

ВІДГУК

офіційного опонента Желиха Василя Михайловича,
доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри теплогазопостачання
та вентиляції Національного університету «Львівська політехніка»
на дисертаційну роботу Зайцева Микити Олеговича на тему
«УДОСКОНАЛЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ В ЖАРОТРУБНИХ ВОДОГРІЙНИХ
КОТЛАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 144 «Теплоенергетика», галузь знань 14 – Електрична інженерія.

1. Актуальність теми дисертації

У сучасних умовах гостро постала проблема дефіциту паливно-енергетичних ресурсів. Зношеність теплових мереж і низька якість теплової енергії, наданої споживачеві, спонукає останнього відмовлятися від централізованого теплопостачання на користь децентралізованого. Також централізоване теплопостачання є дуже інерційним з точки зору його особливостей. Ця проблема вирішується установкою індивідуальних теплогенеруючих установок на прикладі світового досвіду, коли основна увага наділяється не капітальним витратам, а експлуатаційним. Виконані в останні роки дослідження показали, що зважаючи на особливості підбору обладнання, теплогенеруючі установки більшу частину часу працюють не в номінальному режимі. Найбільш перспективним напрямом є підвищення ефективності використання паливних ресурсів за рахунок підвищення ККД теплогенеруючих установок у нестационарних режимах шляхом удосконалення аеродинаміки топок котлів. Але на теперішній час не існує методів визначення впливу аеродинаміки взаємодії струменів в топці жаротрубних теплогенераторів на їх ККД. Тому дослідження, спрямовані на підвищення ККД теплогенеруючих установок у нестационарних режимах, шляхом удосконалення аеродинаміки топок котлів та керування

аеродинамікою у топках жаротрубних теплогенераторів потужністю від 100 кВт до 300 кВт є актуальними.

2. Структура та обсяг дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми підвищення ефективності теплогенераторів малої потужності та актуальність науково-технічної задачі, що вирішується в роботі, яка спрямована на підвищення ефективності використання первинних паливних ресурсів у теплогенеруючих установках децентралізованих систем теплопостачання, особливо для нестаціонарних режимів роботи, шляхом розробки нових засобів управління процесами горіння та теплопередачі в топковому просторі та на конвекційних поверхнях ТГУ. Також наведено дані щодо мети роботи, завдань та наукової новизни, практичної значимості роботи, апробації роботи та впровадження отриманих результатів.

У першому розділі дисертації виконано аналіз сучасного стану енергоефективності жаротрубних теплогенеруючих установок малої потужності.

Внаслідок аналізу ефективності роботи теплогенераторів малої потужності встановлено, що низька ефективність жаротрубних котлів обумовлена тим, що 90% часу теплогенератори працюють в діапазоні від 10 % до 70 % номінального навантаження. Це пояснюється існуючими методами підбору обладнання та спільною роботою з системами опалення з кількісним регулюванням теплоносія. Також виявлено, що для топок жаротрубних котлів, особливо для реверсивних, повинен бути відсутній локальний «накид» факела на холодну стінку топки в усіх режимах її роботи, з урахуванням необхідного напору для подолання аеродинамічного опору газового тракту котла і методу регулювання навантаження.

Встановлено, що проблематика формування аеродинамічної структури результуючої течії концентричних закручених і осьових газових струменів є

особливо актуальною при використанні комбінованих пальників в котлах, де відбувається зміна теплової потужності під час опалювального періоду.

Таким чином, в першому розділі зроблено висновок, що для вдосконалення ефективності роботи теплогенераторів малої потужності, при зміні теплового навантаження протягом опалювального періоду, необхідно виконати чисельне моделювання та експериментальне порівняння сучасних моделей теплогенераторів, а також на основі запропонованих шляхів вдосконалення виконати теоретичні і експериментальні дослідження задля наукового обґрунтування доцільності використання комбінованих пальників з покращеним газодинамічним режимом взаємодії струменів в об'ємі топкового простору. На основі чого сформульовані мета та завдання досліджень.

