

## **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 теми дисертації.**

В енергетиці України експлуатується значна кількість енергетичних та промислових котлів різної потужності, печей, сушил тощо, що відпрацювали термін експлуатації. Досвід роботи таких установок показує, що одним із суттєвих факторів, які погіршують їх надійність та економічність, є нерівномірність розподілу палива в топковій камері як у просторі, так і у часі. Це призводить до порушення температурного та тепло-гідравлічного режимів поверхонь нагріву, виникнення додаткових термоциклічних навантажень на метал і зрештою до аварії установки.

Порушення оптимального співвідношення «паливо-повітря» в окремих пальниках і в топковій камері в цілому викликає надмірну як хімічну, так і механічну неповноту згоряння палива, а також викиди оксидів азоту більше, ніж допускається Європейськими нормами.

Одним з основних елементів вогнетехнічних установок, від характеристик якого в значній мірі залежить їх ефективність, економічність, термін роботи, формування теплових потоків в топковому просторі, викиди оксидів азоту тощо, є пальниковий пристрій. На даний час в енергетиці та промисловості використовуються здебільшого пальникові пристрої реєстрового типу.

При роботі реєстрових пальників практично завжди спостерігається відхилення профілю температури газів і відповідно величини напружень в елементах від розрахункових значень.

Циклічні локальні нерівномірності температури призводять до виникнення термічних напружень в різних елементах обладнання, в першу чергу, трубній системі.

В деяких випадках нерівномірність поля температур спонукає до зниження температури газів за рахунок збільшення коефіцієнту надлишку повітря або подачі частки продуктів згоряння в пальник на рециркуляцію.

Одним з можливих шляхів забезпечення максимальної ефективності процесу горіння і формування необхідного профілю температур може бути використання технології мікрофакельного спалювання палива (газу) в пальниках стабілізаторного типу. В основу вказаної технології покладено результати досліджень, що виконані на кафедрі теплової та альтернативної енергетики НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

У вітчизняній та зарубіжній літературі недостатньо матеріалів щодо комплексного підходу до вирішення проблеми впливу газодинаміки та теплообміну на термонапружений стан високотемпературних елементів з використанням комп'ютерного моделювання.

Діагностування стану металу обладнання та продовження терміну його експлуатації є сьогодні безальтернативним засобом надійного енергозабезпечення країни. За розрахунками сума інвестицій, що вкладені в продовження експлуатації, значно менше, чим введення в дію нових потужностей.

Врахування впливу високого рівня та локальної нерівномірності температури і достовірна оцінка залишкового ресурсу високотемпературних елементів дозволить вирішити проблему забезпечення надійної та довготривалої експлуатацію енергетичного устаткування.

Для визначення впливу рівня температури газів та їх локальної нерівномірності на тепловий та напружено-деформований стан відповідних елементів обладнання є необхідним проведення досліджень з використанням сучасних експериментальних та комп'ютерних методів.

**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 термо-напруженого 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 сучасними уявленнями про гідродинаміку потоку і процеси горіння і тим, що отримані результати не суперечать положенням відомих даних. Наукові положення, висновки й рекомендації, запропоновані у дисертаційній роботі підтверджені експериментальними дослідженнями і узагальненням отриманих даних. При виконанні роботи застосовувались методи математичної обробки результатів чисельного та натурного експериментів.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі теплової та альтернативної енергетики ННІ АТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках робіт, що виконувались на кафедрі теплової та альтернативної енергетики у пріоритетному напрямі «Енергетика та енергоефективність» у відповідності з планами Міністерства освіти і науки України по темах: д/б тема 2803-п (№ д.р. 0115U000340) – «Розробка засобів із продовження експлуатації високотемпературних елементів енергетичного та промислового обладнання»; д/б 2924-п (№ д.р. 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» під керівництвом зав. кафедри теплової та альтернативної енергетики ННІ АТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, д.т.н., проф. Черноусенко Ольги Юріївни.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо розрахунку термонапруженого стану та оцінки залишкового ресурсу теплосприймаючих поверхонь енергетичного обладнання на основі розрахунково-експериментальних досліджень впливу рівня та градієнта температур газів, дослідження стабілізаторних пальників, що дають можливість впливати на поле температур газів, а також розробка пальників з використанням низько реакційних газових палив змінного складу виконано повністю, 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 та напрямам досліджень відповідно до освітньої програми Теплоенергетика.

