

УДК 666.3.041.55

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.205155

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ ПОВІТРЯ ТА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА В КАНАЛІ ТУНЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

Дмитроченкова Е. І., Тадля К. А.

Характерною проблемою роботи тунельних печей з високим перекриттям є вихід продукції з низькою якістю та зниження енергетичної ефективності процесу випалу в цілому. Тому об'єктом дослідження обрано процес протікання пічних газів по каналу тунельної печі, зміна швидкості яких досліджувалась в залежності від геометричних параметрів тунелю.

В ході проведення досліджень залежності розподілення швидкостей потоків пічних газів по каналу печі від її геометричних характеристик використано метод чисельного моделювання в спрощеній 2D постановці за допомогою відкритого коду OpenFoam з використанням моделі турбулентності $k-\omega$ переносу напруг зсуву. Отримано поля швидкостей потоків пічних газів для трьох варіантів висоти каналу: базового з висотою склепіння 2 м, зі зниженою висотою склепіння по всій довжині тунелю та зі зниженою висотою тунелю лише в зоні випалу. Аналіз зміни швидкості потоків показав, що найбільш ефективним буде зниження висоти по всій довжині печі, в той час як зміна висоти склепіння в зоні випалу майже не позначиться на рівномірності швидкостей в зоні підігріву. Зниження висоти склепіння так само мінімізує ймовірність виникнення зворотного потоку повітря в зоні охолодження на ділянці від випалу до місця відбору повітря на сушку. Більш низьке перекриття на ділянці охолодження дозволить підвищити інтенсивність відбору теплоти та, відповідно, знизить її втрати з продукцією, щоб використовувати її на сушку виробів.

Наведені результати моделювання дають можливість відзначити, що зміна висоти перекриття призведе до збільшення аеродинамічного опору та, відповідно, перепаду тиску. Це потребуватиме додаткових витрат електроенергії на привід тягодуттєвих машин та можливість підвищення температур в просторі під вагонами.

Ключові слова: тунельна піч, пічні гази, висота каналу, моделювання розподілення швидкостей, поле швидкостей.

1. Вступ

Тунельні печі забезпечують безперервність теплової обробки та мають широке використання в промисловості від випікання хлібу до випалу різноманітних цегляних виробів. Аеродинамічний режим, який створюється безпосередньо в тунелі печі, напряму впливає на забезпечення рівномірності прогріву виробів та сприяє оптимальному режиму випалу з метою отримання якісної продукції. Причому їх взаємозв'язок, беручи до уваги пряму залежність між швидкістю руху теплоносія (пічних газів) і швидкістю протікання процесу

теплообміну в садці, очевидний. Менший аеродинамічний опір простору між садкою та перекриттям в порівнянні з аеродинамічним опором каналів садки печі призводить до нерівномірної об'ємної витрати по каналу печі та, відповідно, й нерівномірного прогріву виробів. Це має негативний вплив як на якість продукції, так і на енергетичну ефективність термічної обробки.

Переважно для вирішення даної проблеми використовуються заходи з інтенсифікації теплообміну шляхом механічного перемішування. Зокрема в роботах [1–3] з метою збільшення конвективної складової теплообміну між теплоносієм та матеріалом пропонується установка обладнання для рециркуляції в зоні попереднього підігріву, яке забезпечить надійне перемішування та турбулізацію пічних газів по перетину печі. А в роботах [4–6] для зменшення нерівномірності нагріву садки цегли пропонується використання швидкісних пальників власної розробки Інституту газу Національної академії наук України для підігріву повітря в низькотемпературній зоні. В [7–9] методом математичного моделювання доведено покращення тепловіддачі в зоні охолодження тунельної печі при зміні схеми ряду цегли, а також при використанні направляючих лопаток. Автори дослідження [10] пропонують покращити температурні параметри роботи тунельної печі за рахунок турбінної установки, розміщеної перед піччю. А в роботі [11] з метою зниження витрати палива та електроенергії при роботі печі пропонується здійснювати футеровку її активної частини високоглиноземістими виробами на основі алюмосилікатного волокна.

Авторами наведених публікацій не розглядався вплив зміни геометрії печі на підвищення ефективності випалу виробів, що підтверджує актуальність вирішення проблеми вирівнювання швидкостей потоків в садці та просторі над нею. Отже, *об'єктом дослідження* обрано процес протікання пічних газів по каналу тунельної печі, зміна швидкості яких досліджувалась в залежності від геометричних параметрів тунелю. А *мета дослідження* полягає у обґрунтуванні зменшення висоти каналу печі для вирівнювання швидкостей потоків в садці та просторі над нею шляхом проведення чисельного моделювання руху пічних газів в тунелі печі.

2. Методика проведення досліджень

Тунельна піч являє собою довгий тунель (60–200 м), по якому рухається поїзд з вагонеток, навантажених виробами, які обробляються. Схема тунельної печі представлена на рис. 1.

Склад вагонеток періодично проштовхується за допомогою штовхача. Холодні вироби завантажуються в тунель, де спочатку підігріваються за рахунок теплоти продуктів згоряння, потім проходить випалення в зоні високих температур, після чого вони охолоджуються зустрічним потоком повітря та вивантажуються з печі. Теплота від виробів в зоні охолодження використовується для нагріву повітря. Основна частина підігрітого повітря відводиться на потреби сушки виробів, інша частина в залежності від конструкції печі може бути використана в процесі спалювання на пальниках в якості первинного, або надходити в зону високих температур для повного

спалювання палива. Відпрацьовані гази охолоджуються в зоні підігріву оброблюваного матеріалу виробів до температури 110–200 °С і відводяться димососом в димову трубу [12, 13].

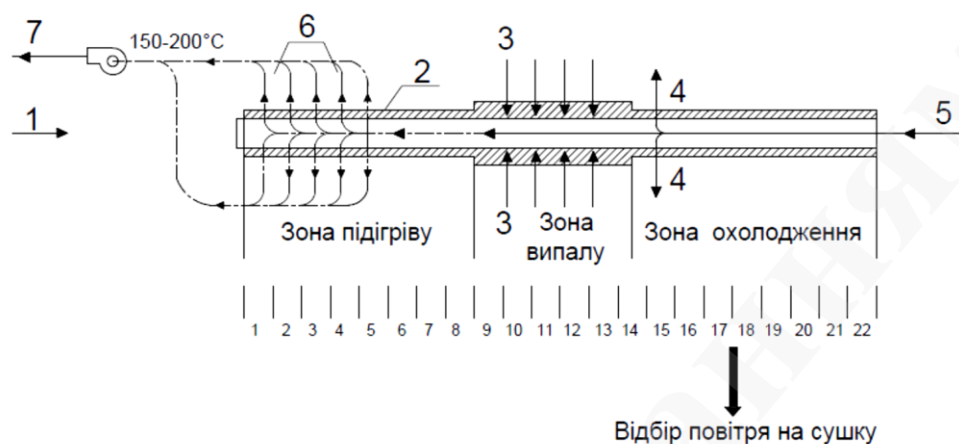


Рис. 1. Схема тунельної печі: 1 – напрям руху вагонеток; 2 – тунель; 3 – пальники; 4 – відвід підігрітого повітря до пальників; 5 – холодне повітря для охолодження випаленого матеріалу; 6 – відвід продуктів спалювання; 7 – димосос

Одним з варіантів зміни аеродинамічного режиму в тунелі є зміна його геометричних характеристик, а саме зменшення висоти тунелю при збереженні витрати повітря, що подається. При цьому слід традиційно очікувати збільшення швидкості пічних газів, що сприятиме зменшенню перепаду температур по перетину печі.

Вплив висоти каналу на зміну швидкостей пічних газів було розглянуто на наступних варіантах:

- базовий з висотою склепіння 2 м;
- зі зниженням висоти склепіння по всій довжині тунелю (на 25 см);
- зі зниженням висоти тунелю лише в зоні випалу (на 25 см).

Тунель печі розбитий на 22 рівновеликих ділянки відповідно до кількості вагонів. Схема розбивки наведена на рис. 1. Між ділянками 17 і 18 здійснюється відбір повітря на сушку.

Моделювання розподілу потоків повітря та продуктів згоряння виконано в спрощеній 2D постановці за допомогою відкритого коду OpenFoam з використанням моделі турбулентності $k-\omega$ переносу напруг зсуву ($k\Omega\text{megaSST}$) для стаціонарних умов.

3. Результати досліджень та обговорення

В результаті, отримано розподіл швидкостей по каналу печі (рис. 2). Піч розбита на три частини, цифрами показано позиції вагонів по довжині печі.

Очевидно, що швидкості повітря та димових газів значно збільшуються в просторі між садкою та склепінням (на рис. 2 видно ефект на перших позиціях та зоні відбору повітря на сушку – 18 позиція). Це пов'язано як з перерозподілом повітря, так і з додаванням повітря за рахунок горіння та підсосів. Так само

простежується мінімізація швидкості повітря в зоні охолодження (від 14 до 17 позиції) і ще більше її зниження в зоні випалу (9–13 позиції).

У зоні відбору повітря на сушку має місце його зворотний потік, що пов'язано з наявністю малих зазорів всередині садки. Основна ж кількість повітря рухається під склепінням і для відбору на сушку він надходить в тому числі і від простору через садку, що викликає його зворотний рух.

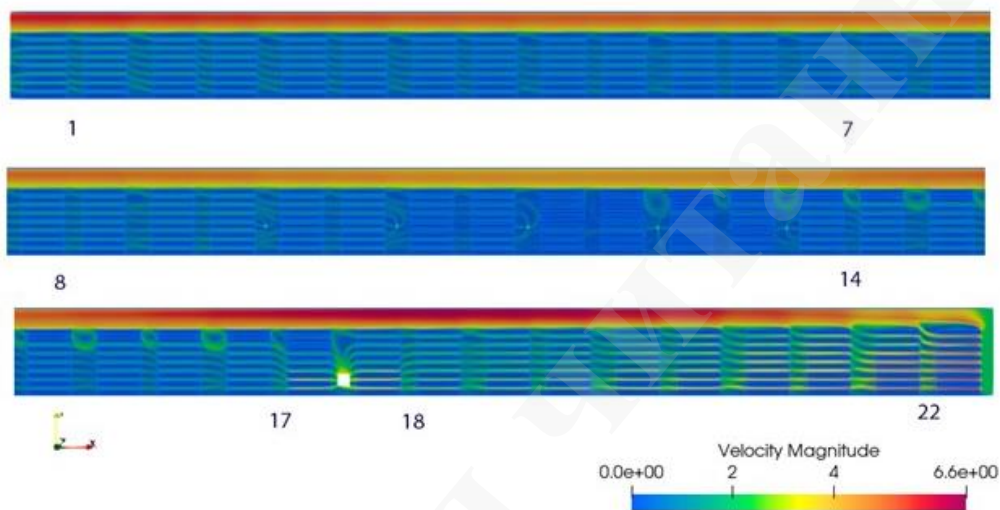


Рис. 2. Розподілення швидкостей потоків пічних газів по каналу печі (базовий варіант)

Для проведення порівняльного аналізу зміни швидкостей пічних газів і статичного тиску було проведено моделювання аналогічне базовому варіанту за умови ідентичності витрат, але при зниженні висоти склепіння на 25 см по всій довжині печі. Результати моделювання наведені на рис. 3, 4, де наочно можна побачити, що найменші швидкості руху пічних газів спостерігаються на ділянці від початку зони охолодження до зони відбору повітря на сушку (позиції 14–16).

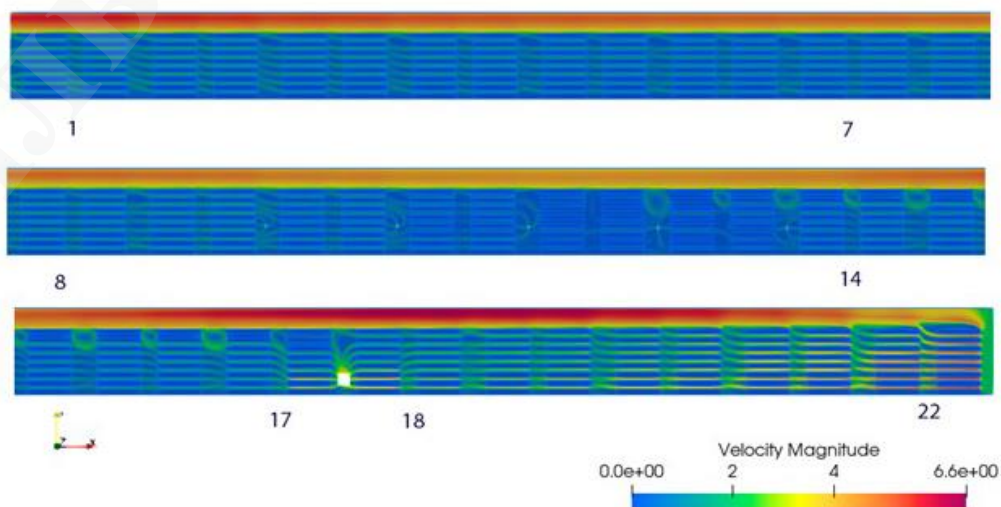


Рис. 3. Поле швидкостей пічних газів по каналу печі за умови зниження висоти склепіння на 25 см по всій довжині печі

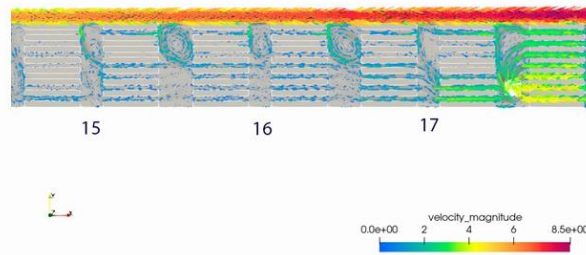


Рис. 4. Розподілення швидкостей в зоні відбору повітря на сушку за умови зниження висоти склепіння на 25 см по всій довжині печі

На відміну від попереднього випадку зворотній потік виникає тільки з 15 позиції (рис. 4), що пояснюється великою витратою повітря через садку.

В якості третього варіанту для проведення порівняльного аналізу пропонується розгляд динаміки зміни аеродинамічних характеристик. При цьому в якості умови розглядається зменшення висоти склепіння на ті ж 25 см тільки в зоні горіння (позиції 9–14). Витрата повітря та газів приймається ідентичною до базового варіанту. Результати моделювання наведені на рис. 5.

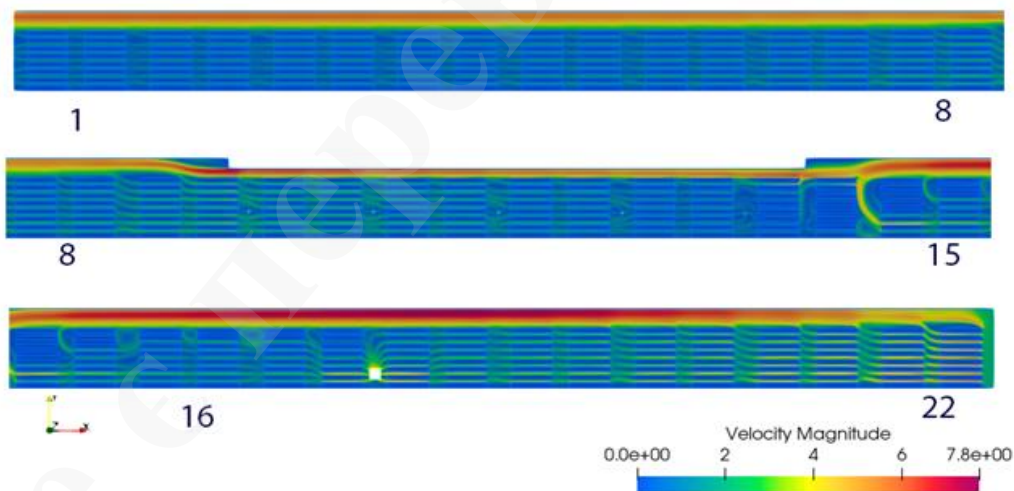


Рис. 5. Поле швидкостей потоків пічних газів по каналу печі за умови зниження висоти склепіння на 25 см в зоні випалу печі

На рис. 5 представлена загальне поле швидкостей по каналу печі. Відмінною особливістю отриманого результату від того, який представлений на рис. 2 для базового варіанту, є збільшення швидкості в зоні випалу з 4,3 до 5,2 м/с. В інших зонах значення швидкостей приблизно однакові.

При аналізі результатів моделювання, наведених на рис. 5 та рис. 2, слід зазначити той факт, що в варіантах 2 і 3 значення максимальних швидкостей в підсклепінному просторі вище першого варіанту. Але в разі зниження висоти склепіння по всій довжині печі в даній її частині все-таки спостерігається підтримка більш високих швидкостей.

В роботі [14] авторами проаналізовано зміну статичного тиску та швидкості руху пічних газів по висоті тунелю. В результаті чого також доведена ефективність зниження висоти склепіння по всій довжині печі в порівнянні з двома іншими варіантами, що розглядались.

4. Висновки

Результати моделювання швидкості потоків пічних газів по каналу печі показали, що більш рівномірним розподілення швидкості буде у варіанті з перекриттям, зниженим на 25 см. Зниження висоти склепіння так само мінімізує ймовірність виникнення зворотного потоку повітря в зоні охолодження, що також сприятиме більш повному відбору теплоти від виробів і, відповідно, знизить втрати теплоти з продукцією. З іншої сторони, варто відзначити, що зміна висоти перекриття призведе до збільшення аеродинамічного опору та відповідно перепаду тиску. Це потребуватиме додаткових витрат електроенергії на привід тягодуттєвих машин та можливість підвищення температур в просторі під вагонами.

Результати даних досліджень стануть у нагоді при проведенні реконструкції існуючих тунельних печей з метою покращення якості продукції та підвищення енергетичної ефективності процесу випалу.

Література

1. Torchinsky, A. I., Lyashko, A. Yu., Sergienko, A. A., Kryachok, Yu. N. (2010). Ceramic Brick Manufacture Tunnel Furnaces Modernization. 1. The Program of the Tunnel Furnaces Modernization Concept and Realization. *Energy technologies and resource saving*, 1, 72–75.
2. Torchinsky, A. I., Lyashko, A. Yu., Sergienko, A. A., Kryachok, J. N. (2010). Tunnel Furnaces Stock for Ceramic Brick Manufacture Modernization. 2. The Furnaces Heating System Developement. *Energy technologies and resource saving*, 2, 57–60.
3. Torchinsky, A. I., Lyashko, A. Yu. (2016). Optimization of Thermal and Aerodynamic Operating Mode of Tunnel Kiln for Ceramic Bricks Calcination. *Energy technologies and resource saving*, 1, 66–72.
4. Pilipenko, R. A., Pilipenko, A. V., Logvinenko, D. M. (2010). Tunnel Kilns for Brick Burning Efficiency Increase. *Energy and resource saving*, 2, 23–26.
5. Torchinskii, A. I., Sergienko, A. A., Liashko, A. Iu., Kriachok, Iu. N. (2009). Opyt vnedreniia na tunnelnykh pechakh obzhiga keramicheskogo kirpicha energoeffektivnykh skorostnykh gazogorelochnykh ustroystv serii GS. *Stroitelnye materialy, izdeliia i santekhnika*, 34, 115–119.
6. Torchinskii, A. I., Liashko, A. Iu., Kriachok, Iu. N. (2011). Sopotavitelnye ispytaniia gazogorelochnykh ustroystv serii GS na tunnelnoi pechi obzhiga keramicheskogo kirpicha. *Stroitelnye materialy, izdeliia i santekhnika*, 3, 16–20.
7. Refaey, H. A., Abdel-Aziz, A. A., Ali, R. K., Abdelrahman, H. E., Salem, M. R. (2017). Augmentation of convective heat transfer in the cooling zone of brick tunnel kiln using guide vanes: An experimental study. *International Journal of*

Thermal Sciences, 122, 172–185. doi:
<http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.08.018>

8. Abou-Ziyan, H. Z. (2004). Convective heat transfer from different brick arrangements in tunnel kilns. *Applied Thermal Engineering*, 24 (2-3), 171–191. doi:
<http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.08.014>

9. Refaey, H. A., Abdel-Aziz, A. A., Salem, M. R., Abdelrahman, H. E., Al-Dosoky, M. W. (2018). Thermal performance augmentation in the cooling zone of brick tunnel kiln with two types of guide vanes. *International Journal of Thermal Sciences*, 130, 264–277. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.027>

10. Shi, H., Ma, L., Liu, M. (2018). Integration Research on Gas Turbine and Tunnel Kiln Combined System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 133, 012024. doi: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/133/1/012024>

11. Zubashchenko, R. V. (2017). The lining of the small capacity tunnel type kiln with the high alumina-silicate fiber refractories. *New Refractories*, 2, 3–5. doi:
<http://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-2-3-5>

12. Schukin, A. A. (1973). *Promyshlennye pechi i gazovoe khoziaistvo zavodov*. Moscow: Energiia, 224.

13. Glinkov, M. A., Glinkov, G. M. (1990). *Obschaia teoriia teplovoi raboty pechei*. Moscow: Metallurgiiia, 223.

14. Dmytrochenkova, E., Tadya, K. (2019) Analysis of aerodynamic characteristics in the tunnel kiln channel when changing the geometric characteristics of the channel. *Innovation solutions in modern science*, 6 (33), 37–47.