ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора Гаврюшенка Дмитра Анатолійовича на дисертаційну роботу кандидата технічних наук, провідного наукового співробітника Тимощенка Андрія Володимировича «Науково-технічні основи підвищення енергоефективності виробництва та використання теплоізоляційних матеріалів на основі базальтових волокон», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Дисертаційну роботу Тимощенка А.В. виконано в Інституті технічної теплофізики НАН України. Робота складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та чотирьох додатків. Обсяг роботи становить 325 сторінок основного тексту, включаючи 165 ілюстрації та 46 таблиць. Перелік використаних літературних джерел містить 191 найменування.

І. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню однієї з важливих науково-технічних проблем сучасної теплоенергетики – підвищенню енергетичної ефективності будівель шляхом впровадження теоретично та експериментально обґрунтованих новітніх технічних рішень в створенні і застосуванні високоякісних теплоізоляційних матеріалів. До теплоізоляційних матеріалів, що застосовуються в сучасному будівництві, пред'являються високі вимоги, які стосуються зменшення їх коефіцієнту теплопровідності та підвищення екологічної та пожежної безпеки. Цим вимогам відповідають теплоізоляційні вироби, що створені на основі базальтових волокон. На території України існують родовища гірських порід з унікальними властивостями, що дозволяють використовувати їх як сировину для виробництва високоякісних теплоізоляційних матеріалів. Ці матеріали відповідають більшості вимог, що стосуються теплозахисних властивостей, а також екологічної та пожежної безпеки. Але їх головним недоліком є великі енергетичні витрати при виробництві, наслідком чого є висока вартість виробів з базальтових волокон. Це ускладнює і обмежує їх застосування в будівництві.

Важливою та актуальною проблемою слід вважати розробку теплофізичних основ та науково обґрунтованих методів підвищення енергетичної ефективності технологій виробництва теплової ізоляції на основі базальтових волокон. Такі методи передбачають зниження споживання природного газу та електричної енергії при їх виробництві. Розробка цих методів повинна здійснюватися на основі поглибленого теоретичного та експериментального вивчення складних гідродинамічних та теплофізичних процесів, що протікають в технологічному для виробництва базальтових волокон, що є головним завданням даної дисертаційної роботи.

Інститут технічної теплофізики
НАН України
Вхідний №227
"19" 04 2021 р.

Важливим завданням цієї роботи є також розробка заходів щодо вдосконалення технологічного обладнання для виробництва базальтових волокон в напрямку зниження енерговитрат.

Про актуальність та важливість цієї роботи свідчить також її зв'язок з науковими програмами, планами і темами Інституту технічної теплофізики НАН України, в яких автор був відповідальним виконавцем.

II. *Коротка характеристика змісту роботи*

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну і практичну цінність, а також наведено інші необхідні відомості щодо загальної характеристики роботи.

У першому розділі на основі аналізу літературних джерел визначаються проблеми, що пов'язані з виробництвом базальтових волокон та матеріалів на їх основі. Наведено напрямки одержання з базальтової сировини нової високоякісної продукції, до якої відносяться базальтові волокна. Розглядаються види базальтових волокон, їх характеристики, вироби на основі базальтових волокон та галузі застосування цих виробів, зазначається, що важливим напрямком використання виробів з базальтових волокон є теплоізоляція будівель. Їх переваги в порівнянні з іншими видами теплоізоляційних матеріалів полягають у тому, що крім забезпечення низького коефіцієнта теплопровідності, ці вироби – пожежобезпечні та екологічно безпечні. Наведено відомі з літератури залежності коефіцієнту теплопровідності волокнистого базальтового матеріалу від його густини за різних температур.

Розглядаються існуючі технології виробництва штапельних і безперервних базальтових волокон та теплоізоляційних виробів на їх основі. Проаналізовано їх особливості, переваги та недоліки. Сформульовано вимоги до штапельних базальтових волокон в цілях їх використання, як теплоізоляційного матеріалу.

Автор вважає, що причини високої енергоємності виробництва базальтових волокон та, як наслідок, високої собівартості виробів з цих волокон. У випадку виробництва штапельних і безперервних волокон високі енерговитрати пов'язані з порушенням гідравлічних, температурних та технологічних характеристик процесу в фідері плавильної печі. Крім того, причинами високих енерговитрат є рекуперативні втрати енергії з поверхні ванни, втрати з високотемпературними продуктами згоряння та ін.

Дисертант відмічає, що модернізація технологій, яка спрямована на здешевлення виробництва продукції з базальтових волокон та забезпечення їх доступності, сприяє також переходу до матеріалів з кращими механічними і теплофізичними властивостями.

За результатами аналізу причин високої енергоємності виробництва виробів з базальту та недоліків існуючих технологій цього виробництва формулюються завдання наукових досліджень, спрямованих на зниження

цих енерговитрат та собівартості базальтових волокон, що сприятиме широкому використанню теплової ізоляції на основі базальтових волокон.

На основі виконаного аналізу стану розглянутої проблеми сформульовано основні завдання, що вирішуються в дисертаційній роботі.

У другому розділі наведено результати чисельних досліджень гідродинаміки та теплообміну при течії рідини з суттєвою залежністю в'язкості від температури. До таких рідин відноситься розплав базальту. Наведено результати автомодельного аналізу системи рівнянь гідродинаміки та теплообміну в примежовому шарі рідини на плоскій поверхні з врахуванням залежності в'язкості від температури та ефектів дисипації механічної енергії. За результатами цього аналізу одержано систему звичайних диференціальних рівнянь для функції току і температури, що враховує залежність в'язкості від температури. Залежність в'язкості від температури описується виразом, що отриманий для розплаву базальту. Система рівнянь розв'язується чисельно методом Рунге-Кутти 4 порядку точності. Для цих випадків визначено також напруження тертя та числа Нуссельта на плоскій поверхні. Крім того з аналізу цих результатів визначається залежність від повздовжньої координати товщини шару розплаву біля стінки (гарнісажного шару), в якому розплав вважається малорухомим. Визначається також залежність середньої густини теплового потоку від температури поверхні.

Автором також наведено результати чисельного моделювання ламінарної течії розплаву базальту та теплообміну в модульних ванних базальтоплавильних печах. Задача гідродинаміки і теплоперенесення розв'язується з урахуванням залежності теплофізичних властивостей розплаву базальту від температури. Розглядається течія розплаву в ванній та фідерній частинах печі. Граничні умови для даної задачі вибиралися так, щоб вони відповідали різним способам охолодження поверхні футеровки печі. За результатами розрахункових досліджень одержано значення теплових потоків та розподіли температур по глибині ванни та масиву печі.

За результатами чисельного моделювання проведено аналіз впливу різних способів охолодження футеровки печі на рекуперативні теплові втрати. Встановлено, що мінімальні рекуперативні втрати енергії відповідають примусовому конвекційному повітряному охолодженню поверхні футеровки. Вони виявляються меншими, ніж при природному радіаційно-конвекційному охолодженні та при примусовому водяному охолодженні. Визначено розміри гарнісажного шару в ванному та фідерному просторах печі. Досліджено вплив на розміри гарнісажного шару інтенсивності охолодження поверхні розділу.

З аналізу розрахункових даних встановлено причини порушення процесів витікання та формування струмин мікронного діаметра на пластинчастому фільєрному живильнику. Встановлено діапазон допустимих величин густин теплових потоків в фідері плавильної печі, які дозволяють

виключити переохолодження розплаву та досягнення діапазону температур, які відповідають межам кристалізації.

У третьому розділі наводяться результати чисельних досліджень течії повітря та перенесення енергії в корпусі-теплообміннику печі плавильної. Дослідження виконуються з метою розробки заходів щодо зниження величини рекуперативних втрат і створення ефективної системи повітряного охолодження футеровки печі. Зазначається, що корпус плавильної печі містить в собі прямокутний вертикальний канал, що охоплює футеровку печі і виконує функцію теплообмінника. Рух повітря в прямокутному каналі здійснюється за рахунок примусової та вільної конвекції. Теплота до повітряного потоку підводиться з боку внутрішнього об'єму печі. Зовнішня поверхня корпусу-теплообмінника теплоізольована. Між внутрішньою та зовнішньою поверхнями каналу відбувається радіаційний теплообмін. Система рівнянь турбулентного перенесення доповнюється рівняннями $k-\varepsilon$ моделі турбулентності.

