

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу МОРОЗА Олега Сергійовича на тему «Зниження термічних напружень і підвищення терміну служби елементів енергетичного обладнання шляхом використання стабілізаторних пальників» представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з науковими державними і галузевими програмами.

Значна кількість енергетичних та теплотехнічних об'єктів в Україні – котлів, печей, підігрівачів, сушарок тощо, які використовуються в енергетиці та промисловості, характеризується значною моральною та фізичною зношеністю, необхідністю проведення капітального ремонту, наявністю різного виду пошкоджень і вимагає підвищення надійності, економічності та рівня екологічної безпеки обладнання. Найбільша кількість аварійних зупинок енергетичного і промислового обладнання пов'язана з пошкодженням, або виходом з ладу його високотемпературних вузлів.

Оскільки на даний час на багатьох підприємствах немає можливості замінювати зношене обладнання на нове через економічну ситуацію в країні, виникає необхідність проведення аналізу стану найбільш навантажених високотемпературних вузлів, прогнозування можливості і умов їхньої подальшої експлуатації, а також розробка пропозицій щодо продовження терміну їх роботи.

Серед основних негативних факторів в теплоенергетичних установках, які впливають на роботу енергетичного обладнання, особливо на змінних режимах, можна визначити перевищення температури газів понад розрахункову, а також локальну нерівномірність температури, яка може досягати (400–500) °С. Також слід брати до уваги нестабільність та пульсації факелу до (300–350) °С в одному і тому ж місці в різний час. Тому дослідження щодо визначення впливу рівня температури газів та їх локальної нерівномірності на тепловий та напружено-деформований стан відповідних елементів обладнання є затребуваними, а дисертаційна робота, яка спрямована на вирішення цієї проблеми малозатратним експериментально-розрахунковим шляхом з використанням сучасних методів є безумовно актуальною.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі теплової та альтернативної енергетики Науково-навчального інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського (НТУ КПП) в рамках робіт, що виконувались на кафедрі у пріоритетному напрямку «Енергетика та енергоефективність» у відповідності з планами Міністерства освіти і науки України по темах: д/б тема

2803-п (№ ДР 0115U000340) – «Розробка засобів із продовження експлуатації високотемпературних елементів енергетичного та промислового обладнання»; д/б 2924-п (№ ДР 0116U003741) «Підвищення ефективності та екологічності роботи енергетичного устаткування при різних видах палива та умовах управління навантаженням»; г/д № 246 з ТОВ «НМУ «Електропівденмонтаж»; г/д № 2762 - ВЭ-КуТЭС з ТОВ «ДТЕК СХІДЕНЕРГО».

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше за допомогою комплексу ANSYS Fluent розроблена програма визначення термічного і термонапруженого стану високотемпературних елементів енергетичного обладнання;
- розроблена програма розрахункової оцінки терміну експлуатації високотемпературних елементів в стаціонарних і змінних режимах;
- доповнені експериментальні дані і уточнені залежності щодо вирівнювання характеристик газового потоку в топковому просторі при використанні стабілізаторних пальників;
- показана можливість регулювання поля температур газів в топковому просторі зміною конструктивних параметрів стабілізаторних пальників;
- вперше запропонована технологія спалювання забаластованих низько реакційних газових палив в стабілізаторних пальниках;
- вперше розроблено і досліджено моделі стабілізаторних пальників для спалювання альтернативних низько реакційних газових палив;
- отримані експериментальні дані та одержані узагальнюючі залежності стосовно характеристик робочого процесу горіння газів різного складу, який може суттєво змінюватись під час роботи.

Вірогідність отриманих наукових положень підтверджена застосуванням сучасних уявлень про гідродинаміку потоку і процеси горіння і тим, що отримані результати не суперечать результатам відомих досліджень. Наукові положення, висновки й рекомендації, запропоновані у дисертаційній роботі підтверджені узгодженням отриманих результатів з експериментальними даними та узагальненими даними інших авторів. При виконанні роботи застосовувались методи математичної обробки результатів чисельного та натурного експериментів.

В дисертаційній роботі було повністю виконано поставлене наукове завдання щодо розрахунку термонапруженого стану та оцінки залишкового ресурсу теплосприймаючих поверхонь енергетичного обладнання на основі розрахунково-експериментальних досліджень рівня та градієнта температур газів; дослідження стабілізаторних пальників, що дають можливість впливати на поле температур газів, а також розробки пальників з використанням низько реакційних

газових палив змінного складу. Здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Мороза О. С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика для третього (освітньо-наукового) рівня та напрямкам досліджень відповідної освітньо-наукової програми «Теплоенергетика» НТУ КІП.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям кафедри теплової та альтернативної енергетики «Ресурс енергообладнання та розробка засобів подовження терміну його експлуатації; фізика процесів горіння і підвищення енергоекологічної ефективності енергетичних об'єктів і систем».

Ознайомившись з текстом роботи та розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Мороза Олега Сергійовича 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.

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

В представлених матеріалах послідовно і доступно з використанням загальноприйнятої термінології викладено результати проведеної роботи.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 172 сторінки.

