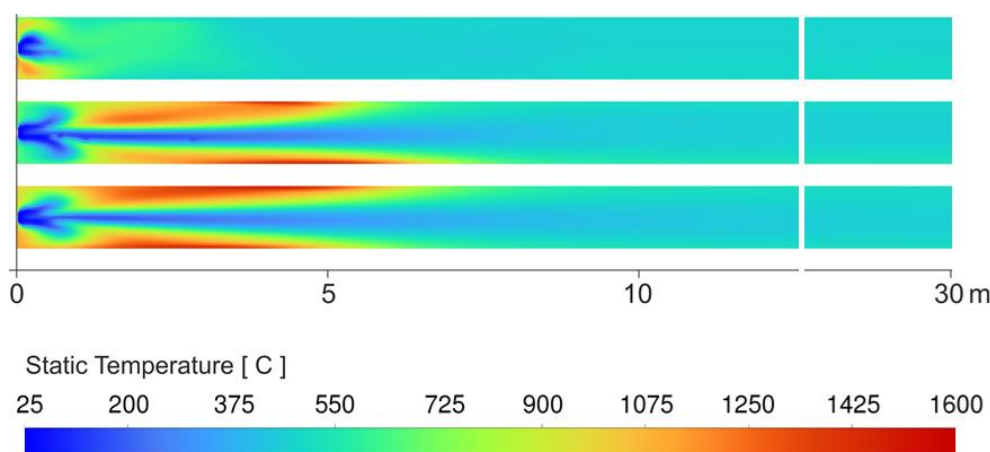


Рис. 2. Розподіл статичної температури вздовж каналу через 1, 12 і 24 години

Розподіл статичної температури (див. рис. 2) вказує на чітко окреслену область інтенсивного нагріву поблизу входу, де процес горіння відбувається найактивніше. Через декілька годин максимальна температура сягає 1220°C. На відстані 7 м температура різко знижується і стабілізується приблизно на рівні 520°C. Через 12 годин температура в зоні горіння зростає до 1490°C, а область підвищених температур розширюється вздовж каналу. На 24-ій годині процес набуває відносної стабільності, максимальна температура сягає 1540°C, що свідчить про наближення горіння до сталого режиму.

Однією з особливостей є стабілізація температури в нижніх частинах каналу. Через першу годину між 5 і 30 м температура стабілізується в межах 490–520°C, тоді як на 12-й і 24-й годинах подібний ефект спостерігається після 10 м. Це свідчить про швидке розсіювання тепла та недостатню ефективність його перенесення вниз по потоку.

Стабілізація температури вздовж нижніх частин каналу є помітною особливістю. Через 1 годину температура між 5 і 30 м стабілізується на рівні 490–520°C, тоді як через 12 і 24 години подібна стабілізація спостерігається після 10 м. Це свідчить про те, що утворене тепло швидко розсіюється і недостатньо ефективно переноситься вниз по потоку.

Втрати тепла в системі пояснюються кількома чинниками. Значна частина енергії передається у прилеглі породи, які мають високу теплопровідність, що сприяє витоку тепла із зони горіння. Крім того, в діапазоні 5–10 м від входу відзначається зменшення концентрації кисню і летких компонентів, що обмежує інтенсивність подальших екзотермічних реакцій.

Температурний діапазон 490–520°C у нижніх частинах каналу, ймовірно, є результатом балансу між залишковим тепловиділенням і тепловтратами в навколишнє середовище. Конвекційне перенесення тепла у цьому випадку має обмежений вплив, оскільки теплопровідність прилеглих порід відіграє домінуючу роль у дисипації енергії. Загалом, стабілізація температури вказує на визначальний вплив теплопровідності в системі, що є характерним для процесів підземного горіння або газифікації вугілля, коли прилеглі породи виступають значним акумулятором тепла, поступово передаючи його в глибші шари масиву.

Найкращим варіантом для аналізу варіативності меж розподілу значень статичної температури вздовж каналу через 1, 12 і 24 години є його зображення у вигляді накладання відповідних профілів на один графік (рис. 3).

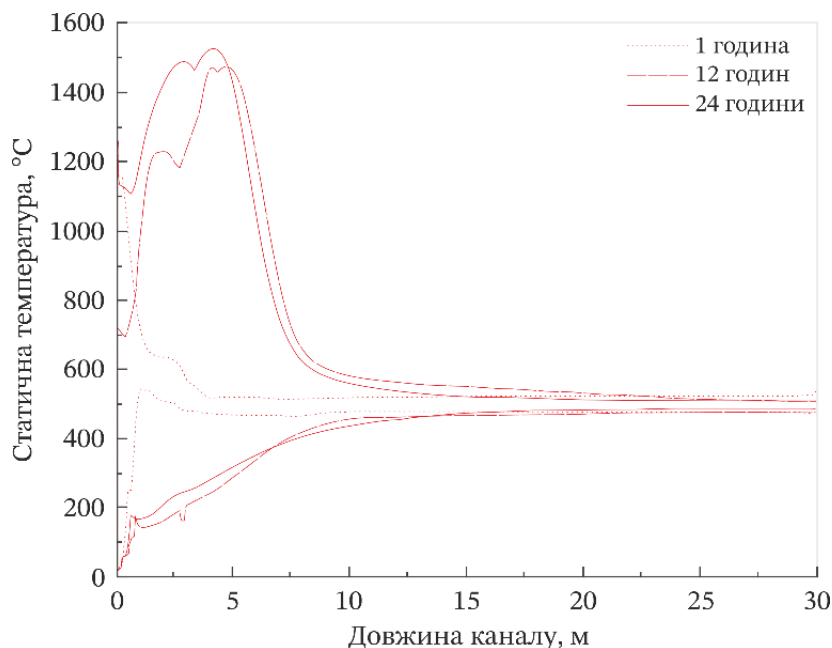


Рис. 3. Графіки накладання профілів меж розподілу значень статичної температури вздовж каналу через 1, 12 і 24 години

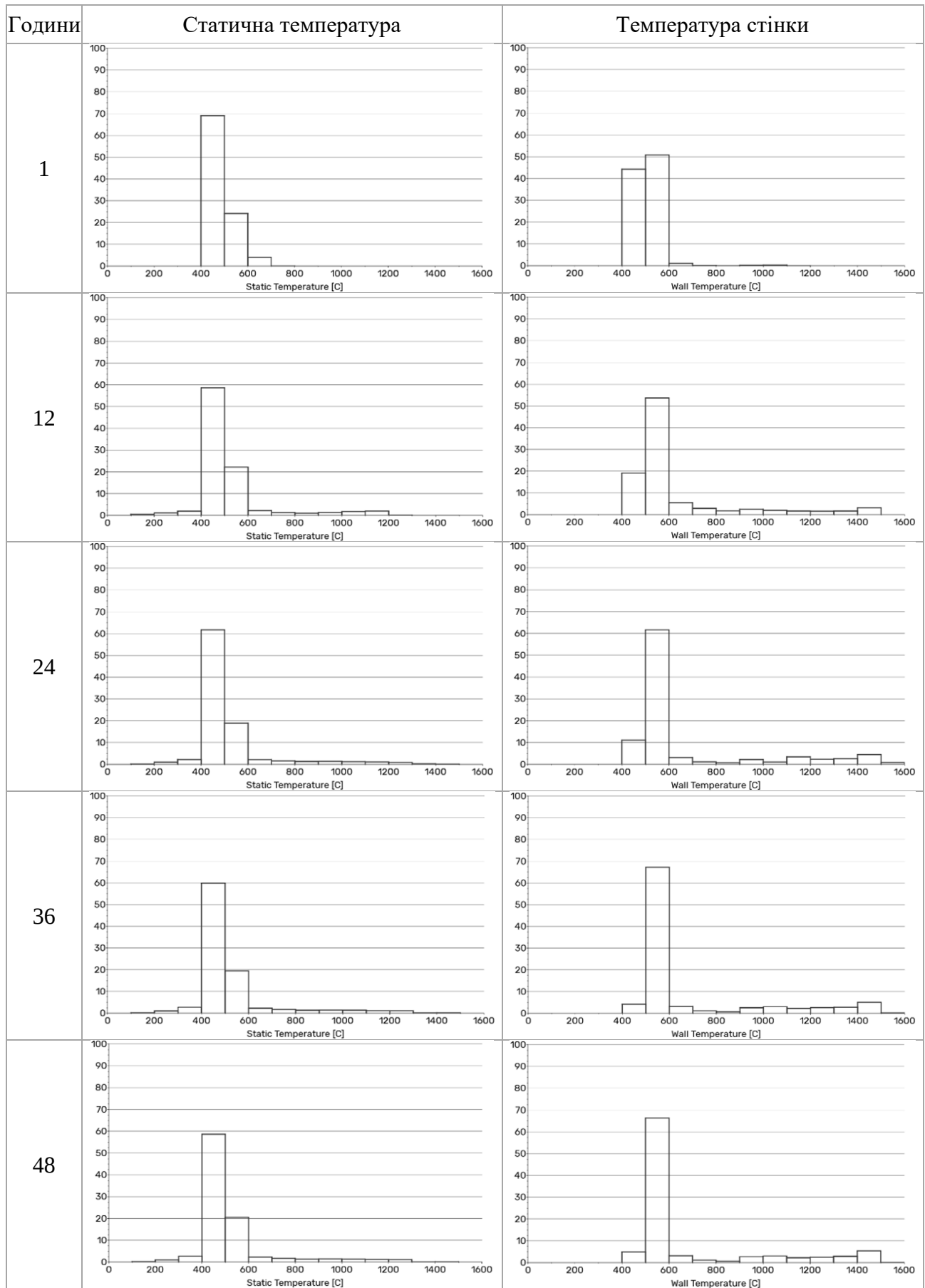


Рис. 4. Гістограми зміни процентного розподілу статичної температури в каналі та температури стінки навколо каналу з часом

Таким чином рис. 3 наочно демонструє зміни профілів меж розподілу значень статичної температури та вказує на те, що характер їхніх змін має суттєве зростання лише між ранньою та середньою стадією, тобто між 1 та 12 годинами. Водночас зростання між середньою та фінальною стадією є не суттєвим.

Тривалість горіння є одним із ключових факторів, що визначає динаміку розподілу температурного поля в каналі та його стінках. Аналіз зміни статичної температури в каналі протягом більш тривалого проміжку часу (36 і 48 годин) дає змогу оцінити особливості теплових процесів у системі та виявити момент стабілізації температури. Отримані в результаті моделювання гістограми зміни відсоткового розподілу статичної температури в каналі та температури стінки навколо каналу з часом представлено на рис. 4.

Як показують гістограми (див. рис. 4), після 24 годин температура всередині каналу не зазнає значних змін, що свідчить про досягнення квазістаціонарного режиму горіння. Подібна тенденція спостерігається і для температури стінки, яка стабілізується після 24 годин і залишається практично незмінною на 36-й та 48-й годинах. Уздовж каналу максимальна температура у процентному співвідношенню знаходиться в межах $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$. Це пов'язано зі значною довжиною каналу. Через 1 годину необхідний температурний режим $900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ практично не досягається, проте після 12 годин температура в каналі вже знаходиться в діапазоні, який може забезпечити стабільний термічний режим для когазифікації. Схожа динаміка спостерігається і у випадку аналізу температури стінки.

Температурний діапазон, оптимальний для когазифікації вугільного пилу з метою отримання горючих газів, зокрема водню, зазвичай знаходиться в межах $900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$. У цьому діапазоні відбувається ефективно термічне розкладання органічних компонентів вугілля, що сприяє утворенню CO , H_2 та CH_4 . Температури нижче 900°C можуть призводити до нехватки теплової енергії, що унеможливить генерування горючих газів, тоді як перевищення 1200°C може спричинити надмірне окислення продуктів газифікації, що знижує ефективність процесу.

При температурах вище 1200°C спостерігається інтенсивніше розкладання важких вуглецевих сполук, що сприяє зменшенню вмісту смол і сажі та покращує процес газоутворення. При $1400\text{--}1600^{\circ}\text{C}$ активізуються реакції гомогенізації газової фази, а термохімічні перетворення стають більш повними. Високі температури сприяють додатковому розкладанню CO_2 і H_2O з утворенням H_2 і CO (реакції водяного газу та газифікації вуглецю). Водночас важливо контролювати споживання окислювача, оскільки надлишковий кисень може спричинити повне згоряння горючих газів і зменшення виходу корисних продуктів газифікації. Якщо процес налаштований на підтримання відновного середовища, температура 1600°C може навіть сприяти підвищенню виходу водню.