У другому розділі наведено результати числового моделювання та експериментального порівняння сучасних моделей теплогенераторів малої потужності при зміні теплового навантаження.

Отримані в результаті чисельних розрахунків та експериментальних випробувань дані для вдосконалення ефективності роботи теплогенеруючих установок, дозволили визначити напрямок досліджень задля наукового обґрунтування доцільності використання комбінованих пальників з покращеним газодинамічним режимом взаємодії струменів в об'ємі топкового простору. Так, для встановлення технічних характеристик теплогенераторів, виконано аналіз отриманих результатів на основі існуючих методів визначення ефективності роботи 8 сучасних моделей котлів відомих виробників з потужністю 16 кВт і 17,4 кВт. При цьому виявлено, що багато виробників в технічній документації вказують мінімальну температуру відхідних газів. Для більшості моделей вона становить 110 °С. Це пов'язано з тим, що низька температура поверхні димоходу збільшує ймовірність корозії внаслідок конденсації вологи з димових газів і з'єднання з SO₃, але підвищення температури призводить до збільшення теплового забруднення середовища і зменшення ККД котла, отже потрібне подальше дослідження аеродинаміки

топок котлів малої потужності. Особливо, це має значення в умовах зниження теплового навантаження на протязі опалювального періоду.

Таким чином, за результатами досліджень можна зробити висновок, що для ефективного функціонування системи тепlopостачання і збільшення терміну служби трубопроводів необхідно виконувати вибір котлів з оптимальним співвідношенням ККД і температури відхідних газів, що можливо при використанні комбінованих пальників з покращеним газодинамічним режимом взаємодії струменів в об'ємі топкового простору.

У третьому розділі отримані теоретичні дані про аеродинамічну структуру потоків в топці котла малої потужності при використанні комбінованого пальника. Рішення даної задачі було виконано шляхом використання математичного апарату, запропонованого програмним забезпеченням COSMOSFloWorks. Здійснено чотири варіанти числового моделювання: при фіксованій швидкості з центрального входу 3, 7, 12 і 20 м/с, а з тангенціальних - зовнішніх при швидкостях 3, 7, 12 і 20 м/с. Запропонована стратегія управління розподілу швидкості і температури, яка ґрунтується на регулюванні витрат газу і повітря, а також на співвідношенні швидкостей на входах в пальник з осьових і тангенціальних патрубків. Аналіз результатів числового моделювання показав, що структура результуючого струменя залежить від того, який струмінь має більшу швидкість – закручений чи коаксіальний. При цьому, аналіз інтенсивності турбулізації потоків дав можливість побачити, що в зовнішньому шарі вона практично не змінюється. При цьому, встановлено, що збільшення інтенсивності турбулізації відбувається при взаємодії внутрішніх шарів, що підтверджується гальмуванням одного струменя іншим. Також відзначено, що у випадках перевищення осьової швидкості над швидкістю зовнішнього закрученого потоку виникає локальний скачок швидкості, який переміщається по довжині струменя в міру віддалення від центральної осі. Автор пояснює це умовами формування поперечного кільцевого вихору та підтверджує теоретичним дослідженням впливу кроку зовнішнього закрученого струменя на розподіл

тиску в топці. Розгляд рівняння лінії течії рідини і крок гвинта виконано на основі диференціальних рівнянь лінії течії рідини, який дозволив зробити висновок, що при закрученому зовнішньому струмені зі зменшенням радіусу збільшується крок гвинта, що передбачає області зі зниженим тиском в межі дії струменя.

У четвертому розділі виконані експериментальні дослідження взаємодії струменів в комбінованому пальнику та їх вплив на теплову напруженість топки. Запропонований на основі теоретичних досліджень комбінований пальник складається з двох тангенціальних патрубків для підведення повітря і осьового патрубка для підведення газу. Експериментальні дослідження виконані в три етапи:

- на першому етапі досліджено поле результуючих швидкостей (аксіальної, тангенціальної, радіальної) при зміні співвідношення витрат струменів повітря, що подається, а саме: осьового до тангенціального в проміжку від 1:0,75 до 1:1,5, з кроком 0,25;

- на другому етапі досліджувалася відповідність розподілу температури при зазначених вище співвідношеннях витрати повітря (нагрівання виконувалось тільки для осьового потоку, при цьому різниця температури між струменями тангенціального і осьового входів в пальник відповідала співвідношенню 1:3);

- на третьому етапі виконувалися вогневі випробовування на виготовленому зі сталі зразку комбінованого пальника з фіксацією на тепловізорі рівномірності прогрівання зовнішнього корпусу пальника.

Загальна інструментальна помилка не перевищувала 5% (при використанні приладів Testo 480 (Німеччина), та тепловізора Testo 882 (Німеччина)) для замірів температури і швидкості. Аналіз результатів експерименту свідчить про те, що на границі змішування зовнішнього закрученого і осьового прямоотокового струменів виникає поперечне вихрове кільце. Дане явище відбувається через різкі зміни швидкості, які спостерігаються на середній лінії між осьовим патрубком і корпусом пальника. Крім того, на підставі результатів

експериментального дослідження поля швидкостей ізотермічного і неізотермічного струменів, взаємодії коаксіальних струменів осьового прямоотокового і зовнішнього закрученого виявлена можливість покращення ефективності роботи теплогенеруючої установки малої потужності. Встановлено, що для управління полем швидкостей в об'ємі топки і при зміні теплового навантаження необхідно виконувати подавання палива і окиснювача в топку співвісними струменями: осьовим прямоотоковим і зовнішнім закрученим.

При цьому ступінь закручування S зовнішнього струменя може варіюватися в діапазоні $0,3 < S < 1,2$, шляхом зміни співвідношення витрати поданого зовнішнього закрученого струменя до витрати потоку, що подається через осьовий патрубок. Вказаний діапазон зміни S відповідає розвитку струменя від слабо закрученого до сильно закрученого з розвиненою центральною областю зворотних потоків.

Таким чином, отримані дані підтверджують можливість регулювання рівномірності розподілу температури в об'ємі топки запропонованим способом.

Виявлено, що найбільш раціонально використовувати запропонований спосіб спалювання газу з формуванням аеродинамічної структури осьового прямоотокового струменя газу зовнішнім закрученим струменем в діапазоні потужності від 50 до 130 кВт. Запропонований комбінований пальник в топках котлів малої потужності дозволяє збільшити середньорічний ККД котла на 20 % в порівнянні зі стандартним виконанням котлів.

Анотація дисертації відображає її основні положення.

3. У загальних висновках представлені основні наукові та практичні результати виконаних досліджень дисертаційної роботи.

4. У додатках представлено креслення розробленого пальника та фотографії його зразків, термограми вогневих досліджень топки, результати випробування теплогенераторів, акти впровадженнь.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень забезпечується тим, що при створенні наукових положень, висновків та рекомендацій застосовано закони та рівняння, які використовуються при розрахунку аеродинамічних параметрів газового тракту теплогенераторів, сучасний науковий досвід, який ґрунтується на аналізі результатів реконструкцій топкового простору котлів з використанням існуючих аеродинамічних моделей та розроблених при виконанні наукової роботи.

При вирішенні поставлених у дисертаційній роботі задач, зокрема при аналізі проблем енергозбереження в теплогенераторах, що працюють в умовах зниженого навантаження, використаний системний підхід. Математичне моделювання руху і теплообміну для конвекційних поверхонь та аеродинамічних процесів взаємодії зовнішнього обертвого, а також осьового газових струменів в топковому просторі базувалось на принципах теорії гідравлічних ланцюгів з розподіленими параметрами. Алгоритми чисельного розрахунку гідравлічних і теплових режимів застосовували методи еволюційного пошуку найбільш привабливих рішень, які реалізовані в програмних пакетах «SolidWorks» на основі рівнянь Нав'є-Стокса.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується застосуванням сучасних методик досліджень при виконанні експериментів з метою корегування динамічних процесів задля підвищення ефективності використання паливних ресурсів в жаротрубних теплогенеруючих установках в умовах їх роботи в нестационарних режимах. В роботі наведені практичні результати реконструкцій, які підтверджуються отриманими на дисертаційну роботу Зайцева Микити Олеговича актами впровадження, результатами практичного використання із позитивним ефектом.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці креслень пальника з його технологічною деталізацією і виготовленням для аеродинамічних досліджень насадок до пальника, а також виготовлений пальник.

Запропонована організація спалювання газу в топках котлів малої потужності, що дозволила збільшити середньорічний ККД котла на 20% в порівнянні зі стандартним виконанням котла.

Розроблені моделі та методи доцільно використовувати для проведення реконструкцій котельних та систем опалення з метою вирішення проблеми підвищення ефективності використання паливних ресурсів в теплогенеруючих установках в умовах зниження теплового навантаження.

Результати роботи були впроваджені:

- в діяльності науково-виробничої лабораторії «Енергозберігаючі технології» Державного університету “Одеська політехніка”;
- результати роботи використані під час проектування котельних та систем опалення в НДР № 4/20 Державного університету “Одеська політехніка”: “Розроблення та затвердження у встановленому законодавством порядку схеми тепlopостачання м. Одеси” та «Першої інженерної компанії» (м. Одеса);
- результати роботи використовуються в курсовому і дипломному проектуванні студентів галузі знань 14 – «Електрична інженерія» за спеціальністю 144 – «Теплоенергетика» та включені до звіту ДБ НДР 33-41 «Підвищення ефективності використання різних видів палива, вторинних та відновлювальних джерел енергії для енергетики України» Міністерства освіти і науки України.

7. Наукова новизна дисертаційної роботи Зайцева Микити Олеговича полягає у в створенні нових та подальшому розвитку існуючих моделей і методів задля підвищення використання паливних ресурсів в жаротрубних теплогенеруючих установках в умовах їх роботи в нестационарних режимах, потужність яких не перевищує 300 кВт:

- здійснене чисельне моделювання та експериментальне порівняння сучасних моделей теплогенераторів малої потужності із змінним тепловим навантаженням показало, що зменшення їх ефективності відбувається за рахунок зміни аеродинаміки струменів в топковому об’ємі. Достовірність цього підтверджено

результатами досліджень газодинамічних режимів взаємодії зовнішнього обертowego та осьового струменів в об'ємі топкового простору;

- в результаті виконаних комплексних досліджень вдосконалених способів спалювання в теплогенераторах з використанням комбінованих пальників, вперше було встановлено, що в топковому просторі відбувається утворення зон зі зниженим тиском внаслідок розбіжності приграничних шарів взаємодіючих струменів пальника, що спричиняє появу зон можливої конденсації і підвищеної корозії поверхні топки;

- вперше експериментально виявлене явище виникнення поперечного вихрового кільця на відстані 2-х діаметрів осьового патрубка від його поперечного зрізу, яке має негативний вплив на ефективність спалювання газу в топці теплогенератора;

- вперше перевірено, що найбільш раціональним є використання способу спалювання газу з формуванням аеродинамічної структури осьового прямотечійного струменя газу зовнішнім закрученим струменем в діапазоні потужностей від 50 до 130 кВт. Для даного діапазону характерна гідродинамічна зона в якій, зовнішній закручений струмінь по внутрішньому кордону гальмує осьовий струмінь газу.

8. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Розроблені автором моделі, методи та конструкторські рішення доцільно використовувати для теплогенераторів малої потужності в діапазоні роботи пальників від 50 до 130 кВт з метою вирішення проблеми підвищення ефективності використання паливних ресурсів в теплогенеруючих установках в умовах зниження теплового навантаження.

9. Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутність порушення академічної доброчесності.

За темою дисертації опубліковано **9** наукових праць, з них: **одна** у міжнародній наукометричній базі (Scopus), **6** у наукових фахових виданнях України (**одна** одноосібна) та міжнародних виданнях, **дві** тези доповідей.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях в Україні (XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології»: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – з доповіддю «Шляхи раціонального розвитку енергетики України», Харків), Словенії («Sustainable housing and human settlement» Bratislava: SHEE 2018), Молдові («Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului», Кишинів), Азербайджані («Проблеми екології та енергоефективності в сучасному будівництві», Баку) та наукових семінарах розширеного засідання кафедр «Теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій», та «Прикладної екології та гідрогазодинаміки» Державного університету «Одеська політехніка».

