

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Єрофеєвої Аліні Анатоліївни
«Підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей шляхом
використання керованих електричних полів», що подана на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

I. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Україна є державою, де металургійна промисловість грає одну з ведучих ролей в економіці країни. Але, металургійні процеси майже усі пов'язані з великими витратами теплової енергії, яка генерується більшою мірою за рахунок використання природного газу. Промислове устаткування, яке використовується в різних технологічних процесах, в більшості випадків є застарілим. З одного боку воно вичерпало свої часові ресурси, а з іншого, воно було розроблене ще в Радянські часи, коли про завдання енергозбереження, а особливо заощадження природних ресурсів навіть і не згадували.

Але в сучасному світі все змінилося. Питання підвищення енергетичної ефективності взагалі і виробничого устаткування зокрема, а також заощадження енергоресурсів, в тому числі, природного газу є одними з найсерйозніших викликів, які стоять перед сучасними розробниками, технологами, інженерами і вченими. Завдання реконструкції або повної заміни застарілого виробничого устаткування є наріжним каменем стратегії виживання країни для досягнення високого рівня конкурентоспроможності продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках.

Україна особливо відчуває серйозний дефіцит енергоносіїв, який загострився у зв'язку з подіями на Сході країни. Крім того країна зазнає серйозну економічну кризу, в умовах якої не завжди можливо залучати значні кошти для оновлення виробничих потужностей і устаткування. Тому оригінальні технічні або наукові рішення щодо удосконалення технологічних процесів, що не потребують значних фінансових вкладень, завжди є привабливими і викликають великий інтерес.

На додаток, зменшення обсягу спалювання природного газу добре узгоджується з сучасними вимогами декарбонізації економіки, дозволяє знизити викиди вуглекислого газу, зменшує навантаження на навколишнє середовище і, таким чином, робить свій внесок у вирішення проблеми зміни клімату.

У зв'язку з викладеним вище, рецензована робота, що спрямована на підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей та скорочення використання природного газу, є актуальною як в науковому, так і прикладному плані не тільки для України, а й для усього світу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетного напряму наукових досліджень «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та пріоритетного тематичного напряму наукових досліджень «Технології електроенергетики та теплоенергетики», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р. Матеріали дисертації є складовою частиною науково-дослідних робіт: «Розроблення технології та організація промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (№ ДР 011U004839), наукового проекту молодих вчених «Розробка інтерметалідних каталізаторів для знешкодження вуглецевмісних компонентів газових викидів в атмосферу» (№ 9-1Д/2019), що фінансується за рахунок державного бюджету (№ ДР 0119U100588), а також господарської роботи «Дослідження енергозберігаючих технологій, раціональних режимів енергоспоживання та розробка методичних зasad енергетичного менеджменту» (12-1 ДВ/11).

Методи дослідження

При виконанні роботи використовувались: розрахунково-теоретичний метод, що базується на використанні класичних законів тепломасообміну, основних законів електродинаміки; методи вирішення задачі моделювання турбулентного руху в'язкої рідини в обмеженому просторі; спільне застосування розрахункових і інженерних методик дослідження; експериментальні методи дослідження температурного поля; сучасні методи математичної обробки результатів досліджень; статистичні методи аналізу з використанням програми STATISTICA 13, дослідно-промислові випробування.

Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів

Новими результатами, отриманими в процесі виконання дисертаційної роботи, є наступні:

1. Запропоновано і обґрунтовано спосіб щодо підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей, який, на відміну від існуючих, базується на перерозподілі температурних полів у місцях розташування заготовок при їх нагріванні (до 1000 °C) та витримці (до 4 годин) за рахунок використання електричних полів, що дозволяє зменшити споживання природного газу на 5-10 %.

2. Отримали подальший розвиток дослідження щодо створення додаткового впливу на температурні поля газів у робочих просторах камерних печей за рахунок керованих електричних полів напруженістю до 1100 В/м, що дозволяє більш оперативно впливати на температуру нагріву та витримки садки (до 8 %) та підвищити енергетичну ефективність процесу термообробки металу.

3. Вперше розроблено та обґрунтовано раціональне управління нестационарним електричним полем у робочому просторі теплотехнічних

установок, що дозволяє інтенсифікувати процеси тепломасообміну й зменшити електроспоживання на 33 % у порівнянні зі стаціонарним електричним полем.

