

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Швачка Дениса Григоровича

**на тему «Теплова ефективність футерівки обертових печей для
виробництва будматеріалів»**

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

Актуальність теми дисертації.

Для обпалення сировинних матеріалів, що використовуються в будівельній галузі, широко використовуються високотемпературні обертові печі, які характеризуються суттєвими витратами природного газу на ці процеси.

Однією з актуальних задач на сьогодні в Україні є підвищення енергетичної ефективності теплотехнологічного обладнання, зокрема і обертових печей, за рахунок зменшення теплових втрат конструктивними елементами. Відсутність довговічних вогнетривких матеріалів з високими ізоляційними властивостями призвела до необхідності створення футерівки печі з підвищеним термічним опором за рахунок встановлення в ній додаткової волокнистої теплоізоляції.

Встановлення додаткової теплоізоляції, окрім зменшення теплових втрат, призводить і до зменшення маси футерівки. Також при зміні конструкції футерівки змінюються і термомеханічні навантаження в ній. Однак при цьому залишаються невирішеними питання, що пов'язані з розробкою науково обґрунтованих методик розрахунку температурних полів та термомеханічних напружень в змінених конструкціях футерівки. Аналіз наявних напружень дозволить прогнозувати загальний стан печі в процесі роботи, а також дасть змогу створювати ефективну і надійну конструкцію футерівки.

Метою дисертаційної роботи є розроблення методів досліджень і визначення впливу термічного опору футерівки високотемпературної зони на температурно-тепловий режим обертової печі; створення надійної в експлуатації конструкції футерівки з підвищеним термічним опором та визначення впливу геометрії теплоізоляції в фасонних вогнетривах на процес теплообміну в печі; методами математичного моделювання дослідження температурних полів і термомеханічних напружень в зміненій конструкції футерівки в експлуатаційних режимах, а також визначення критерія для оцінки міцності вогнетриву.

Тематика дисертаційної роботи відповідає напрямку «Енергоефективність в промисловості будівельних матеріалів» та Законам України «Про енергозбереження» і «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) Розроблена конструкція вогнетривкої футерівки з волокнистим теплоізоляційним матеріалом для обертових печей, які використовуються для обпалення сировинних матеріалів, що дає змогу підвищити їх енергетичну ефективність та зменшити витрату природного газу на процес обпалення.

2) Доповнена та реалізована математична модель для комплексного дослідження температурно-теплових процесів в конструкції футерівки з теплоізоляцією, а також напружено-деформованого стану обертової печі. Розроблені методики можуть бути використані для аналізу теплової роботи обертових печей і в інших галузях.

3) За результатами математичного моделювання встановлені закономірності впливу додаткової ізоляції футерівки на виникнення теплових пульсацій, які інтенсифікують протікання теплових та масообмінних процесів при обпаленні сировинних матеріалів в обертових печах.

4) Встановлений фактор підвищення енергетичної ефективності печі за рахунок впливу регенераційного теплообміну на технологічний процес обпалення сировинних матеріалів при використанні футерівки з теплоізоляцією в високотемпературній зоні.

5) Визначені оптимальні форма та конструктивні розміри теплоізоляційних комірок в футерівці печі, які забезпечують найбільший енергетичний ефект при їх застосуванні.

Достовірність отриманих результатів підтверджена фізичним моделюванням процесів теплообміну в футерівці печі на експериментальній установці на спеціально виготовленому дослідному зразку футерівки з теплоізоляцією. Аналіз отриманих результатів показав, що експериментальні температурні поля в футерівці з теплоізоляцією відрізняються від отриманих при математичному моделюванні не більше ніж на 6 % з довірчою ймовірністю $W = 0,95$.

Наукові дослідження здобувач Д. Г. Швачко виконував на кафедрі хімічного, полімерного і силікатного машинобудування КПП ім. Ігоря

Сікорського у відповідності до науково-технічних тематик Міністерства освіти і науки України: НДР ІХФ–1–2016-2020 «Моделювання та удосконалення конструкційних матеріалів, технологічних процесів і хімічного обладнання», державний реєстраційний номер 0115U005592 та НДР ІХФ–9–2022-2027 «Підвищення енерго- і ресурсозберігаючих показників в технології та обладнанні об'єктів хімічного, полімерного та силікатного машинобудування», державний реєстраційний номер 0122U201697, під керівництвом професора кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування д-ра техн. наук, проф. Щербини Валерія Юрійовича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання «підвищення енергетичної ефективності обертових печей для обпалення сировинних матеріалів в будівельній галузі за рахунок використання футерівки з теплоізоляцією» виконане повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Швачка Д. Г. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Галузеве машинобудування».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Підвищення енерго- і ресурсозберігаючих показників в технології та обладнанні об'єктів хімічного, полімерного та силікатного машинобудування»,

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Швачка Дениса Григоровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертація написана українською мовою.

Матеріал дисертаційної роботи викладений на високому науковому та методичному рівнях з дотриманням загальноприйнятої науково-технічної термінології, логічно і послідовно.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг дисертації 169 сторінок.

У вступі обґрунтовано необхідність та актуальність досліджень з підвищення енергетичної ефективності обертових печей, що використовуються для обпалення сировинних матеріалів будівельної галузі; наведені мета і завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження; наукова новизна і практична цінність отриманих результатів та їх реалізація; представлено інформацію про особистий внесок здобувача, публікації і апробацію роботи, її структуру та обсяг.

В першому розділі розглянуті можливі варіанти підвищення енергетичної ефективності обертових печей, включаючи і збільшення термічного опору футерівки (ТОФ). Але наголошено, що в наявних теоретичних моделях, що імітують протікання теплотехнологічних процесів в печах, не враховується вплив на тепловий режим в них зміни термічного опору вогнетриву в процесі його зношування. На основі аналізу наявних теоретичних та практичних досліджень зроблений висновок про можливість збільшення ТОФ шляхом зміни конфігурації вогнетриву за рахунок розміщення між ним та корпусом печі додаткового теплоізоляційного матеріалу. А для вибору оптимальної конструкції вогнетриву потрібно мати дані стосовно його напружено-деформованого стану, що і необхідно було досліджувати в роботі. За підсумком аналізу літературного огляду зроблені відповідні висновки та визначені основні задачі дослідження.

Другий розділ присвячений дослідженню теплових процесів в обертових печах методами математичного моделювання. З точки зору оброблення сировинного матеріалу в печі виділено 8 окремих енергетичних зон, а саме: підігріву, випаровування вологи, сушіння, дегідратації, декарбонізації, екзотермічних реакцій, спікання і охолодження. На основі вирішення рівнянь теплового та матеріального балансів для кожної зони з використанням відомого методу зонального розрахунку з відповідними доповненнями були визначені основні показники енергоефективності печей з використанням в футерівці теплоізоляційного шару різних конструкцій: витрата природного газу, втрати потоку теплоти через корпус печі в навколишнє середовище, втрати потоку теплоти з димовими газами. Окрім цього були досліджені процеси теплообміну в робочому просторі печі. Числові дослідження проведені при різних значеннях продуктивності печі та різного ступеня зношування футерівки.

Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що при використанні додаткової теплоізоляції футерівки в зоні випалювання за рахунок зменшення теплових втрат в навколишнє середовище зменшується

потік підведеної теплоти приблизно на 4 %, що призводить до економії витрати умовного палива біля 4 тис. т / рік. Збільшення потоку підведеної теплоти в високотемпературній зоні призводить до зменшення ентальпії димових газів в підготовчих зонах, що в цілому призводить до збільшення коефіцієнта використання палива. Загалом встановлення додаткової теплоізоляції в футерівці дозволило підвищити ККД печі на 9,2 %.

У третьому розділі наведені результати досліджень впливу теплової ізоляції футерівки на теплові режими роботи печі. Температурні поля в футерівці визначали з урахуванням теплообміну між сировинним матеріалом, теплоносієм і футерівкою у робочому просторі та передачі теплоти від металевого корпусу в навколишнє середовище. При вирішенні задачі використане двовимірне диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності в циліндричній системі координат з відповідними граничними та початковими умовами. За результатами числових розрахунків було встановлено, що при використанні теплоізоляції в футерівці втрати теплоти від корпусу печі в навколишнє середовище знижуються на 22-54%, а за рахунок радіаційного теплообміну збільшується тепловий потік від нагрітої футерівки до відкритої поверхні матеріалу. Наявність комірок з додатковою теплоізоляцією сприяє виникненню теплових пульсацій, які дозволяють інтенсифікувати тепло- масообмінні процеси при обпаленні сировинних матеріалів, а це призводить до підвищення продуктивності печі.

Оптимальна форма теплоізоляційних комірок в футерівці визначена при моделюванні напружено-деформованого стану печі з урахуванням дії гравітаційних сил та термосилових навантажень. Встановлено, що комірки з додатковою теплоізоляцією із мулітокремнеземистої вати розміром 60x60 мм є найбільш ефективними, оскільки дозволяють зменшити теплові втрати з зовнішньої поверхні печі на 40%, а напруження, що виникають у периклазохромитових вогнетривах, не перевищують допустимих. Рекомендовано комірки трикутної форми встановлювати в зоні спікання, а прямокутної - в зонах екзотермічних реакцій та декарбонізації.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням температурних полів в футерівці з теплоізоляцією, для чого був спеціально виготовлений фрагмент футерівки з теплоізоляційними комірками із мулітокремнеземистої вати. Випробування проводили в електричній нагрівальній печі в лабораторії ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва». За результатами узагальнення отриманих експериментальних даних встановлено, що при порівнянні з розрахунковими температурними полями похибка експерименту не перевищує 6% з довірчою ймовірністю $W = 0,95$.

В додатках наведені програми числових розрахунків та оцінка похибки експериментальних досліджень.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 7 статей у наукових виданнях України, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України та мають категорію Б; 1 стаття у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, яка віднесена до третього квартиля (Q3) відповідно до класифікації Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача характеризуються високим науковим рівнем, при їх підготовці до видання проходили відповідні рецензування та перевірку на плагіат згідно з умовами видавництва. Вагомим також є особистий внесок здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих із співавторами. Публікації охоплюють усі результати наукового дослідження.

Таким чином, наукові результати, які описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

До оформленої дисертаційної роботи можна зробити наступні зауваження:

1. В анотації дисертації наведена фраза, що потребує пояснення: «Використання додаткової ізоляції в футерівці є більш ефективним способом економії енергії, ніж економія палива». Але фактично використання ізоляції зменшує втрати теплоти від зовнішньої поверхні печі, що зменшує витрату палива на компенсацію цих втрат.

Там же в пункті «практична цінність...» фразу «- доповнена та реалізована математична модель для комплексного дослідження...» слід було б навести в науковій новизні.

2. В рівняннях теплового балансу пічної установки (розділ 2) не скрізь розрифровані параметри, які до них входять, а це затрудняє читання матеріалу і аналіз цих рівнянь. Також не завжди назва цих рівнянь відповідає фізичній суті процесу.

Наприклад, перед записом рівняння (2.4) зазначено «кількість тепла, переданого матеріалу через футерівку». Наразі це рівняння для визначення потоку теплоти, що передається матеріалу від нагрітої футерівки. Також в цьому рівнянні не розшифрований параметр k , не наведені одиниця та рекомендації щодо його визначення.

3. В рівняннях (2.5) – (2.10) для визначення відповідних потоків теплоти окремих зон для температур газів, матеріалу, футерівки слід було б зазначити не «по довжині печі», а «по довжині окремих енергетичних зон».

В розшифровці величин до формули (2.20) теплоємність клінкеру слід було б навести в Дж/(кг·К), а не в Вт, як зазначено.

4. В розшифровці величин до рівняння (2.16) для визначення потоку теплоти від спалювання палива величину a слід було б назвати «питома витрата палива на обпалювання матеріалу», як вона зазначена після формули (2.24), а не «коефіцієнт температуропровідності», як зазначено. Також нижчу теплоту згоряння природного газу необхідно навести в Дж/м³, а не КДж/кг (остання використовується для твердого та рідкого палива).

5. В рівнянні (2.38) величина q_0 – це густина теплового потоку в Вт/м², а не тепловий потік, Вт, як зазначено. До рівняння (2.38) розшифрована теплопровідність λ_0 , без зазначення одиниці, а в наведеному рівнянні для визначення коефіцієнта тепловіддачі від корпусу печі немає посилання на джерело та не наведена одиниця цієї величини.

6. На рис. 2.4 – 2.6 не вірно позначені наведені залежності. Фактично 1 – це похибка, 2, 3 – одна з них аналітична залежність, інша – отримана числовим розрахунком.

На рис. 2.7, 2.9 (літературні дані) слід було б навести значення довжин відповідних зон печі.

Рис. 2.11 підписаний як «Залежність ступеня зношеності футерівки від витрати газу». Фактично це «Залежність витрати природного газу від ступеня зношеності футерівки».

Рис. 2.12 фактично дублює рис. 2.11, але тут наведена питома витрата палива, а фізична сутність залишається та сама.

На рис. 2.13 наведені зміни температури при різних продуктивностях печі. Тут потрібно було б додати «і при різних ступенях зношеності футерівки».

В розділі 2 наведена велика кількість графічних залежностей різних параметрів, які отримані за результатами числових розрахунків для базових конструкцій печей при «сухому» і «мокрому» способах обпалення сировинних матеріалів, а також аналогічні залежності і для печей при

використанні футерівки з теплоізоляцією. Їх можна було б суттєво скоротити, а порівняльні характеристики навести у вигляді таблиць.

7. На рис. 3.4 (розділ 3) наведені по дві залежності зміни температури корпусу та густини теплового потоку від корпусу в навколишнє середовище від часу завантаження, але немає пояснень для яких умов вони побудовані.

Не зовсім потрібний графік на рис. 3.6 б, де наведена різниця температур між контрольними точками А і Б, тому що вище ця різниця прослідковується на рис. 3.5 а. Також рис. 3.6 б повинен був позначений як 3.5 б.

Наведені підписи до рис. 3.25, 3.26 «Зменшення теплового потоку для різних товщин футерівки та розмірах комірки прямокутної форми». Але на графіках позначений такий параметр як «Ефективність, %».

8. Мабуть немає потреби наводити значення розрахункових температур з точністю до десятих при величинах 619, 1190 °С тощо (С. 115).

При розшифровці параметрів після формул в розділі 3 не вказуються їх одиниці, наприклад, формула (3.21) тощо.

9. До оформлення тексту дисертації, термінології, деяких одиниць:

- В анотації після слів «В першому розділі...», наприклад, пропущене слово «проаналізований»;

- В деяких випадках зустрічається словосполучення «тепловий опір», хоча насправді це є «термічний опір футерівки»;

- Не скрізь вірно наведені одиниці теплоємності, «коефіцієнт теплопровідності» слід називати «теплопровідність»; «коефіцієнт температуропровідності» - «температуропровідність», термін «тепло» слід називати «теплота», в деяких випадках зазначається «кількість теплоти», хоча наводиться одиниця «потоку теплоти, Вт»; невдалий термін в характеристиці печі базової конструкції – «колишня продуктивність печі»;

- В деяких випадках зустрічаються розриви слів, невірні деякі літери в словах тощо.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Швачка Дениса Григоровича на тему «Теплова ефективність футерівки обертових печей для виробництва будматеріалів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю,

практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Швачко Денис Григорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

Рецензент:

доцент кафедри теплової та
альтернативної енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
кандидат технічних наук,
доцент

Михайло БОЖЕНКО



«22» січня 2024 року