

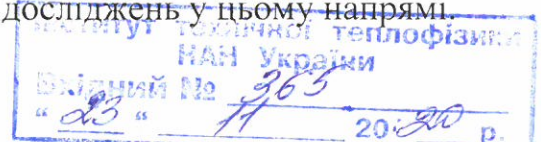
ВІДЗИВ  
офіційного опонента  
доктора технічних наук професора Дешка Валерія Івановича  
на дисертаційну роботу  
Тимощенко Олександри Борисівни  
«Розроблення теплофізичних засад спалювання газу в мікрофакельних  
пальникових пристроях малої потужності»,  
що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова  
теплоенергетика

1. *Актуальність теми.*

До важливих напрямів енергозбереження в комунальній та промисловій теплоенергетиці України належить розробка та впровадження прогресивних технологій спалювання палива. Сучасні технології мікрофакельного спалювання палива в пальникових пристроях зі стабілізаторами полум'я відкривають можливості значного підвищення ефективності робочого процесу в таких пристроях.

Одна із нових модифікацій вказаних технологій пов'язана з використанням у пальникових пристроях стабілізаторів полум'я циліндричної форми. Дана технологія орієнтована на застосування за умов відносно низької теплопродуктивності вогнетехнічних об'єктів.

Серед системних досліджень, присвячених вивченню робочих процесів спалювання газоподібного палива в стабілізаторних пальникових пристроях різного типу, слід відмітити роботи Вінтерфельда Дж., Щетинкова Є.С., Солнцева В.П., Раушенбаха Б.В., Беспалова І.В., Христича В.А., Любчика Г.Н., Сударева А.В. та ін. Щодо пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я, то відомі наразі дослідження стосуються лише окремих аспектів цих процесів. Належної уваги їх комплексному дослідженню, а також застосуванню математичного апарату, який дозволяє отримувати детальну інформацію про локальні та інтегральні характеристики досліджуваних процесів і встановлювати відповідні закономірності, практично не приділялося. Вищевикладене зумовлює необхідність поглиблених теоретичних та експериментальних досліджень у цьому напрямі.



Дисертаційна робота Тимощенко О.Б. спрямована на встановлення закономірностей процесів тепломасопереносу в мікрофакельних пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я та на розробку рекомендацій щодо застосування таких пристроїв. Вказане свідчить про актуальність обраного напрямку досліджень та теми дисертаційної роботи.

## *2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень.*

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечується:

- застосуванням сучасних методів фізичного та математичного моделювання, які включали використання *DDES* підходу до моделювання течій з великими відривними зонами;

- врахуванням відповідних фізичних ефектів при розгляді закономірностей течії палива та окиснювача, їх сумішоутворення, формування температурних полів та ін.;

- задовільним узгодженням результатів розрахункових досліджень з даними інших авторів, відомими з літературних джерел, та з результатами експериментальних досліджень;

- відповідністю висновків та результатів роботи фізичній суті досліджуваних явищ;

- апробацією результатів роботи на науково-практичних конференціях та семінарах;

- успішним впровадженням результатів роботи.

Всі розділи дисертаційної роботи логічно взаємопов'язані, змістовно підпорядковані сформульованій меті дослідження.

## *3. Наукова новизна роботи.*

Дисертацію присвячено дослідженню процесів тепломасопереносу в пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я, встановленню



основних закономірностей течії, сумішоутворення і формування температурних полів в них та розробці на цій основі рекомендацій щодо застосування в енергетичній практиці пальникових пристроїв з необхідними параметрами.

Основні наукові результати полягають у наступному:

1. Вперше для мікрофакельних газових пальників малої потужності одержано дані порівняльного аналізу характеристик течії, сумішоутворення, теплопереносу та вигорання палива при застосуванні циліндричних і плоских стабілізаторів полум'я. Встановлено, що при застосуванні циліндричних стабілізаторів забезпечується підвищення рівня турбулізації потоку, швидкості процесу сумішоутворення, зменшення нерівномірності поля температур у поперечних перерізах факела, інтенсифікація процесу вигорання палива та зменшення втрат тиску у пальнику.