Особистий внесок здобувача

Всі результати дисертаційної роботи одержані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: в [1] – аналіз існуючих способів та розробка нових підходів до вирішення задачі підвищення ефективності теплообміну в промислових печах. В [2,3] – розробка принципової схеми дослідної установки, прийняття безпосередньої участі у проведенні експериментальних досліджень щодо підтвердження можливості керування тепловими потоками електричним полем та розробка математичної моделі розподілу температури в печі за наявності електричного поля. В [4] – розрахунки технічно обґрунтованої напруги в камері пічної установки та оцінка економічної доцільності використання електричного поля в камері газової нагрівальної установки. В [6] – розробка плану експерименту для визначення раціональних енергетичних параметрів пічної установки за наявності електричного поля в її камері. В [7] – участь у проведенні в умовах промислового підприємства експериментальних досліджень щодо впливу електричного поля на розподіл температурних полів газів у камерах печей та отриманні реальних даних щодо економії споживання природного газу. В [8] – моделювання полів швидкостей пічних газів у камері печі та обґрунтування можливості створення теплових бар’єрів за рахунок керованих електричних полів у робочих просторах камерних печей з метою підвищення їх енергоефективності. В [9] – розробка алгоритму управління процесом нагрівання металу у печі з додатковим використанням у якості керуючого впливу електричних полів..

Апробація роботи і достовірність результатів.

Основні результати дисертаційної роботи докладені на 11 вітчизняних та міжнародних конференціях та семінарах.

Достовірність отриманих здобувачем результатів підтверджена коректністю постановки задачі, використанням обґрунтованих методик експериментальних та чисельних досліджень, високими значеннями (не менше 95 %) довірчої ймовірності, адекватністю розроблених математичних моделей, результатами впровадження і натурних випробувань.

Мова та стиль роботі

Стиль написання дисертаційної роботи та її виклад відповідають вимогам до друкованих видань, зміст роботи викладено послідовно і логічно. Текст роботи повністю відображає результати наукових досліджень, при викладі використовується сучасна загальноприйнята наукова і технічна термінологія.

Публікації та автoreферат.

Основні результати дисертаційної роботи висвітлюються у 20 наукових працях, з яких 8 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових

фахових видань України, 1 стаття, яка включена до міжнародної наукометричної бази Web of Science Core Collection, 10 тез доповідей до конференцій, 1 патент на корисну модель. Всі публікації містять результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень і відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи

Автореферат кандидатської дисертації за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі

Структура і обсяг роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків, містить 15 таблиць, 55 рисунків, бібліографічний список зі 130 джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 147 сторінок.

II. АНАЛІЗ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Загальна характеристика роботи

У вступі викладено обґрунтування актуальності роботи, визначено мету і завдання дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, дані про апробацію результатів дослідження та публікації здобувача за темою дисертації. Обсяг і форма вступу відповідають загальноприйнятим нормам і вимогам до кандидатської дисертації і є достатніми для ознайомлення з вихідними передумовами та основними положеннями, які виносяться автором на захист.

У першому розділі автор розглядає існуючі конструкції та особливості камерних печей, аналізує структуру споживання природного газу в Україні та виконує розрахунок теплового балансу камерної печі на прикладі одного з агрегатів, що використовується на металургійних підприємствах України. Виконаний аналіз дозволив автору продемонструвати низьку енергоefективність камерних печей та виявити найбільш впливову складову у тепловому балансі, яка зумовлює такій негативний результат.

Автор аналізує наявні на сьогоднішній день публікації, присвячені проблемам підвищення енергоefективності камерних печей, і показує, що вирішення знайденої проблеми можливе за рахунок вдосконалення напряму потоків продуктів згоряння газу в камері печі. Також автор переконливо обґруntовує необхідність та перспективність виконання додаткових досліджень, незважаючи на те, що питання вдосконалення теплової роботи печей вивчаються протягом багатьох десятиліть вітчизняними і зарубіжними вченими.

Обґрунтовано напрям досліджень, який має за мету вивчення впливу керованих електричних полів на енергоefективність камерних нагрівальних печей.