У вступі показана актуальність теми, яка пов'язана з тим, що значна кількість енергетичних та промислових об'єктів – котлів, печей, підігрівачів, сушил, газотурбінних установок тощо, які використовуються в енергетиці та промисловості України, характеризується значною моральною та фізичною зношеністю, вимагає ремонту і покращення ефективності роботи.

В наявних складних економічних умовах України модернізація установок є найбільш доцільним шляхом підвищення їх ефективності при мінімальних затратах. За розрахунками, сума вкладень для продовження експлуатації в 3–5 разів менше, чим введення в дію нових потужностей. Певним умовам експлуатації

обладнання повинна відповідати найбільш ефективна схема організації паливного процесу в топці.

У першому розділі розглянуто сучасний стан вітчизняного енергетичного обладнання.

Здобувачем виконано огляд роботоспроможності металів при високих температурах, надійність їхньої роботи, проаналізовано характеристики міцності металу при високих температурах і робота елементів обладнання в нестационарних температурних умовах, в тому числі в умовах температурної нерівномірності. Розглянуто основні причини виникнення температурної нерівномірності в енергетичному обладнанні.

З проведеного огляду матеріалів щодо умов роботи високотемпературних елементів енергетичного та промислового обладнання зроблено висновки і розроблені завдання по проведенню відповідних досліджень з метою аналізу його стану та заходів щодо підвищення його надійності та ефективності.

Показано, що існуючі на даний момент методи, які пов'язані з визначенням термічних напружень в високотемпературних елементах енергетичного обладнання, вимагають проведення тривалих випробувань і виконання громіздких розрахунків. З урахуванням досягнень сучасних комп'ютерних технологій з'явилась можливість створення підходів щодо виконання відповідних досліджень за значно коротший термін, з меншими затратами і з використанням мінімальної кількості дослідних даних.

Враховуючи визначальний вплив паликових пристроїв на формування поля температур газів в топковому просторі, одним з пріоритетних напрямків роботи визначено використання паликових пристроїв, які дозволяють впливати на формування температури газів в топковому просторі з метою зменшення нерівномірності поля температур і термічної напруженості високотемпературних елементів. Перспективним напрямком є використання паликових пристроїв стабілізаторного типу.

Здобувачем показано, що з цією метою є необхідним проведення відповідних досліджень мікродифузійних стабілізаторних паликів з визначення можливості регулювання профілю та локальної нерівномірності поля температур продуктів згоряння шляхом застосування різних схем сумішоутворення палива і повітря. Для розширення сфери використання альтернативних газових палив в енергетиці одним з напрямів роботи намічена розробка стабілізаторних паликів для спалювання альтернативних газових палив з метою зменшення споживання дорого вартісного природного газу.

У другому розділі розглянуто характеристики експериментального обладнання, вимірювальної апаратури, методики обробки експериментальних даних. Приведена схема стенда для проведення випробувань стабілізаторних паликових пристроїв при спалюванні різних видів альтернативних палив.

Наведено методики оцінювання похибок вимірювання основних параметрів: динамічного напору, витрат газового палива та повітря, температури продуктів горіння і основних характеристик робочого процесу.

У *третьому розділі* розглянуто фактори, які впливають на термонапружений стан високотемпературного обладнання і запропоновано методику розрахунку залишкового ресурсу високотемпературних елементів. Для дослідження теплового стану трубопроводів котла було побудовано трьохвимірну модель топкового каналу і використовувались моделі обтікання круглого патрубку. Було проаналізовано декілька моделей турбулентних течій та обрано для використання модель $k-\epsilon$ Realizable. В умовах задачі, що розглядається, безпосередньою перевагою моделі $k-\epsilon$ в порівнянні з іншими є те, що вона забезпечує покращені прогнози щодо швидкості поширення як плоских, так і круглих струменів.

Гідрогазодинамічний розрахунок з обраною моделлю турбулентності було виконано з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent. Це дало змогу проаналізувати газодинамічну та теплову структуру потоку в стабілізаторних пальникових пристроях, обрати теплові граничні умови та виконати розрахункові дослідження теплового стану патрубку. На наступному етапі було проведено розрахункові дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу.

Оцінка малоциклової втомленості та статичної пошкоджуваності виконувались з урахуванням нестационарного напружено-деформованого стану. Отримані температури використовувались для розрахунку кількості циклів до руйнування. На основі максимального напруження за встановлений період часу у відповідних точках розрахована температура конструктивних елементів, що розглядаються.

Така методика на підставі експериментальних або розрахованих температур дає змогу орієнтовно розрахувати термонапружений стан енергетичного обладнання і термін його експлуатації до руйнування.