Таким чином, для подальших досліджень достатньо обмежитися моделюванням на часових відрізках 1, 12 і 24 години, оскільки подальше збільшення тривалості горіння не має суттєвого впливу на тепловий режим у системі і відповідно на вихід продуктів згоряння вугільного пилу.

Висновки. У результаті дослідження визначено, що процес горіння вугільного пилу в циліндричному каналі супроводжується нерівномірним розподілом

температури вздовж каналу, з чітко вираженою зоною інтенсивного тепловиділення на початковому етапі та подальшим її зниженням через 7–10 м.

Чисельне моделювання підтвердило, що температура в зоні горіння зростає від 1220°C через 1 годину до 1540°C через 24 години. Виявлено, що стабілізація температури в діапазоні 490–520°C на відстані понад 10 м зумовлена високою теплопровідністю прилеглих порід, які активно поглинають тепло.

Проведено порівняльний аналіз підходів до визначення температури стінки: T_{wall} , T_{adj} і T_{thin} . Встановлено, що T_{wall} є найбільш придатним для вивчення параметром, оскільки дає змогу враховувати внутрішню теплопровідність порід і забезпечує більш точний розрахунок теплових навантажень на стінки каналу.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів підземного спалювання, газифікації та когазифікації, прогнозування термостійкості порід і підвищення ефективності використання вуглецевмісної сировини.

Вдячність. Результати роботи отримані в рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-512 «Когазифікація вуглецевмісної сировини при виготовленні надтонких вугільних пластів з орієнтацією на отримання водню» (проект №0123U100985) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Salieiev, I. (2024). Organization of processes for complex mining and processing of mineral raw materials from coal mines in the context of the concept of sustainable development. *Mining of Mineral Deposits*, 18(1), 54–66. <https://doi.org/10.33271/mining18.01.054>
2. Bondarenko, V., Salieiev, I., Kovalevska, I., Chervatiuk, V., Malashkevych, D., Shyshov, M., & Chernyak, V. (2023). A new concept for complex mining of mineral raw material resources from DTEK coal mines based on sustainable development and ESG strategy. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 1–16. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.001>
3. Williams, A., Pourkashanian, M., & Jones, J.M. (2001). Combustion of pulverised coal and biomass. *Progress in energy and combustion science*, 27(6), 587–610. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(01\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(01)00004-1)
4. Lozynskyi, V. (2023). Critical review of methods for intensifying the gas generation process in the reaction channel during underground coal gasification (UCG). *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 67–85. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.067>
5. Lozynskyi, V., Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K., Malanchuk Z., & Malanchuk, Ye. (2018). Substantiation into mass and heat balance for underground coal gasification in faulting zones. *Inżynieria Mineralna*, 19(2), 289–300. <http://doi.org/10.29227/IM-2018-02-36>
6. Yelubay, M., Massakbayeva, S., Aitkaliyeva, G., & Radelyuk, I. (2021). Processing of ash and slag waste. *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(6), 79–84. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.11>
7. Saik, P., & Berdnyk, M. (2022). Mathematical model and methods for solving heat-transfer problem during underground coal gasification. *Mining of Mineral Deposits*, 16(2), 87–94. <https://doi.org/10.33271/mining16.02.087>
8. Ghose, P., Sahoo, T.K., & Sahu, A.K. (2023). Pulverized coal combustion computational modeling approach: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 237(4), 797–818. <https://doi.org/10.1177/095765092211329>
9. Zhong, B.J., Shi, W.W., & Fu, W.B. (2002). Effects of fuel characteristics on the NO reduction during the reburning with coals. *Fuel processing technology*, 79(2), 93–106. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00102-9)

10. Krazinski, J.L., Buckius, R.O., & Krier, H. (1979). Coal dust flames: A review and development of a model for flame propagation. *Progress in Energy and Combustion science*, 5(1), 31–71. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(79\)90018-2](https://doi.org/10.1016/0360-1285(79)90018-2)
11. Kansa, E.J., & Perlee, H.E. (1980). A transient dust-flame model: application to coal-dust flames. *Combustion and Flame*, 38, 17–36. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90034-6)
12. Lozynskyi, V. (2024). Numerical simulation of carbonaceous raw material combustion in a coal seam channel. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 109–124. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.109>
13. Sheng, C., Moghtaderi, B., Gupta, R., & Wall, T.F. (2004). A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace. *Fuel*, 83(11–12), 1543–1552. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.02.011>
14. Aliukov, S., & Osintsev, K. (2021). Mathematical modeling of coal dust screening by means of sieve analysis and coal dust combustion based on new methods of piece-linear function approximation. *Applied Sciences*, 11(4), 1609. <https://doi.org/10.3390/app11041609>
15. Shi, X., Chen, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Guo, R., Zhao, T., & Liu, R. (2022). Numerical simulation of coal dust self-ignition and combustion under inclination conditions. *Energy*, 239, 122227. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122227>
16. Shotayeva, Ye., Ryspayeva, M., & Berezovskaya, I. (2021). Increasing the efficiency of gasoline combustion depending on the spray angle in a model combustion chamber. *Engineering Journal of Satbayev University*, 143(6), 53–57. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i6.07>
17. Lertanan, T., Podjanasatja, V., Chuchan, D., & Sukjai, Y. (2024). Investigating the Characteristics of Pulverized Coal Combustion Using Ansys Fluent: A CFD Study of a 300 kW Swirl Burner. *Journal of Combustion*, 2024(1), 3128387. <https://doi.org/10.1155/jc/3128387>
18. Zhang, J., Prationo, W., Zhang, L., & Zhang, Z. (2013). Computational fluid dynamics modeling on the air-firing and oxy-fuel combustion of dried Victorian brown coal. *Energy & fuels*, 27(8), 4258–4269. <https://doi.org/10.1021/ef400032t>
19. Marangwanda, G.T., Madyira, D.M., Chihobo, H.C., & Babarinde, T.O. (2021). Modelling co-combustion of bituminous coal and pine sawdust: thermal behaviour. *Fuel Communications*, 9, 100035. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100035>
20. Arasappan, Y. (2022). Mathematical Simulation of Pulverized Coal Combustion. *Acta Mechanica Slovaca*, 26(3), 64–69. <https://doi.org/10.21496/ams.2023.008>
21. Du, S., Wang, J., Yu, Y., & Zhou, Q. (2023). Coarse-grained CFD-DEM simulation of coal and biomass co-gasification process in a fluidized bed reactor: Effects of particle size distribution and operating pressure. *Renewable Energy*, 202, 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.073>
22. Bazaluk, O., Lozynskyi, V., Falshtynskyi, V., Saik, P., Dychkovskyi, R., & Cabana, E. (2021). Experimental Studies of the Effect of Design and Technological Solutions on the Intensification of an Underground Coal Gasification Process. *Energies*, 14(14), 4369. <https://doi.org/10.3390/en14144369>

ABSTRACT

Purpose. To determine the optimal approach for evaluating the temperature characteristics of the channel wall and analyze them in numerical modeling of pulverized coal combustion.

Methods. The study was conducted using numerical modeling of the pulverized coal combustion process in a cylindrical channel 30 m long and 1 m in diameter, which is formed after auger coal mining. The Ansys Fluent software was used for modeling, applying the non-premixed combustion model and the k-ε turbulence model. Calculations were performed for time intervals of 1, 12, 24, 36, and 48 hours.

Findings. Analysis of the obtained temperature fields showed that the maximum temperature in the combustion zone increases from 1220°C (1 hour) to 1540°C (24 hours). The process stabilizes by the

12th hour at a temperature of 1490°C. It was found that the temperature in the channel rapidly decreases after 7–10 m from the inlet, stabilizing at 490–520 °C. The primary cause of heat loss is the high thermal conductivity of the surrounding rocks. It was determined that the T_{wall} parameter most accurately represents the actual temperature regime of the wall and allows for an assessment of the system's thermal state.

The originality. For the first time, a comprehensive analysis of the temperature field dynamics of the channel wall during prolonged pulverized coal combustion in a coal seam channel was conducted. Critical zones of heat loss and temperature stabilization were identified, allowing for the justified selection of the optimal wall temperature parameter for numerical modeling. Indicators of the percentage distribution of static temperature in the channel and the temperature of the wall around the channel over time were obtained.

Practical implementation. The obtained results can be used to improve numerical modeling methodologies for underground coal combustion and co-gasification processes. The identified temperature distribution patterns enable the optimization of fuel and air supply parameters to enhance the efficiency of thermochemical conversion. The proposed approach can be applied in the design of coal seam co-gasification technologies.

Keywords: *computational modeling, pulverized coal combustion, wall temperature, heat transfer, co-gasification.*