Поставлені завдання цілком і повністю відповідають рівню вимог до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Зауваження до розділу:

1. Пункт "Аналіз існуючих проблем енергоефективності камерних печей" відсилає до даних 2016-2018 рр. У нинішніх умовах, коли технології розвиваються і удосконалюються дуже швидко, бажано було використовувати свіжі дані.

2. У Таблиці 1.1 – розрахунок теплового балансу печі – сумарні значення статей надходжень і витрат тепла не стикуються між собою.

3. Автор використовує термін "теплового бар'єру" для "перешкодження руху теплових потоків у небажаному напрямку". Однак не наводить його точного визначення. У той же час таке поняття є нестандартним, що викликає необхідність його пояснення і обґрунтування.

У другому розділі «Дослідження щодо управління напрямком і швидкістю пічних газів у камері печі» розглянуто методологічні підходи сучасної теорії конструювання і модернізації печей. Автор наводить достатню кількість математичних моделей, які дозволяють враховувати ряд складних теплофізичних і гідродинамічних процесів, що відбуваються в високотемпературних теплотехнологічних установках. Автор демонструє глибоке знання щодо математичного апарату для розв'язання складних задач аеродинаміки та теплообміну.

Автор показує що більша частина досліджень не дозволяє враховувати розподіл теплових потоків у печі і, тим паче, керувати цім розподілом. Водночас з тим автор висуває припущення, що використання електричного поля дозволяє змінювати напрям руху продуктів згоряння, посилаючись на розробки деяких дослідників, а також на попередні власні результати.

З метою оцінки характеру руху пічних газів в розглядуваній печі автор виконує моделювання та чисельне дослідження зазначених процесів. Моделювання поля швидкостей виконано за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса у двомірній постановці з використанням RNG $k-\varepsilon$ моделі турбулентної в'язкості. Для моделювання теплового бар'єру автор запропонувала використати умовні додаткові пальники, напрямок потоку продуктів згоряння яких впливав на основний потік циркулюючих димових газів. Отримана у результаті чисельного дослідження картина полів швидкостей газів в робочому об'ємі дозволила автору зробити аналіз щодо ефективності використання таких додаткових пальників у зоні розташування металевих виробів, що нагріваються у печі. Результати автора підтвердили можливість використання запропонованого методу для вдосконалення аеродинаміки руху димових газів. Але автор підкреслює, що такий спосіб модифікації конструкції печі є досить складним і сумнівним з точки зору використання.

Зауваження до розділу:

1. Оцінку впливу електричного поля на аеродинамічні параметри потоку в просторі печі запропоновано виконати за допомогою "умовного" вдуву.

Організація "умовного" вдуву виконана шляхом введення в схему моделі додаткових пальників. Однак таке уявлення призводить до виникнення локальних джерел масової витрати. У той час як в реальній ситуації накладене електричне поле, з точки зору рівнянь газової динаміки, являє собою поле масових сил, розподілене в просторі за заданим законом. І воно точно не є локальним.

Якщо говорити про газодинамічну аналогію впливу електричного поля в даному випадку, то фізично подібним різниці потенціалів електричного поля параметром є градієнт тиску. Тому для наближеної оцінки більш коректно було використовувати, наприклад, знижений тиск на поверхні заготовки. Такий підхід дозволив би отримати більш правильну структуру та напрямки потоків в просторі печі.

Крім того, для визначення впливу, величина масової витрати через додаткові пальники становила 10 % від витрат з основного пальника. Додаткова витрата в даному випадку істотно змінює розподіл потоку не тільки за рахунок напрямку та швидкості, але і за рахунок внесення маси, що, з моєї точки зору, є не цілком коректним.

2. Не зрозуміло, чому в переліку рівнянь, що описують модель процесів в просторі печі, відсутнє рівняння енергії. Оскільки в реальності в розглянутих процесах існують значні градієнти температур, вплив теплових потоків на течію продуктів згоряння в просторі печі є істотним. Більш того, кінцевою метою всього дослідження є оптимізація теплових процесів, які описуються саме цим рівнянням.

3. Представлені на рис. 2.6 залежності витрати пічних газів від витрати на "тепловий" бар'єр було б краще представити у вигляді залежностей безрозмірних коефіцієнтів тепловіддачі від безрозмірної швидкості – $Nu=f(Re,Pr)$. Таке уявлення є прийнятим для процесів теплообміну.