2. Вперше досліджено можливість регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача шляхом зміни відстані від газоподавальних отворів до устя пальника для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт. Показано, що для забезпечення у вказаних пальниках так званого внутрішнього сумішоутворення (коли в усті пальника має місце практично повне перемішування палива і окиснювача) газоподавальні отвори необхідно розташовувати на відстані від зривної кромки стабілізатора, що дорівнює приблизно 35 діаметрам цих отворів.

3. Вперше для модифікації мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності кільцевих прямокутних нішових порожнин на їхніх бічних поверхнях виявлено ефекти впливу даних порожнин на робочі процеси в пальниках та обґрунтовано вибір їх просторових характеристик.

4. Вперше встановлено закономірності аеродинаміки, змішування палива і окиснювача, вигорання палива і формування температурних полів зони горіння для модифікації типоряду мікрофакельних пальників з пластинчастими турбулізаторами потоку на зривних кромках циліндричних стабілізаторів полум'я.

#### *4. Практичне значення роботи.*

Результати виконаних досліджень робочих процесів мікрофакельних пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я використано при розробленні різних модифікацій цих пальників. Дані пальникові пристрої застосовуються у вогнетехнічних об'єктах невеликої теплопродуктивності, а також за умов, коли необхідним є забезпечення високого ступеня рівномірності підведення теплоти у вогневому просторі.

Запропоновані пальникові пристрої впроваджено в в НВК «Струменевонішова технологія» на сушарках фасонних елементів футерування енергетичного обладнання, котлах типу «НІСТУ», Е-1,0-0,9ГН-2 та ін.

#### *5. Редакційний аналіз.*

Текст дисертації та автореферату викладено послідовно і доступно, фрази чіткі і завершені, рисунки інформативні, читання формул не викликає труднощів. Оформлення дисертації відповідає вимогам ВАК України.

#### *6. Відповідність тексту автореферату і дисертації.*

Текст автореферату адекватний змісту, структурі та основним положенням дисертації.

#### *7. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.*

Основні наукові положення, які повністю розкривають зміст і результати дисертації, викладено в 34 друкованих працях, зокрема, у 12 статтях, що входять до наукометричних баз даних, 4 статтях у наукових фахових виданнях України та 17 публікаціях у збірниках наукових праць за матеріалами конференцій. За результатами роботи одержано патент України.

#### *8. Структура дисертації.*

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та трьох додатків. Обсяг роботи становить 174



сторінки, включаючи 77 ілюстрацій та 9 таблиць. Перелік використаних літературних джерел включає 140 найменувань.

#### *9. Аналіз основного змісту роботи.*

**В анотації** коротко викладено основні результати проведених у роботі досліджень, що стосуються процесів спалювання гадоподібного палива в пальникових пристроях малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я. Наводиться інформація щодо наукової новизни та практичного значення результатів роботи. Також подано список публікацій, у яких розкривається зміст дисертації.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано її мету та основні завдання дослідження. Подано інформацію стосовно особистого внеску здобувача, апробації та публікацій за результатами роботи.

**У першому розділі** проведено огляд літературних джерел щодо робочих процесів мікрофакельних пальникових пристроїв, які базуються на застосуванні циліндричних елементів. Розглянуто способи інтенсифікації процесів горіння в пальникових пристроях стабілізаторного типу. Певну увагу приділено особливостям комп'ютерного моделювання фізичної ситуації, яка досліджується. Розглянуто основні сучасні підходи до математичного моделювання турбулентних течій і процесів горіння.

На основі виконаного аналізу сформульовано основні завдання досліджень.

**Другий розділ** висвітлює особливості методики проведення чисельних та експериментальних досліджень процесів переносу у мікрофакельних пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я. Розглянуто три модифікації таких пристроїв, що відрізнялися за особливостями конфігурації стабілізатора полум'я. Подано математичну постановку задачі, що розглядається.

У роботі виконано також дослідження щодо верифікації моделей турбулентного переносу. З цією метою проведено зіставлення даних відповідних експериментальних досліджень з розв'язками задач, які одержано шляхом

використання основних сучасних замикаючих моделей турбулентності. Згідно з отриманими даними, найменші відхилення від результатів експериментальних досліджень мають місце у разі застосування RNG  $k-\varepsilon$  моделі в рамках RANS підходу та SST  $k-\omega$  моделі для DDES підходу. За результатами виконаного аналізу також показано, що використання підходу DDES має переваги перед застосуванням RANS підходу, забезпечуючи краще узгодження результатів комп'ютерного моделювання з даними експериментальних досліджень. Проведено зіставлення даних, одержаних на основі DDES підходу з розв'язками за методом прямого чисельного моделювання (DNS), яке показало їх задовільне узгодження.