В *четвертому розділі* розглянуто особливості роботи і зміни параметрів газового потоку при мікродифузійному спалюванні газу в системі стабілізаторів. При аналізі зміни параметрів робочого процесу – швидкості потоку, концентрації, повноти згоряння, температури газів були уточнені дані щодо існуючих результатів випробувань систем стабілізаторів,

Розглянуто питання формування поля швидкості ізотермічного потоку в системі стабілізаторів, а також зміна швидкості потоку, коефіцієнту надлишку повітря і повноти згоряння в системі стабілізаторів при горінні. На наступному етапі увага приділялась визначенню закономірності формування поля температур продуктів згоряння в стабілізаторному пальниковому пристрої в поперечному перерізі стабілізаторного пальника і вздовж стабілізатора, а також комбінований вплив на зміну поля температур газів в топці.

Показано, що довжина вогневого простору, на якій відбувається вирівнювання поля швидкостей, поля температур і компонентів реакції горіння у поперечному перерізі залежить від коефіцієнту затінення і коефіцієнту надлишку повітря.

В мікрофакельних стабілізаторних пальниках є можливість впливати на профіль температури газів в повздовжньому і поперечному перерізах конструктивними засобами – зміною кроку стабілізаторів та їх ширини, зміною (або прикриттям) подачі газу на окремі стабілізатори, відносним зміщенням стабілізаторів вздовж і поперек потоку.

П'ятий розділ присвячено розробленню й дослідженню мікрофакельних стабілізаторних пальників для спалювання забаластованих газових палив, що дає змогу розширити сфери використання стабілізаторних пальникових пристроїв і використовувати альтернативні газі в енергетиці і промисловості.

Альтернативні види палив, як правило, складаються з суміші високо реакційного газу типу метану, і баластових домішок – повітря, двоокису вуглецю, азоту, біодобавок тощо, які, як правило, погіршують характеристики горіння паливного газу, причому відбувається це тим в більшій мірі, чим вище вміст баластової домішки в паливі. Це породжує певні труднощі практичного використання забаластованих газів як палива, до яких додаються ще дві обставини: газі різних видів і різних родовищ мають різний вміст баласту; у багатьох випадках склад газів може змінюватися в часі; газобаластова суміш може виходити за концентраційні межі горіння. Це робить неможливим спалювання таких сумішей за традиційними технологіями і в існуючих пальникових пристроях. Здобувачем показано, що перспективним методом вирішення проблеми спалювання низькокалорійних альтернативних палив, в тому числі, таких, що їх склад виходить за концентраційні межі горіння, є застосування комбінованої подачі низькокалорійного і високотемпературного палив.

Розроблено метод і конструкції стабілізаторних пальникових пристроїв, які забезпечують підвищення сталості горіння забаластованого палива при концентрації домішок від 0 до 100%. Для цього прийнята комбінована технологія подачі палив, при якій струмені низько реакційного палива проходять через високо температурні факели високо реакційного палива і відбувається сталий процес горіння обох палив незалежно від концентрації домішки з забаластованому паливі. При необхідності, потужність пальника підтримується за рахунок збільшення витрати палива, яке подається на стабілізуючий факел. Сталість і довжина загального факелу визначається характеристиками запалюючого факелу.

Розроблено три варіанти модулів стабілізаторних пальників з різними схемами подачі альтернативного і стабілізуючого палив. Розроблено і досліджено двонішевий пальниковий пристрій, в якому, практично без зміни конструкції є

можливість регулювати характеристики сталості і довжини факелу в залежності від умов роботи енергетичного об'єкту.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлено у 20 наукових публікаціях здобувача, серед яких 8 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus (обидві віднесено до кuartилів Q1–Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank); 7 патентів України на корисну модель. Результати дисертації були апробовані на 10 наукових фахових конференціях.

Представлені публікації здобувача виконані на високому науковому рівні та повністю відображають результати, що описані в дисертаційній роботі. В наукових публікаціях дотримані принципи академічної доброчесності. В наведеному переліку показано особистий внесок здобувача для публікацій, опублікованих із співавторами.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

1. Під час вибору моделі турбулентності бажано було б провести порівняльний аналіз розрахункових результатів, що виконані з різними моделями турбулентності, та експериментальних даних
2. Бажано було б обґрунтувати вибір саме програмного пакету StaticStructural для визначення напружень.
3. В роботі не вказано, чи розглядалася можливість використання наведеної методики розрахунку для крихких матеріалів на кшталт чавуна, який також використовується в енергетиці.
4. В роботі не описані детальні причини характеру розподілення розрахункових напружень в усій розрахунковій області. Таке пояснення наведено лише для зони максимального напруження.

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.

В цілому можна констатувати, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії МОРОЗА Олега Сергійовича на тему «Зниження термічних напружень і підвищення терміну служби елементів енергетичного обладнання шляхом використання стабілізаторних пальників» 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 14 Електрична інженерія, та відповідає спеціальності 144 «Теплоенергетика».

Зважаючи на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, які сформульовані в дисертаційній роботі, новизну та практичну цінність, повноту викладення в наукових публікаціях, дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності, вважаю, що дисертація відповідає вимогам чинного законодавства України, які передбачені 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, а її автор, МОРОЗ Олег Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика».

Офіційний опонент:

Заступник директора з наукової роботи
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України
член-кореспондент НАН України
доктор технічних наук, професор



Андрій КОСТИКОВ

М.П. _____ » _____ 20__ року