У третьому розділі дисертації «Експериментальні дослідження щодо формування теплових потоків електричним полем» викладено результати досліджень впливу електричного поля на розподіл теплових потоків у камері нагріву. З метою проведення таких досліджень автором було розроблено експериментальну установку, підібрано систему вимірювальних пристрій і розроблена методика проведення експерименту. При розробці методики автор успішно використовувала методи математичного планування експерименту, які дозволили істотно скоротити кількість проведених експериментів для встановлення необхідних залежностей.

В результаті експериментальних досліджень отримано підтвердження впливу електричного поля на перерозподіл теплових потоків. Також отримана кореляційна залежність, що дозволяє в першому наближенні розраховувати температуру досліджуваної пластиини експериментальної установки при відомих входних параметрах електричного поля і геометрії установки.

Автор переконливо показала володіння технікою постановки, підготовки і проведення експерименту, обробки отриманих результатів та їх узагальнення.

Отримана кореляційна залежність для розрахунку температури пластини демонструє також володіння апаратом регресійного аналізу, що є безперечним достоїнством рецензованої роботи.

Результати, які представлено в даному розділі дисертаційної роботи, є вагомим внеском здобувача в розширення знань і уявлень про вплив електричного поля на процеси газодинаміки та переносу тепла в продуктах згоряння.

До зауважень по цьому розділу варто віднести наступні:

1. Описаний "механізм можливого впливу електричного поля на розповсюдження теплового потоку" (стор. 62-63) виглядає не дуже переконливим. Утворення заряджених частинок вимагає досить високих енергій, які в просторі печі (при температурах 600-1000 °C) просто не існують. Цей механізм працює тільки в полум'ї за рахунок хімічних реакцій іонізації, але не в просторі печі. Тому говорити про "виникнення активних центрів за рахунок непружніх зіткнень" не є резонним. Крім того, зіткнення зарядженої частинки з будь-якою металевою поверхнею призводить до втрати заряду частинкою в силу істотної різниці мас частинки і заготовки. А, оскільки металеві пластини/деталі мають протилежний частинкам заряд, нейтралізація заряду відбувається ще швидше. А при втраті заряду іон стає нейтральною частинкою і вже не утримується електричним полем і виносеться потоком, що набігає, за межі поверхні теплообміну.

2. Повністю відсутній розділ оцінки похибок вимірювання. Тому оцінити достовірність кількісних результатів досить проблематично.

Наприклад, точність вимірювання температури лазерним пріометром залежить від значної кількості факторів. Данні по похибкам виміру пріометрів, які наводяться виробниками, відносяться до визначення температури ідеального випромінювача (абсолютно чорного тіла) в діапазоні 20-25 °C. Зазвичай вона становить 1-1,3 %. До цього потрібно додати залежність випромінювальної здатності об'єкта від температури, точність визначення поправочного коефіцієнта для реального об'єкта, залежність показань пріометра від відстані та кута огляду і т.п. Таким чином, реальна похибка може становити до 25 %. Навіть заявлена похибка приладу в 1% при температурі об'єкта 600 °C складе ± 6 °C. Якщо враховувати всі перелічені фактори, похибка вимірювання в 25 % складе 150 °C. Ця величина перекриє всі отримані результати. Тому, для підтвердження надійності результатів оцінки похибки вимірювальної техніки та методики експерименту повинні бути наведені.

3. У методиці проведення експерименту написано, що установка прогрівається протягом 15 хвилин, після чого виконують вимір температури. На рисунках 3.13-3.16 часова шкала досягає 60 хвилин. Не зовсім зрозуміло, як проводився експеримент.

Також не зрозуміло, чому вимірювання закінчувалися на значенні 60 хвилин. Логічним було б чекати виходу установки на стаціонарний режим. Рисунки 3.13-3.16 підтверджують, що стаціонарний режим не був досягнутий в жодному з експериментів.

4. В описі проведення експериментів, переліку впливаючих параметрів і подальшої побудові кореляційної моделі вказується, що серед розглянутих параметрів присутній кут нахилу пластин до осі потоку. У розділі 3.6 при пошуку коефіцієнтів кореляційної моделі зазначено, що кут нахилу не впливає на процеси розподілу температури. Однак, експериментальні дані, що підтверджують цей факт, в роботі не наводяться.