В даному розділі подається також опис експериментального стенду та методики проведення експериментів.

**В третьому розділі** наведено результати досліджень робочих процесів мікрофакельних пальникових пристроїв з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. На першому етапі досліджень проведено порівняльний аналіз основних елементів робочих процесів пальників з плоскими та циліндричними стабілізаторами полум'я. Згідно з одержаними даними, пальникові пристрої з циліндричними стабілізаторами полум'я у порівнянні з відповідними пальниками з плоскими стабілізаторами характеризуються суттєво вищою інтенсивністю протікання процесів сумішоутворення та вигорання палива, а також значно більшою турбулізацією потоку в закормовій області стабілізатора полум'я.

Виконано цикл досліджень з визначення ефектів впливу на характеристики робочих процесів пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я потужністю 30-200 кВт геометричних характеристик їх систем паливорозподілення, стабілізаторів полум'я тощо. За результатами досліджень встановлено раціональні конструктивні та режимні параметри пальників розглянутого типоряду. Показано досить чітко виражену кореляцію між потужністю пальникового пристрою і геометричними характеристиками відповідних конструкцій. Для пальників даного типоряду виконано порівняльний аналіз характеристик течії та сумішоутворення палива й окиснювача.



Певну увагу в роботі приділено дослідженню можливості регулювання процесу сумішоутворення палива і окиснювача за допомогою варіювання відстані від місця виходу газу до устя пальника. Виконані дослідження показали, що величина цієї відстані, за якої реалізується практично повне перемішування палива і окиснювача в усті пальника, для всіх значень потужності дорівнює приблизно 35 діаметрам газоподавальних отворів.

У даному розділі наводяться також результати експериментальних досліджень характеристик займання та зриву горіння для пальників з гладкими циліндричними стабілізаторами полум'я. Досліджено вплив на вказані характеристики таких геометричних параметрів, як відносний крок розташування газоподавальних отворів, відстань від даних отворів до зривної кромки стабілізатора тощо.

**У четвертому розділі** наводяться результати досліджень робочих процесів пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я, на бічних поверхнях яких мають місце кільцеві нішові порожнини. За умов, що розглядаються, нішові порожнини забезпечують інтенсифікацію процесу горіння та стабілізацію полум'я. В даному розділі виконано цикл багатоваріантних досліджень процесів переносу в таких пальниках з метою вибору раціональних конструктивних параметрів типоряду даної модифікації пальникових пристроїв. При цьому в певних межах варіювалися такі геометричні характеристики пальникового пристрою, як розміри ніші, її розташування відносно зривної кромки стабілізатора полум'я, відстань між газоподавальними отворами тощо. Визначення необхідних розмірів нішової порожнини базувалося на результатах досліджень закономірностей течії в цих пальниках. Як свідчать отримані дані, для реалізації ефективного сумішоутворення в нішовій порожнині, тобто коли зона первинного вихору займає основну частину простору ніші, відносна довжина кільцевої ніші може змінюватися в межах  $3,0 \leq \bar{L} \leq 4,0$ .

В даному розділі виконано зіставлення основних характеристик перебігу робочих процесів для типорядів досліджуваних пальникових пристроїв за

наявності та відсутності нішових порожнин. Згідно з одержаними даними, наявність ніші призводить до помітного підвищення інтенсивності турбулентності поблизу зовнішньої поверхні стабілізатора полум'я. Втрати тиску в пальнику, які пов'язані з наявністю нішової порожнини, є помітно невеликими і не перевищують 13% від відповідних втрат за відсутності ніші. За результатами виконаних досліджень, встановлено, що наявність нішових порожнин зумовлює покращення стабілізаційних характеристик відповідних пальникових пристроїв.