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».

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.

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

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури 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 економічних умовах нашої країні модернізація установок є найбільш реальним шляхом підвищення їх ефективності при мінімальних затратах. За розрахунками сума вкладень, що дають можливість продовження експлуатації обладнання, в 3–5 разів менше, ніж введення в дію нових потужностей. Певним умовам експлуатації обладнання повинна відповідати найбільш ефективна схема організації паливного процесу в топці.

*У першому розділі* виконано огляд роботоспроможності металів, які використовуються в енергетиці, при високих температурах, надійність їхньої роботи, проаналізовано характеристики міцності металу при високих температурах і робота в нестаціонарних умовах, перш за все, в умовах температурної нерівномірності. Розглянуті основні джерела температурної нерівномірності в енергетичному обладнанні.

З проведеного огляду матеріалів щодо умов роботи високотемпературних елементів енергетичного та промислового устаткування зроблені відповідні висновки і поставлені завдання щодо проведення відповідних досліджень з метою аналізу стану обладнання та заходів щодо підвищення його надійності та ефективності.

В зв'язку з тим, що на даний час існуючі методи, які пов'язані з визначенням термічних напружень в високотемпературних елементах енергетичного обладнання, вимагають проведення тривалих випробувань і громіздких розрахунків, видається доцільним на базі досягнень сучасних комп'ютерних

технологій виконання відповідних досліджень за значно коротший термін, з меншими затратами і з використанням мінімальної кількості дослідних даних.

Враховуючи значний вплив пальникових пристроїв на характеристики потоку, в тому числі, поля температур газів в топковому просторі, одним з пріоритетних завдань роботи є визначення можливості використання пальникових пристроїв, які дозволяють впливати на формування температури газів з метою зменшення нерівномірності поля температур і, таким чином, зниження термічної напруженості високотемпературних елементів. Перспективним напрямом було визначено використання мікродифузійних пальникових пристроїв стабілізаторного типу.

У другому розділі представлено експериментальні стенди, які були використані на кафедрі теплової та альтернативної енергетики у відповідності з поставленим завданням. Стенди оснащені відповідним енергетичним обладнанням і вимірювальною апаратурою, яка необхідна для визначення характеристик процесу горіння – довжини факелу, температури газів, складу продуктів згоряння, в тому числі концентрації окису вуглецю і оксидів азоту. Обладнання дозволяло визначати характеристики сталості горіння при зміні параметрів робочого процесу – швидкості повітря, витрати і складу газового палива.

В третьому розділі для визначення впливу рівня та локальної нерівномірності температури газів на аеродинаміку, тепловий та термонапружений стан трубопроводу котлоагрегату на стенді були проведені експериментальні вогневі дослідження зразка у вигляді циліндричного патрубку і відповідні комп'ютерні розрахунки з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent. Експериментальні і розрахункові дослідження виконувались для випадку поперечного обтікання потоком газів зі зміною температури в межах 600 – 1200<sup>0</sup>С одиночної циліндричної труби із сталі 12Х1М1Ф діаметром 32х6 мм.

Отримані експериментальні дані використовувались для уточнення розрахункової моделі обтікання патрубка. Як наслідок, були отримані дані щодо зміни температури в граничному шарі, температури на поверхні труби та по товщині труби, значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі та термічних напружень. За отриманими даними запропонована методика розрахунку

статичного пошкодження трубопроводу в залежності від умов експлуатації.

*В четвертому розділі* розглянуті і уточнені характеристики робочого процесу пальникових пристроїв стабілізаторного типу. Розглянуто закономірності вирівнювання параметрів потоку в системі стабілізаторів. Показано вплив на характер поля швидкості і поля температур в топковому просторі коефіцієнта надлишку повітря і коефіцієнта затінення решітки стабілізаторів.

В мікрофакельних стабілізаторних пальниках є можливість впливати на профіль температури газів як в повздовжньому, так і поперечному перерізах стабілізаторної решітки конструктивними засобами – зміною кроку стабілізаторів та їх ширини, зміною (або прикриттям) подачі газу на окремі стабілізатори, відносним зміщенням стабілізаторів вздовж і поперек потоку. Характер поля температур газу вздовж висоти стабілізатора в значній мірі залежить від характеру розподілу палива вздовж його довжини. Показано можливість інтенсифікації процесу горіння при одночасному формуванні поля температур у повздовжньому і поперечному напрямках шляхом встановлення інтенсифікаторів процесу горіння.

*В п'ятому розділі* з метою розширення використання стабілізаторних пальників для альтернативних паливних газів в енергетиці і промисловості було запропоновано, розроблено і досліджено мікрофакельні стабілізаторні пальники для спалювання забаластованих газових палив.

Альтернативні види палив здебільшого складаються з суміші високореакційного газу, типу метану, і баластових домішок - повітря, двоокису вуглецю, азоту, біодобавок тощо, які у разі збільшення їхньої концентрації погіршують характеристики горіння паливного газу, причому гази різних видів і різних родовищ і виробництв мають різний вміст баласту, який може змінюватися в часі. У разі виходу газобаластової суміші за концентраційні межі горіння цю суміш неможливо спалити з використанням традиційних технологій і пальникових пристроїв. Показано, що для спалювання низькокалорійних альтернативних палив, склад яких виходить за концентраційні межі горіння, доцільно застосувати комбіновану подачу палив, при якому низькокалорійне

паливо підпалюється високотемпературними стабілізуючими факелами високореакційного палива.

Розроблено метод і конструкції модульних стабілізаторних пальникових пристроїв, які забезпечують підвищення сталості горіння забаластованого палива при концентрації домішок від 0 % до 100 % (відсутність палива - подача баласту). При зміні концентрації домішок потужність пальника підтримується шляхом збільшення витрати високореакційного палива, яке подається на стабілізуючий факел. Сталість і довжина загального факелу визначається, в основному, характеристиками запалюючого факелу.

Досліджено три варіанти модулів стабілізаторних пальників з різними схемами подачі альтернативного і стабілізуючого палив.

Розроблено і досліджено нову конструкцію двонішевого пальникового пристрою, в якому, є можливість впливати без значних конструктивних змін на характеристики сталості і довжини факелу в залежності від вимог, які висуваються до характеристик пальникового пристрою.

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 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 базах даних Scopus, обидві статті у виданнях, віднесених до першого - третього кuartилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; отримано 7 патентів України на корисну модель.

Також результати дисертації були апробовані на 10 наукових фахових конференціях.

Представлені публікації здобувача виконані на високому науковому рівні, відображають проведену роботу.



За результатами науково-технічної експертизи дисертація Мороза О.С. визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

В наукових публікаціях дотримані принципи академічної доброчесності.

В наведеному списку публікацій, опублікованих із співавторами та зарахованих за темою дисертації, показано особистий внесок здобувача.

Наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. З роботи не зовсім ясно, з яких міркувань вибиралась різна густина розрахункової сітки, зокрема у зоні турбулентності за патрубком.
2. В роботі зазначені всі 4 роди граничних умов для теплових розрахунків, але не вказано чітко, що граничні умови 4 роду не застосовувались, хоча це зрозуміло з подальшої роботи.
3. У розрахунках у розділі 3.8 не вказані проміжні дані розрахунку, а вказаний лише кінцевий результат розрахунків.
4. В роботі не наведено дані щодо температури елементів нішевого стабілізатора, зокрема при спалюванні одного альтернативного палива.
5. При подачі газу на попереднє перемішування з повітрям часто має місце вібраційне горіння. Чи були такі явища при випробуваннях стабілізаторів з комбінованою подачею газів?

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 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. 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 Мороз Олег Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика.

#### Офіційний опонент:

Завідувач відділу теплофізики  
енергоефективних теплотехнологій  
Інституту технічної теплофізики  
НАН України, чл. кор. НАН  
України, д.т.н., проф.

*Наталія Фіалко*

Наталія ФІАЛКО

М.П. «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