Те ж саме відноситься до полярності напруги – в описі методики експерименту зазначено, що необхідно проводити експерименти при 2-х варіантах полярності. Проте експериментальні дані не наводяться, а в списку параметрів, що впливають, полярності немає взагалі. При цьому роботи інших дослідників показують, що полярність напруги може робити істотний вплив в перерозподіл теплових потоків.

У четвертому розділі роботи «Промислові випробування впливу електричного поля на температурне поле газів у камерній печі» наведені результати промислових випробувань впливу електричного поля на температурне поле газів у камерній печі.

Автор довела, що вміє організовувати комплексні промислові випробування з урахуванням суворих вимог технологічного процесу і безпеки виробництва.

У розділі розглядаються процеси удосконалення термічної обробки металевих виробів в умовах промислового виробництва з використуванням результатів попереднього лабораторного експерименту.

Виконано серію промислових експериментів, результаті яких підтвердили можливість підвищення енергоефективності камерної печі з викатним подом та скорочення обсягів витрат природного газу за рахунок впливу електричного поля на розподіл потоків димових газів в просторі печі. Отримані результати дозволили встановити, що за умови використання електричних полів за один цикл термічної обробки можливо досягти скорочення споживання природного газу в межах 5-10 % у порівнянні з показниками діючої печі, що підтверджено відповідним актом.

Також виконано розрахунковій аналіз теплового балансу печі при наявності електричного поля та за умов його відсутності. Розрахунковий аналіз підтверджив, що під впливом електричного поля більша кількість теплоті продуктів згоряння передається металевій заготовці, а не губиться з вихідними газами.

Загалом, цей розділ є дуже важливим та цікавим.

В якості зауважень до розділу необхідно зазначити наступне:

1. Така ж сама ремарка, як і до розділу 4 відносно оцінки похибок експерименту.
2. Рис. 4.13. Апроксимація температурних залежностей з використанням полінома не відображає фізичні і технологічні процеси, що протікають при нагріванні заготовки. Було б більш доречним виділити різні технологічні стадії

нагріву, які на рисунку явно проглядаються, і отримати апроксимуючі залежності для кожної з стадій.

3. Порівняльний аналіз таблиць 4.5 і 4.6 викликає деякі сумніви. З одного боку, при подачі напруги на заготовку відбувається перерозподіл теплових потоків, і металом поглинається більша кількість тепла, яке "відбирається" від димових газів. Однак при цьому, більша кількість тепла також поглинається кладкою печі, як випливає з розрахунку. Чому?

Крім того, якщо при подачі напруги в 1000 В зменшується сумарна витрата газу на технологічний процес, як випливає з рисунка 4.15, чому в таблиці 4.6 значення теплоти від згоряння палива (хімічна теплота) залишається такої ж величиною, як і при розрахунку балансу в разі відсутності електричного поля?

Нарешті, електрична потужність, що підводиться до печі в технологічному процесі, становить $1000 \text{ В} \times 2 \text{ А} = 2 \text{ кВт}$. За час циклу нагріву і витримки – 7,5 годин – це становить $15 \text{ кВт} \times \text{год} = 54000 \text{ кДж}$. Даної енергії також перетворюється в тепло і повинна враховуватися в розрахунку теплового балансу. Однак, в розрахунку її немає.

П'ятий розділ роботи «Перспективи практичного використання результатів дослідження» присвячений технічним додаткам результатів експериментально-теоретичних досліджень та розробці алгоритму подальшого підвищення ефективності використання електричних полів у камерних печах.

Автором запропоновано алгоритм управління процесом нагріву металу у камерній печі, в якому вперше в якості додаткового керуючого впливу використовуються керовані електричні поля, створення яких на реальному підприємстві не потребує значних капіталовкладень та зовнішніх теплоутилізаторів.

Грунтуючись на аналізі додаткової літератури, автор висунула гіпотезу про можливе додаткове зниження витрат енергії на створення електричного поля. Запропоновано замінити постійне електричне поле на змінне з особливою формою імпульсів.