**У п'ятому розділі** висвітлюються результати досліджень робочих процесів пальникових пристроїв з пластинчастими турбулізаторами потоку, встановленими на їхніх зривних кромках. Досліджено закономірності течії, сумішоутворення, вигорання палива та формування температурних полів в зоні горіння для типоряду пальників з даними турбулізаторами. За результатами виконаних досліджень показано, що встановлення турбулізаторів потоку призводить до істотної зміни структури течії та інтенсифікації всіх елементів робочих процесів пальникового пристрою. Виконаний порівняльний аналіз характеристик робочих процесів в пальниках за наявності та відсутності турбулізаторів потоку показав, що для пальникових пристроїв досліджуваного типоряду, обладнаних турбулізаторами різних розмірів, за кожним з них утворюється зона рециркуляції, протяжність якої суттєво перевищує відповідно протяжність такої зони за відсутності турбулізаторів. Показано, що ефект зниження впливу турбулізаторів з віддаленням від стабілізатора полум'я вниз за потоком є суттєвішим для пальників меншої потужності. Встановлено, що втрати тиску на пальниковому пристрої, які пов'язані з наявністю турбулізаторів, є порівняно незначними за величиною в усьому діапазоні зміни потужності пальникових пристроїв.

**У висновках** представлено основні наукові і практичні результати, одержані у дисертаційній роботі.

**У додатках** наводяться рекомендації щодо застосування типоряду мікрофакельних пальників малої потужності з циліндричними стабілізаторами полум'я; акт впровадження результатів дисертаційної роботи; патент України.



10. *Зауваження по дисертації.*

1. Доцільно було б розповсюдити дослідження на інші газоподібні палива крім природного газу.
2. Джерело даних рис. 1.2, 1.3 не деталізоване, видається недостатнім посилання на рис. 1.3 при твердженні, що у зоні  $\alpha < \alpha_{кр1}$  має місце неоднозначний вплив  $\alpha$  на рівень емісії NOx і CO в продуктах згоряння.
3. Вибір флеймлет підходу для математичного моделювання турбулентного горіння видається достатньо перспективним, але потребує більш детального обґрунтування.
4. Вимірювання температур на експериментальному стенді за допомогою термопар потребує більш детального опису.
5. У третьому, четвертому та п'ятому розділах дисертації не аргументовано застосування діапазонів зміни коефіцієнтів надлишку повітря, загромадження прохідного перерізу каналу тощо.
6. Слід звернути увагу на розподіл інтенсивності турбулентності вздовж осі за циліндричним стабілізатором, розділ 3. Зазначено для типоряду пальників з циліндричними стабілізаторами полум'я, що максимальні рівні інтенсивності турбулентності в зоні зворотних токів відповідають пристрою найменшої потужності. Разом з тим, рис.3.15, при потужності пальників більше 100 кВт ця тенденція не спостерігається, теж саме має місце і в розподілі масової концентрації метану вздовж осі турбулентного сліду за циліндричним стабілізатором полум'я за відсутності засобів інтенсифікації горіння, рис.3.18.
7. Не наведено результатів досліджень щодо екологічної ефективності пальників, які розглядаються.
8. Редакційні зауваження: назва ніші кільцева прямокутна видається не зовсім наочною; не всі скорочення, наприклад модуль ТМДН в розділі 1.1, підхід моделювання турбулентних течій DDES, SST k- $\omega$  модель турбулентності вчасно розшифровані; наявних пояснень позначень на рис.5.25 недостатньо.

Вказані зауваження не знижують позитивної оцінки дисертаційної роботи, а висловлені побажання можуть бути враховані автором у подальших дослідженнях.

11. *Висновок про відповідність дисертації вимогам «Постанови КМ від 24.07.2013 № 567 пп. 9, 11, 12, 13.,*

Дисертаційна робота Тимощенко Олександри Борисівни «Розроблення теплофізичних засад спалювання газу в мікрофакельних пальникових пристроях малої потужності», є повністю завершеною науковою роботою, в якій вирішується актуальна проблема розроблення основних положень теплофізики спалювання палива у мікрофакельних пальникових пристроях з циліндричними стабілізаторами полум'я. За актуальністю, науковою новизною, практичною значимістю, обґрунтованістю та достовірністю основних наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційна робота відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, а її автор Тимощенко Олександра Борисівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри теплотехніки та  
енергозбереження Інституту енергозбереження  
енергоменеджменту  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»

Валерій ДЕШКО

Підпис д. т. н., проф. Дешка В. І. засвідчую  
Вчений секретар Національного  
технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО