

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Заєць Олени Миколаївни на тему**«Підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря на основі утилізації теплоти продуктів горіння»,**
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю **05.14.06 – технічна теплофізика та промислова**
теплоенергетика***1. Актуальність теми дисертаційної роботи***

При виробництві чавуну для нагріву газоподібних середовищ до високих температур широко застосовуються доменні повітрянагрівачі. У зв'язку зі складною економічною ситуацією в Україні при проведенні реконструкцій та капітальних ремонтів доменних печей повітрянагрівачам не приділяють належної уваги, тому в даний час багато з них є застарілими, з терміном служби, що перевищує нормативний. Тому на сьогодні є нагальна потреба у підвищенні ефективності їх роботи з найменшими капітальними витратами. Одним з шляхів вирішення цього завдання є організація раціонального з енергетичної та екологічної точки зору підігріву повітря та палива, що йдуть на горіння, за рахунок утилізації теплоти відхідних димових газів. Тому, тема дисертаційної роботи О.М. Заєць «Підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря на основі утилізації теплоти продуктів горіння» є безумовно актуальною.

Актуальність напрямку досліджень можна підтвердити тим, що він співпадає з напрямком «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», схваленим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 1071, та напрямком «Технології використання скидних енергоресурсів», що значиться в постанові Кабінету Міністрів України від 27.09.2011 р. № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 р.».

Актуальність досліджень підтверджується також участю здобувача у виконанні робіт у рамках держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України: «Розробка теоретичних основ створення енергоефективних теплоутилізаційних комплексів на базі високотемпературних агрегатів з використанням когенераційних технологій» (2011-2012 рр., № 0110U001235), «Розробка енергоефективних комплексних систем утилізації теплових вторинних ресурсів високотемпературних енерготехнологічних процесів»

B x 52/106

Big 7.02.2018

(2015-2016 рр., № 0115U000523), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності високотемпературного нагріву доменного дуття за рахунок утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів для підігріву їх компонентів горіння.

При виконанні досліджень автор використовувала методи математичного моделювання процесів гідраеродинаміки та теплопередачі, чисельний експеримент та аналіз.

2. Наукова новизна досліджень і результатів дисертаційної роботи

Оцінюючи найважливіші здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на результати, що мають вагому наукову новизну. Це, насамперед, розробка удосконаленого метода розрахунку складних рекуперативних теплообмінників зі змішаним рухом потоків теплоносіїв, який ґрунтується на поділі поверхні теплообміну на базові мікротеплообмінники, з використанням *P-NTU* методу. Безперечно наукову новизну має також врахування зміни теплофізичних властивостей газів, палива та повітря за напрямком руху потоків теплоносіїв та поверхні теплообміну, зміни параметрів теплопередачі та гідродинаміки всередині теплообмінника, що дозволяє уточнити його тепловий стан при різних режимах роботи.

Заслуговує на увагу й те, що вперше при розрахунку теплоутилізаторів теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів запропоновано оригінальний спосіб визначення областей можливого виникнення корозійного зносу їх поверхні при різних режимах роботи та факторах їх експлуатації.

3. Практична значимість дисертаційної роботи

О.М. Заєць полягає у розробці методів та засобів, які дозволяють проводити аналіз ефективності існуючих теплоутилізаторів доменних повітрянагрівачів та надавати рекомендації щодо модернізації та проектування нових теплообмінників з метою підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря. У результаті використання запропонованих автором методик можна очікувати суттєве зменшення використання дорогого коксового чи природного газу у собівартості продукції та зменшення негативного впливу на оточуюче середовище.

Слід відмітити і те, що здобувачем запропоновано метод розрахунку динамічних характеристик продуктів згоряння у димовому тракті доменних

повітронагрівачів, який також є предметом наукової новизни та має практичне значення.

4. Ступінь обгрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Для розв'язання задачі дослідження автором створено комплекс математичних моделей, нових залежностей та засобів для аналізу систем утилізації теплоти, яка відходить від доменного виробництва. Ці напрацювання базуються не ретельному вивченні здобувачем безпосередньо самого доменного виробництва, типових моделей доменних повітронагрівачів, рекуперативних теплообмінників та теплофізичних процесів у них.

Обгрунтованість наукових положень можна довести тим, що при проведенні досліджень застосовуються відомі перевірені та апробовані методи розрахунку регенеративних та рекуперативних теплообмінників. Автором проведена перевірка результатів чисельного дослідження альтернативним методом поправкового коефіцієнту, що підтвердило правильність прийнятих підходів до проведення розрахунку складних рекуперативних теплообмінників.

Достовірність результатів, що подані у дисертаційній роботі О.М. Заєць, базуються на коректному використанні фундаментальних положень теорії теплообміну. Отримані результати та зроблені автором висновки не суперечать дослідженням інших авторів, які були проведені у напрямку підвищення ефективності роботи доменних повітронагрівачів.

Висновки, повністю відповідають отриманим результатам, які відображені у тексті дисертаційної роботи.

5. Повнота викладення результатів у опублікованих роботах

Основні результати дисертаційної роботи висвітлено у належній кількості публікацій. А саме у 11 публікаціях: з них 6 – у наукових періодичних фахових виданнях України, з яких 3 – у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 5 – у матеріалах та тезах конференцій.

Ознайомлення з текстом автореферату дисертації дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом він відповідає всім вимогам. У тексті автореферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого О.М. Заєць дисертаційного дослідження. Зміст автореферату та основні положення дисертації – ідентичні.

6. Аналіз змісту розділів дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 152 найменування, та 3

додатків. Обсяг роботи становить 223 сторінки, 78 рисунків, 36 таблиць. На окремих сторінках наведено 38 рисунків та 19 таблиць від їх загальної кількості. Структура дисертації є стрункою. Її логіку підпорядковано вирішенню сформульованих дослідницьких завдань. Не викликають зауважень постановка мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження. Наприкінці кожного розділу подано чіткі стислі висновки, які відповідають тексту дослідження.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, висвітлено зв'язок з науковими програмами, планами, темами, окреслено мету, визначено об'єкт, предмет, методологічну основу дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення роботи, показано апробацію її результатів та структуру дослідження (с. 22 – 27).

У *першому розділі* дисертаційної роботи «Підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря на основі утилізації теплоти продуктів горіння» проаналізовано джерельну базу дослідження. Приділено багато уваги аналізу загальної схеми доменного виробництва, конструкції та технологічним особливостям доменних повітрянагрівачів, а також технолообмінному обладнанню систем утилізації теплоти димових газів.

Наведено приклади існуючих в Україні та у світі систем утилізації теплоти. Автор підкреслює, що такі системи впроваджено лише на трьох доменних печах в Україні. Також для оцінки ефективності систем утилізації теплоти димових газів запропоновано використовувати алгоритм, який наведено у монографії д.т.н. Греса Л.П. По першому розділу зроблено висновки та сформульовано мету та завдання дослідження (с. 28 – 58).

Другий розділ роботи присвячено удосконаленню методів та засобів розрахунку теплообмінного обладнання систем утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів.

Обрано математичну модель та метод розрахунку доменного повітрянагрівача з метою отримання значень температури димових газів та створення розрахункової програми системи утилізації теплоти продуктів згоряння. Проведено аналіз основних методів розрахунку рекуперативних теплообмінників, а саме ε - NTU - метод, P - NTU - метод, метод поправкового коефіцієнту, та їх порівняння. Заслуговує на увагу запропонований підхід, який ґрунтується на поділі поверхні теплообміну складних рекуперативних теплообмінників зі змішаним рухом потоків теплоносіїв на базові мікротеплообмінники. Описано метод гідравлічного розрахунку рекуператорів, який відбувається разом з тепловим. Наприкінці розділу проведено

моделювання універсальних залежностей для теплофізичних властивостей суміші газів, а саме димових газів, палива та вологого повітря (с. 59 – 110).

Третій розділ присвячено моделюванню роботи блоку доменних повітрянагрівачів з метою визначення вихідних даних для розрахунку системи утилізації теплоти продуктів згоряння. Проведено розрахунок горіння палива в доменному повітрянагрівачі, визначено склад димових газів та температури підігріву компонентів горіння, необхідної для забезпечення калориметричної температури згоряння при зниженні частки коксового газу в паливі. Зроблено висновок о скороченні частки коксового газу з 16 % до 9 – 12 % при підігріві повітря горіння, а при одночасному підігріві повітря і палива – до 7 – 9 %. За допомогою програми «Регенератор», розробленої на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «ХПІ», автором проведено розрахунок зміни температури димових газів та витрати за часом, а також компонентів горіння для зимового та літнього періоду. На основі розрахункових даних було визначено режимні параметри димових газів в загальному газоході при роботі трьох повітрянагрівачів, які підключені послідовно. В результаті проведених в третьому розділі розрахунків були отримані залежності, які можуть бути використані на практиці як вихідні дані при проектуванні та модернізації систем утилізації теплоти продуктів згоряння (с. 111 – 130).

Четвертий розділ має назву «Розробка схем утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів та аналіз їх ефективності». Його зміст повністю відповідає назві. Тут здобувач за допомогою розрахункової програми, яку було створено на основі запропонованого у розділі 2 методу та отриманих у розділах 2 і 3 вихідних даних, проводить розрахунок режимно-конструктивних характеристик теплообмінного обладнання чотирьох схем утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів. Слід відмітити оригінальні діаграми розподілу температур теплоносіїв по поверхні теплообміну рекуператорів для літнього та зимового періоду року, які наведені автором. Вони дозволяють виявити зони, або так звані «вузькі місця», з можливим випадінням вологи і, відповідно, утворенням зон корозії, що знижує надійність роботи теплообмінника. Порівняльний аналіз ефективності розроблених схем утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів виявив найефективнішу схему з одночасним підігрівом повітря та палива, яка призводить до економії палива у 7 % та має найвищий коефіцієнт використання теплоти (0,49 – 0,51). Проведено перевірку адекватності математичної моделі шляхом порівняльного розрахунку повітрянагрівача іншим відомим методом

(метод поправкового коефіцієнта), яка дозволила авторові зробити висновок о працездатності моделі. У висновках до розділу надані рекомендації щодо удосконалення схем утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів, щоб уникнути негативних тенденцій, які пов'язані з випадінням вологи (с. 131 – 194).

Завершується робота досить розгорнутими висновками, які впливають зі змісту роботи, є логічними, слугують віддзеркаленням основних результатів дисертаційної роботи (с. 197 – 199).

7. Дискусійні положення та зауваження

Разом із загальною високою оцінкою дисертаційної роботи О.М. Засць, слід звернути увагу на певні дискусійні моменти:

Зауваження по 1 розділу:

1. При обзорі літературних джерел за тематикою дослідження багато уваги приділено опису загальної схеми доменного виробництва, конструкції та технологічним особливостям доменних повітрянагрівачів, але не достатньо розглянуті сучасні методи математичного моделювання процесів теплообміну в регенеративних теплообмінниках (повітрянагрівачах). Так, на стор. 43 у п. 1.3, який має назву «Особливості роботи доменних повітрянагрівачів» описано труднощі при математичному моделюванні регенераторів та є посилання лише на один метод розрахунку повітрянагрівачів. Тому не дуже обґрунтованим здається подальший вибір саме математичної моделі протиточного регенеративного теплообмінника, запропонованої Ф.Р. Шклярюм, яка має достатньо багато спрощуючих припущень (стор. 59).

2. На стор. 33 у формулі (1.3) є друкарська помилка (пропущено CO_2), але вона не призводить до будь яких негативних наслідків у подальших розрахунках.
3. На стор. 55 у формулі (1.9) немає пояснення підрядкових індексів «ЗАСВ» і «ЗАГ».

Зауваження по 2 розділу:

1. На стор. 85 автор досить обґрунтовано пропонує використовувати P - NTU - метод для розрахунку рекуперативного теплообмінника зі складним рухом теплоносія. При цьому автор пише, що «кожна труба кожної секції поділяється на 10 елементів (мікротеплообмінників)». При поясненні вибору такої кількості елементів, здобувач спирається на дисертаційну роботу свого керівника, д.т.н. А.М. Ганжі. Вважаю, що при розробці методики автору слід

було більш детальноше зупинитися на питанні поділу рекуперативного теплообмінника на складові і вказати, на які саме чинники необхідно спиратися при даному виборі (розміри теплообмінника, витрата теплоносія і ін.).

2. Велика частина розділу 2 (с. 68-83) присвячена опису відомих методів (ϵ - NTU - метод, P - NTU - метод та метод поправкового коефіцієнту), та вибору між ними. Вважаю, що не було необхідності приводити їх так докладно. Тим часом, на стор. 81 і 82 автором запропоновано свій метод визначення поправкового коефіцієнта $\epsilon_{\Delta t}$, але з тексту не видно чіткого зв'язку, де конкретно в розрахунку застосовано даний підхід.

3. На стор. 59 є стилістично некоректна фраза: «Встановлено, що розповсюдженими апаратами для утилізації теплоти продуктів згоряння доменних повітрянагрівачів є рекуператори». Вважаю, що слід було б сказати «Відомо», тому що наприкінці фрази стоїть посилання на роботу інших авторів.

4. На стор. 78 записано формулу (2.74) з коефіцієнтом $\epsilon_{\Delta t}$, а роз'яснення цього індексу приведено лише на стор.80.

5. На стор. 89 стосовно визначення теплофізичних параметрів теплоносіїв записано «Детальніше див. 2.4». Слід було б сказати: «буде описано у наступному п. 2.4», тому що цей матеріал автором викладено пізніше.

6. В тексті на стор. 105 крім достовірності апроксимації слід було б привести діапазон температур, для якого отримано поліноміальні залежності теплофізичних властивостей компонентів димових газів і палива, і які у подальшому використовувались у програмі розрахунку систем утилізації теплоти продуктів згоряння.

Зауваження по 3 розділу:

1. На стор. 130 автор вказує на те, що характер залежностей температур димових газів від часу, які отримані у ході експерименту іншими авторами, декілька відрізняється від отриманих здобувачем у результаті розрахунків за запропонованим методом. Оскільки ці дані використовуються як вихідні для розробки системи утилізації теплоти димових газів, то зауваження полягає у тому, що слід було б оцінити вплив цієї розбіжності на подальші розрахунки.

Зауваження по 4 розділу:

1. Не достатньо обґрунтованим являє собою перевірка адекватності математичної моделі шляхом порівняльного розрахунку рекуперативного теплообмінника методом поправкового коефіцієнта, який є найменш

адаптований до таких розрахунків, тому що за твердженням самого автора у ньому не враховується зміна теплофізичних параметрів за площею теплообміну.

2. Як наслідок попереднього зауваження, слід сказати, що порівняння результатів розрахунку рекуператора, які були отримані за запропонованою методикою, з даними експерименту були б більш корисними для практики проектування і могли би дати основу для введення деяких поправкових коефіцієнтів, які б ще більш удосконалили математичну модель.

3. При розробці схем утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів слід було б оцінити капітальні витрати на їх створення. Це б дозволило проводити порівняння схем також за економічними показниками.

Взагалі текст дисертації написано грамотно, у ньому практично не має помилок та похибок оформлення. Але за стилем написання є деякі дрібні зауваження стосовно використання речових оборотів, які призводять до ускладнення розуміння змісту. Висловлені зауваження не ставлять під сумнів вагомість отриманих наукових результатів.

8. Загальне враження від роботи

Детальне ознайомлення з текстом дисертації О.М. Заєць дає підстави стверджувати, що підхід здобувача до розв'язання задачі підвищення ефективності систем високотемпературного нагріву дуттєвого повітря на основі утилізації теплоти продуктів горіння відзначається фундаментальністю, практичною значимістю та ґрунтовністю дослідження. Висновки розділів характеризують особливості досліджень і результатів, що отримані. Заключні висновки логічно обґрунтовані, відображають сенс дисертаційної роботи.

9. Висновки по відповідності дисертаційної роботи встановленим вимогам

Розглянувши дисертаційну роботу Заєць Олени Миколаївни можна зробити наступні висновки:

Стиль викладання чіткий, послідовний, виключає неоднозначність трактування і розуміння основних положень дисертаційного дослідження.

1. Оформлення дисертації відповідає вимогам подання науково-технічної інформації.
2. Основні результати опубліковані у періодичних виданнях, основні положення апробовані на науково-технічних конференціях.

3. Зміст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи і дає повне уявлення про результати дослідження, які викладеного у дисертації.

4. Дисертаційна робота О.М. Заєць є закінченим науковим дослідженням, більша частина зауважень має характер уточнень, які спрямовані на прояснення окремих нюансів дослідження, на розвиток напрямку роботи в наступному і не знижує значимість отриманих дисертантом результатів.

Дисертаційну роботу виконано на високому рівні, вона відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), щодо кандидатських дисертацій, а її автор – Заєць Олена Миколаївна – заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
відділу моделювання та
ідентифікації теплових процесів
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України



В.О. Тарасова

« 6 » лютого 2018 р.

Підпис Тарасової В.О. засвідчую:
Учений секретар ІПМаш НАН України
доктор технічних наук



К.В. Максименко-Шейко