За результатами чисельного розв'язання системи відповідних рівнянь автором визначаються розподіли швидкості течії повітря і температури в вертикальних та горизонтальних площинах каналу теплообмінника за різних значень масових витрат теплоносія. З аналізу розрахункових результатів визначаються закономірності течії і теплоперенесення в каналі за цих умов. Наведено зміну температури повітря та температурного напору по довжині каналу для різних теплових потоків, що надходять з боку печі, та при різних витратах теплоносія. Визначаються також розподіли густини теплового потоку та коефіцієнтів тепловіддачі по довжині каналу для різних умов.

Оцінюється вплив гравітаційних та інерційних сил на інтенсивність теплообміну в каналі. Побудовано розподіли за довжиною каналу локальних чисел Нуссельта на його внутрішній (гарячій) та зовнішній поверхнях. Показано, що інтенсивність конвекційного теплообміну на внутрішній (гарячій) поверхні нижче інтенсивності теплообміну на зовнішній поверхні.

В розглянутій теплофізичній моделі досліджується теплообмін в каналі за умов підведення теплоти до каналу теплообмінника з одного боку. Для верифікації побудованої моделі теплообміну проводилось її тестування шляхом розв'язання за тим же алгоритмом відомої з літератури задачі для випадку двобічного підведення теплоти за граничних умовах 2-го роду.

За результатами розрахункових досліджень одержано узагальнюючі залежності, що дозволяють визначити середні числа Нуссельта та середні температурні напори на поверхнях каналу. Одержано також узагальнюючу залежність величини коефіцієнту опору тертя, як функції від величини безрозмірної координати. Одержані значення коефіцієнту опору тертя можуть використовуватися для визначення втрат тиску в каналі системи повітряного охолодження корпусу плавильної печі та для підбору відповідного технологічного обладнання для організації течії повітря в каналі теплообмінника.

Результати цих досліджень можуть застосовуватися для створення інженерної методики розрахунку потужності системи повітряного охолодження корпусу плавильної печі.

Четвертий розділ присвячено розгляду результатів дослідження процесів перенесення енергії в високотемпературному керамічному регенеративному теплообмінному апараті, що застосовується для підігріву окислювача в системі спалювання газу. Дослідження виконуються з метою визначення режимів роботи регенераторного теплообмінника, при яких забезпечується його тривала експлуатація, а також для визначення теплових і енергетичних характеристик даного апарата. Ефективність роботи теплообмінного апарату оцінюється за відношенням фактичного теплового потоку, що передається апаратом, до максимально можливого теплового потоку. Температурний режим теплообмінного апарату визначається за результатами розв'язання нестаціонарного рівняння теплопровідності. Для визначення часу зарядки та розрядки регенератора застосовується модель нестаціонарного теплообміну необмеженої пластини. За результатами аналітичного розв'язання рівняння теплопровідності побудовані розподіли температури по товщині пластини в період зарядки/розрядки регенератора. Знайдено також залежність середньої температури пластини від числа Фур'є. Періоди зарядки і розрядки регенератора розглядаються по черзі. Значення температури, що одержане в кінці розрахунку одного періоду, приймалося як початкове значення для розрахунку другого періоду. Обчислення проводилися до моменту стабілізації температурних кривих, що характеризують періоди зарядки і розрядки регенератора.

За результатами розрахункових досліджень визначено допустимий діапазон зарядки-розрядки насадки регенеративного теплообмінного апарата для умов, що розглядаються. З отриманих результатів автор робить висновок про те, що підігрів окислювача до температур 1300-1400 °С дозволяє здійснювати процеси плавки базальту і варіння скла при підвищених коефіцієнтах надлишку повітря (до 1,5). Застосування компактних теплообмінних апаратів регенеративного типу з комірчастою структурою і пальниками регенеративного типу дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічного процесу. Показано, що для насадки регенератора доцільно використовувати матеріал з допустимою температурою застосування не нижче 1525 °С.

У п'ятому розділі викладено результати експериментальних досліджень процесів тепломасоперенесення при зневодненні плит, що виготовлені на основі базальтових волокон. Дослідження виконуються з метою оцінки питомих енергетичних витрат та витрат природного газу для сушіння теплоізоляційних базальтових плит. Проаналізовано дані виробників цих матеріалів щодо початкового вмісту вологи в базальтових плитах та оцінюється обсяг енергії, що необхідно витратити для їх висушування. Наведено схему експериментального стенду для дослідження процесу сушіння різних матеріалів та викладено методику проведення експерименту.

Автором визначено механізми перенесення вологи в базальтових плитах, які можна віднести до капілярно-пористих матеріалів, та характерні періоди процесу сушіння, що відрізняються за швидкістю цього процесу. За даними експериментів побудовано криві сушіння теплоізоляційних базальтових плит різної товщини для різних значень температури сушильного агенту. Визначено, що з підвищенням температури сушильного агента процес сушіння прискорюється, а час сушіння скорочується. Побудовано також залежності швидкості сушіння від вологовмісту базальтових плит. Крім того, розглядається також вплив швидкості сушильного агента на кінетику сушіння базальтових плит. Для цього в експерименті змінювалася швидкість теплоносія, а його температура лишалася незмінною. Показано, що вплив швидкості теплоносія на швидкість сушіння менш суттєвий, ніж вплив його температури. Визначено також, що при високих температурах сушильного агента його вологовміст не суттєво впливає на інтенсивність і час сушіння базальтових плит.

Для узагальнення впливу режимних параметрів на швидкість процесу сушіння базальтових плит в першому періоді одержано відповідну розрахункову залежність.

Розглядаються також характеристики процесу сушіння базальтових плит у другому періоді. Наведено криві сушіння для другого періоду, що побудовані для плит різної товщини при різних значеннях температури, вологовмісту та швидкості сушильного агента.

Узагальнення результатів експериментального дослідження проводилося методом В.В. Краснікова. Одержано узагальнену залежність для розрахунку часу сушіння теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. Узагальнена крива сушіння дозволила одержати приведені значення критичних вологовмістів, які характеризують якісні зміни у перебігу процесу.

Методом чисельного моделювання досліджувалася аеродинаміки потоку сушильного агента в сушильній камері. Компоновка камери сушіння, що розглядається, дозволяє мінімізувати величину некерованої циркуляції агенту сушіння по периметру камери. Розглядалася ізотермічна турбулентна течія теплоносія, що складався з суміші продуктів згоряння природного газу з перегрітою водяною парою. За результатами розрахунків визначено розподіли швидкості сушильного агента в сушильній камері. Визначено також зміну тиску по довжині сушильної камери. Одержано безрозмірну величину аеродинамічного опору камери сушіння.

Одержані в цьому розділі результати можна застосовувати для розробки енергоефективних теплотехнологічних режимів конвекційної сушки базальто-бентонітових теплоізоляційних виробів та її апаратурного оформлення.

У шостому розділі представлено результати експериментальних досліджень теплоізоляційних характеристик виробів на основі базальтових волокнистих матеріалів. Визначено об'єкти досліджень, на яких проводилися

випробування цих теплоізоляційних матеріалів. Розглядається методика проведення досліджень ефективності відповідних теплоізоляційних конструкцій та методика обробки даних вимірювання. Теплоізоляційна ефективність оцінювалася за величинами виміряних температур та густин теплових потоків на поверхнях матеріалу, а також за результатами тепловізійної зйомки досліджуваних об'єктів. За одержаними даними стосовно виміряних температур та теплових потоків визначалися коефіцієнти теплопровідності матеріалів, що досліджувалися.

За результатами експериментів встановлено, що теплоізоляційні характеристики виробів з базальтових волокон залежать від діаметра цих волокон. При цьому вироби з базальтових волокон меншого діаметра мають кращі теплоізоляційні властивості, ніж ті, що виготовлені з волокон більшого діаметра. Визначено також, що існує оптимальна густина волокнистого теплоізоляційного матеріалу, яка забезпечує мінімальну теплопровідність шару теплоізоляції.

Автором наведено також результати визначення зміни у часі коефіцієнтів теплопровідності шару теплоізоляції, що встановлено на реальному об'єкті. Одержані дані підтверджують високі теплотехнічні та експлуатаційні характеристики теплоізоляційної конструкції.

У сьомому розділі наведено опис та результати натурних випробувань зразків дослідно-промислових установок, створених з метою енергоефективної модернізації цієї галузі. Перелічуються технічні та організаційні рішення, що зумовлюють їх ефективність. З використанням результатів досліджень розроблено герметичний корпус-теплообмінник та створено на його основі систему керованого повітряного охолодження футеровки ванної плавильної печі. Проведено натурні випробування та визначено його теплотехнічні характеристики. Розробка експлуатується в складі установок виробництва БСТВ та ББВ. Розроблено дослідно-промислові зразки модульних агрегатів з виробництва БСТВ (за дуплекс-технологією) та ББВ. Агрегати містять у своєму складі нові базальтоплавильні печі з підігрівом повітря в компактних керамічних теплообмінниках регенеративного типу, систему керованого повітряного охолодження футеровки печі, модернізовані фільєрні живильники, систему дозування та завантаження сировини, систему безпеки, керування та автоматизації теплових процесів з функціями підтримання потужності та складу газоповітряної суміші. Проведено модернізацію конвеєрної установки для сушіння пласких напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі БСТВ. Зниження долі енергоносіїв в собівартості високоякісної вітчизняної базальтової теплової ізоляції створює основу для її широкого застосування в системі житлово-комунального господарства. Проте зазначається що, необхідні організаційно-економічні системні заходи з боку держави, які б стимулювали, як виробництво такої продукції, так і її застосування у будівництві.

III. Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній

- встановлено нові закономірності та характеристики течії на плоскій поверхні розплаву базальту при температурах 900...1450 °С. Ці результати отримані шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь гідродинаміки і теплоперенесення в примежовому шарі за умов суттєвої залежності в'язкості рідини від температури. За результатами цього розв'язання визначено умови формуванні малорухомого шару розплаву біля твердої поверхні;
- запропоновано нову теплофізичну та гідродинамічну модель теплоперенесення при ламінарної безнапірної течії розплаву базальту в ванній та фідерній частинах плавильної печі, що врахує залежність теплофізичних властивостей розплаву від температури. Визначено умови утворення та границі гарнісажного шару в ванній та фідерній частинах печі. Одержані значення верхньої та нижньої границь кристалізації розплаву;
- встановлено причини та умови, за яких порушуються режими витікання розплаву та процеси формування струмин мікронного діапазону діаметрів в пластинчастому фільєрному живильнику. Вперше встановлено границі допустимих величини густин теплових потоків в фідері плавильної печі, за яких унеможливлюється переохолодження розплаву до температур, що відповідають межам кристалізації;
- визначено структуру течії та закономірності формування полів швидкості і температури в каналі корпуса-теплообмінника плавильної печі при однобічному підведенні теплової енергії. Ці закономірності одержані з чисельного розв'язання задачі аеродинаміки в вертикальному каналі за умов радіаційно-конвекційного теплообміну на його поверхнях. Знайдено залежності коефіцієнтів складного теплообміну на стінках каналу від витрати повітря та його середньої температури в каналі;
- одержано нові закономірності процесу сушіння жорстких та напівжорстких плит, що створені на основі базальтових волокон та бентонітової глини. За цими результатами, що одержані з експериментальних досліджень, побудовано узагальнену розрахункову залежність терміну сушіння цих виробів від швидкості сушіння в першому періоді, а також від температури, швидкості теплоносія та безрозмірних товщини та густини матеріалу, знайдено діапазон питомих витрат енергії для зневоднення цього матеріалу.

IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

- за результатами досліджень сформульовано вихідні дані для модернізації фідеру плавильної печі та вузла кріплення пластинчастого фільєрного живильника;

- для мінімізації рекуперативних теплових втрат через футеровку плавильної печі запропоновано примусове конвекційне повітряне охолодження цієї футеровки. Для його організації корпус печі виконується у вигляді теплообмінника, рух повітря в якому, здійснюється в прямокутному, вертикальному каналі, розташованому по периметру футеровки;
- результати чисельних та експериментальних досліджень дозволили розробити дослідно-промисловий зразок нового енергоефективного агрегату з виробництва базальтового супертонкого волокна за дуплекс-технологією. Розроблені уніфіковані базальтоплавильних печі дозволили знизити витрати природного газу у 4 рази у порівнянні з печами першого покоління;
- за результатами досліджень розроблено нові уніфіковані установки для розплавлення і роздування базальтових ниток з одержанням БСТВ. Ці установки дозволили знизити витрату природного газу на 30% у порівнянні з установками першого покоління. Досягнуті результати дозволили знизити споживання природного газу на виробництво кінцевої продукції у 1,5 рази по відношенню до агрегату першого покоління;
- одержані результати дозволили розробити нову енергоефективну модульну дослідно-промислову установку з виробництва базальтової безперервної комплексної нитки, яка забезпечує зниження у 2 рази витрат природного газу на виробництво цієї нитки по відношенню до існуючих установок модульного типу, а також підвищення середньої міцності базальтового волокна у 1,2-1,4 рази;
- модернізовано конвеєрну установку для сушіння пласких напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі базальтового супертонкого волокна. Запропоновані заходи з модернізації дозволили збільшити на 25-35% продуктивність установки по готовій продукції та знизити на 15% величину питомих енергетичних витрат на одиницю випареної вологи.

Практичне значення даної роботи підтверджується також відповідними актами впровадження, отриманими в 2015, 2016 та 2018 роках.

Так, на підприємстві ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» впроваджено:

- дослідно-промисловий зразок нового енергоефективного агрегату другого покоління з виробництва базальтового супертонкого волокна за дуплекс-технологією;
- модернізовану конвеєрну установку для сушіння пласких напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі базальтового супертонкого волокна;

- нову енергоефективну модульну дослідно-промислову установку з виробництва базальтової безперервної комплексної нитки (діректровінгу)

V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, підтверджено виконанням досліджень з використанням сучасних ефективних методик і адекватних моделей, коректністю фізичних припущень та позитивним досвідом впровадження результатів дисертаційної роботи. Достовірність теоретичних результатів та результатів численних розрахунків підтверджено порівнянням їх з даними інших авторів, а також порівнянням з результатами експериментальних досліджень.

Основні наукові положення і результати роботи, що відповідають тематиці дисертації, пройшли апробацію на 19 міжнародних та вітчизняних науково-технічних та науково-практичних конференціях.

VI. Повнота викладення наукових положень та висновків.

Основні положення роботи викладені в 43 наукових працях. З них 24 статті опубліковано у фахових (в тому числі електронних) наукових виданнях України та інших держав, з яких п'ять публікацій у наукових періодичних виданнях інших держав, включених до міжнародних наукометричних баз *Index Copernicus*, *РИНЦ*, *Web of Science, Scopus*, 17 публікацій у фахових виданнях України, та дві публікації у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій. Крім того, автором отримано три патенти України.

В дисертаційній роботі Тимощенка А.В. не виявлені ознаки плагіату або запозичень ідей, результатів і текстів інших авторів без посилання на відповідне джерело. В роботі повністю відсутні матеріали та висновки кандидатської дисертації здобувача.

Автореферат дисертації Тимощенка А.В. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених у дисертації. Текст автореферату адекватний змісту, структурі та основним положенням дисертації.

VII. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація і автореферат викладені літературною мовою, послідовно, грамотно та доступно, фрази чіткі і завершені, усі рисунки інформативні та правильно оформлені, читання навіть складних формул не викликає труднощів.

Дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», пп. 9, 10, 12, 13, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими

постановою Кабінету Міністрів України від 19.08. 2015 р.), що їх пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

VIII. Зауваження до дисертації

1. Деякі припущення, зроблені при побудові моделей фізичних процесів, вимагають більш наочного обґрунтування. Так, у розділах 5 (явно) та 3 (неявно) автором робиться припущення про те, що флюїд можна розглядати як нестисливе середовище. Але в розділі 5 розглядається рух суміші продуктів згорання природнього газу та водяної пари (стор. 214) за низьких значень густини (наприклад, таблиця 5.6), а в розділі 3 – рух повітря. У даних випадках внесок від стисливості середовища потребує окремого розгляду. У розділі 2 розглядається рух багатофазної гетерогенної системи (містить рідку, газоподібну та кристалічну фазу), причому приймається, що це середовище є ізотропною ньютонівською рідиною з неперервним розподілом властивостей. Дане наближення також потребує більш детального аналізу.
2. На відміну від пункту 2.1.4, наприклад, у пункті 2.2.3 автор вказує на те, що в даній моделі дисипативні ефекти не враховувались – хоча рівняння описують незворотні процеси і містять доданки, які враховують вплив дисипації енергії за рахунок переносу імпульсу та теплоти.
3. Деякі формули потребують додаткових пояснень. Так, не зрозуміло, яким чином отримано формулу (2.20) (стор. 94) – посилання чи пояснення відсутні. Крім того, у лівій частині формули стоїть розмірна величина, а у правій – безрозмірна. Достатньо дивний вигляд маж вираз (2.44).
4. Автор не приводить жодного аналізу похибок результатів, отриманих аналітичними методами, а також методами комп'ютерного моделювання. Автором вказано, що побудова розв'язків відповідних диференціальних рівнянь виконувалась чисельно методом Рунге-Кутта четвертого порядку, проте не описано, явний чи не явний метод використовувався, не проаналізовано стійкість отриманих розв'язків. На відповідних графіках похибки також не вказано. Врахування цих похибок дозволило б провести більш коректне порівняння отриманих результатів з експериментальними даними.
5. Наведені методи обчислення похибок (стор. 185-188) є загальновідомими, тому наведений в докторській дисертації їх детальний опис є зайвим. З іншого боку, наведені і таблицях 5.1, 5.2, 5.3 результати не проаналізовано.,
6. Проведений автором аналіз представлених графічно даних не завжди є вичерпним. Наприклад, не зрозуміло, яке фізичне обґрунтування має

наведена автором апроксимаційна формула (5.9), не вказано похибки визначення параметрів апроксимації, не вказані числові параметри достовірності обраної гіпотези. Аналогічні зауваження можна віднести і до аналізу даних, представлених на рисунках 5.2, 5.3, 5.5. Зокрема, наведені криві мають явно виражений сигмоїдний характер, і тому допускають представлення і в інших координатах – можливо (це потребує додаткового аналізу) в обернених координатах (процедура Лайнуівера-Берка). Це дозволило б описати не окремі частини кривих, а всю функцію в цілому.

7. Наведені автором у розділі 2 розрахунки враховують існування пристінкового шару, у розрахунках розділу 3 існування такого шару цілком природнє – задачу може бути описана у формалізмі модифікованого підходу А.М Тихонова, що значно спростило би розрахунки і зробило аналіз отриманих результатів більш наочним.
8. У дисертації та авторефераті наявні деякі похибки редакційного та стилістичного характеру, вади в оформленні рисунків, таблиць тощо. Наприклад:
   - в таблиці 2.2 пропущено значення температури зовнішнього середовища;
   - автором часто застосовується невдала та заплутана система позначень. Так, в розділах 2 та 3 температуру в градусах Цельсія позначено через T, а в розділі 4 – через t, проте у розділі 2 через t позначено час, тоді як в розділі 4 час позначено через τ;
   - на багатьох рисунках не вказано одиниці виміру (наприклад, рисунки 5.2, 5.7;
   - швидкість сушіння позначено через N (рис. 5.4, 5.5, 5.11), $\frac{du}{dt}$ (рис. 5.7, 5.8) і $\frac{N}{\Delta t}$, причому зрозуміти, в яких одинцях виміру визначено ці величини, неможливо;
   - невдале, з точки зору сучасної термодинаміки, використання терміну кількість теплоти у конструкціях виду «теплота витрачається» (стор.181), «втрати теплоти» (стор. 222). У всіх цих реченнях мова йде про втрати енергії, так як теплота – лише один з шляхів перетворення енергії, і говорити про накопичення і втрати теплоти, очевидно, неможливо.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, які виносяться на захист дисертантом. Крім того, вказані недоліки в основному мають характер побажань для подальшої роботи і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Тимощенка А.В.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Тимощенка Андрія Володимировича «Науково-технічні основи підвищення енергоефективності виробництва та використання теплоізоляційних матеріалів на основі базальтових волокон» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові, науково обґрунтовані, результати комплексного дослідження гідрогазодинамічних та тепломасообмінних процесів, що протікають в елементах технологічного обладнання з виробництва базальтових волокон та теплової ізоляції на їх основі.

Наукове значення роботи полягає в розробці наукової та теоретичної бази для підвищення енергетичної ефективності виробництва базальтових волокон та теплової ізоляції на їх основі шляхом системної інтенсифікації багатостадійної теплотехнології. На основі одержаних наукових результатів створено дослідно-промисловий зразок нового енергоефективного агрегату з виробництва базальтового супертонкого волокна (БСТВ) за дуплекс-технологією, що підтверджує практичне значення наукових результатів.

Роботу виконано на сучасному науковому рівні, а одержані результати мають високу наукову новизну та практичну цінність. Сформульовані в роботі наукові висновки характеризуються високим ступенем обґрунтованості. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика».

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота «Науково-технічні основи підвищення енергоефективності виробництва та використання теплоізоляційних матеріалів на основі базальтових волокон» повністю відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р. №656), а її автор, Тимощенко Андрій Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент:
Доктор фізико-математичних наук, професор
кафедри молекулярної фізики фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка Гаврюшенко Д.А.

Підпис засвідчую
Вчений секретар КНУ
Караульна Н.В.
15.04.