Автор також виконала пошук оптимальних параметрів представлених імпульсів за критерієм мінімальних енерговитрат при збереженні встановлених технологією температурних режимів. За цього виконано опрацювання багатьох наборів результатів промислових експериментів за допомогою багатокритеріального аналізу.

В результаті дослідження отримано параметри імпульсів змінного поля, які дозволяють скоротити втрати на організацію поля до 33 %.

Виконано впровадження результатів роботи і рекомендацій у виробничий процес, що додатково підтверджує безсумнівну практичну цінність даної дисертаційної роботи.

Зауваження до розділу:

1. Розробка алгоритму оптимального управління технологічними параметрами з урахуванням впливу електричного поля є дуже важливим пунктом. Однак, для прийняття остаточного рішення необхідно мати істотно більший набір даних. Отримання кореляційної залежності по набору з 5 точок, як виконано зараз, не є статистично надійним.

2. При використанні нестационарного електричного поля виникає супутнє йому нестационарне магнітне поле. Оскільки в камері печі присутні металеві деталі, у всіх них будуть виникати індукційні струми, які будуть створювати свої власні змінні магнітні поля. Це призведе до змін початкової конфігурації електричного поля. В результаті, напрямок руху заряджених частинок в продуктах згоряння буде змінюватися і відрізнятися від такої в постійному електричному полі. Відповідно, буде відбуватися перерозподіл теплових потоків. У зв'язку з тим, що в процесі пошуку оптимального поєднання параметрів, величини витрат газу (таблиця 5.1) використані з набору даних, отриманих при впливі постійного електричного поля, отримані співвідношення для множини Парето (рисунки 5.5, 5.6) будуть не коректними.

III. ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ І ПОБАЖАННЯ

У якості загальних зауважень і побажань хотілося б сказати наступне:

1. Автор роботи продемонструвала глибокі знання в широкій області процесів тепломасообміну та електродинаміки, професійні навички постановки та проведення фізичних експериментів і узагальнення результатів. Отримано цікавий матеріал по особливостям теплообмінних процесів в умовах впливу електричного поля. Автором роботи показано високий рівень знань в галузі математичного моделювання і чисельного аналізу, так само як і в області кореляційного аналізу. Представляється доцільним виконати подальше дослідження фізики впливу електромагнітних полів на динаміку руху димових газів та коефіцієнтів тепловіддачі.

2. Рекомендується збільшити кількість публікацій в міжнародних індексованих виданнях для розширення представництва розробок українських вчених для світової наукової спільноти.

IV. ВИСНОВКИ ОПОНЕНТА

Зроблені зауваження не впливають на рівень наукових результатів, висновків і рекомендацій, виконаних здобувачем, їх новизну і достовірність і не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Єрофеєвої Аліні Анатоліївни є завершеною науково-дослідницькою працею, в якій на основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень вирішенні поставлені завдання і досягнута мета дослідження: «Підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей шляхом використання керованих електричних полів».

Роботу виконано на сучасному науково-технічному рівні, отримані результати розширяють знання та уявлення в галузі теплофізичних і тепломасообмінних процесів, що виникають в технологічних апаратах та устаткуванні під впливом електричного поля, дозволяють по-новому оцінити енергетичний потенціал такого впливу і визначити способи управління його характеристиками для підвищення ефективності технологічних процесів спалювання природного газу, а також є практично важливими для промисловості та енергетичної галузі України на сучасному етапі.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації є обґрунтованими, їх достовірність і новизна не викликають сумнівів.

Оформлення та стиль викладу матеріалу дисертаційної роботи доступні для сприйняття і відповідають сучасним вимогам, що пред'являються до наукових праць.

Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, основні наукові положення, що містяться в дисертаційній роботі і в авторефераті, повністю ідентичні.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи адекватно відображені в публікаціях автора у науково-технічних виданнях, рекомендованих ДАК МОН України, матеріали дисертації в достатній мірі були представлені на конференціях державного та міжнародного рівня.

Дисертаційна робота за змістом відповідає спеціальності 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, а також вимогам ДАК (п. п. 9, 11, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння наукового звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 зі змінами), що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор, Єрофеєва Аліна Анатоліївна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук.

Офіційний опонент,

Старший науковий співробітник відділу високотемпературної термогазодинаміки
Інституту технічної теплофізики НАН України,

кандидат технічних наук



А.В. Кузьмін