Таким чином, вимоги постанови КМУ від 06.03.2019 р. №167 «Про проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» зі змінами згідно Постанови КМУ від 21.10.2020 р. №979 до кількості публікацій виконано.

Публікація автором результатів досліджень у рецензованих виданнях, які передбачають попередню перевірку матеріалів на відсутність запозичень є одним із елементів підтвердження відсутності порушень академічної доброчесності. В цілому у дисертаційній роботі порушень академічної доброчесності не виявлено.

10. Зауваження згідно змісту та оформлення дисертаційної роботи.

1. Дисертація ускладнена надмірною кількістю графічних залежностей. Доцільно було б в третьому розділі об'єднати результати моделювання швидкості, тиску та температури і подати в графічному вигляді, а координати зробити безрозмірними.

2. Доцільно було більш докладно обґрунтувати необхідність виконання випробовувань в другому розділі. Тобто вплив сучасної методики підбору пальників та теплогенераторів потужністю до 300 кВт призводить до підвищення розрахункової потужності котла, а умови експлуатації – до

випадання конденсату з димових газів, та корозії поверхонь нагріву, це спонукає до визначення напрямку наукових досліджень використання комбінованих пальників.

3. Не зовсім обгрунтовано вибір теплогенераторів та їх потужності для дослідження в другому розділі. Також в роботі не вказані фірми – виробники досліджуваних теплогенераторів.

4. В третьому розділі підрозділ 3.3 відноситься до теоретичних досліджень, які наведені у другому розділі, та підтверджує висновки щодо існування області зі зниженим тиском в межі дії струменя пальника. Цей матеріал слід було розмістити в другому розділі, або на початку третього.

5. Не зовсім зрозуміло, яким чином використовується вказана в четвертому розділі формула професора В.В. Афтанюка (4.1).

6. Розділ чотири надмірно великий. Варто було його розділити на окремі розділи, зокрема, на: експериментальні дослідження з аеродинаміки струменів пальника, теплові дослідження та техніко-економічне обгрунтування використання передбачених способів підвищення ефективності роботи теплогенераторів в умовах роботи зі зниженим тепловим навантаженням.

7. На графічних залежностях 4.4-4.6, 4.8 не вказані одиниці вимірювання на осі абсцис. Також не наведені лінії тренду з експериментальним дослідженням (графіки 4.3-4.6, 4.8).

8. В тексті та рисунках зустрічаються позначення англійською або російською мовами. Також є декілька невдалих зворотів, наприклад – «теплогенератори» та «теплогенеруючі установки», які у автора ніяк не відрізняються.

Основні ідеї дисертаційної роботи цікаві, мають позитивне враження. Наведені зауваження не знижують науковий рівень і практичну цінність роботи.

11. Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Зайцева Микити Олеговича на тему «Удосконалення газодинаміки в жаротрубних водогрійних котлах малої

потужності» є завершеною кваліфікаційною роботою, яка оформлена відповідно до державних стандартів України. Результати дисертації можуть бути рекомендовані до використання в організаціях, які виконують проектування нових, або реконструкцію існуючих теплогенераторів з використанням газового палива та потужністю від 50 до 130 кВт.

Дисертаційна робота за своїм змістом відповідає вимогам постанови КМУ від 06.03.2019 р. №167 «Про проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» зі змінами згідно Постанови КМУ від 21.10.2020 р. №979 та чинним вимогам МОН України, а її автор Зайцев Микита Олегович **заслуговує** на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, галузь знань 14 – Електрична інженерія.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Інституту будівництва та інженерних систем

Національного університету

«Львівська політехніка» МОН України

Желих В.М.

Підпис доктора технічних наук,

професора Желиха Василя Михайловича засвідчую:

Вчений секретар ради Національного університету.

«Львівська політехніка»



Брилинський Р.Б.