

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, головного наукового співробітника Інституту технічної теплофізики НАН України Давиденка Бориса Вікторовича на дисертаційну роботу Довгалоюка Володимира Борисовича “Розвиток наукових основ створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях”, що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

I. Актуальність теми дисертаційної роботи

Важливою проблемою для України є збереження її історичної спадщини. Велику роль при цьому відіграють музеї та виставкові зали, що містять унікальні експонати, які потребують постійного та неухильного піклування. Експонати музеїв складаються з матеріалів різного походження та відрізняються за хімічним складом та фізичними властивостями. Отже і вимоги до температурних та вологісних умов зберігання художніх та історичних цінностей також будуть різними. При відхиленні цих умов від нормативних, відбувається порушення тепломасообмінних процесів в матеріалах, їх фізико-хімічне старіння та навіть руйнування. Негативну роль при цьому відіграють надлишкові температурні та вологісні напруження, що утворюються внаслідок порушення умов зберігання експонатів і викликають їх лінійну та об’ємну деформацію. Тому оптимізація і регулювання температурно-вологісного режиму в приміщеннях музеїв є головними факторами, яким повинна відповідати музейна кліматологія.

Функції регулювання та стабілізації умов у музейних приміщеннях повинна виконувати спеціально розроблена система формування температурно-вологісних режимів повітряного середовища як в усьому приміщенні музею, так і в окремих його зонах. Розробка такої системи повинна здійснюватися на основі наукових даних, що стосуються тепломасообмінних та деформаційних процесів в гігроскопічних експозиційних матеріалах, аеродинаміки та тепломасоперенесення в залах музею при роботі систем кліматизації, а також в самих системах кліматизації.

Виходячи з цього, дисертаційну роботу, мета якої полягає у науковому обґрунтуванні створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях та вдосконаленні повітродозподілення у змінному режимі тепловологонадходжень за умов забезпечення в зонах розміщення експозиції нормованих мікрокліматичних параметрів, слід вважати важливою і актуальною. Про важливість та актуальність цієї дисертаційної роботи свідчить також її відповідність планам держбюджетної науково-дослідної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури та завданням госпдоговірної науково-дослідної роботи за темою «Проведення комплексного науково-технічного дослідження Софійського собору, XI ст. – об’єкту нерухомої культурної спадщини Національного заповідника «Софія Київська».

II. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається з анотації, вступу, шести розділів основних результатів,

загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 295 найменувань та чотирьох додатків, що містять інформацію про практичне використання результатів. Загальний обсяг дисертаційної роботи (разом з додатками) складає 384 сторінки машинописного тексту. Робота містить 127 рисунків та 20 таблиць.

В анотації в стислій формі викладено основні результати дисертаційної роботи. Наведено дані про наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, представлено список опублікованих праць за темою дисертації.

У вступі обґрунтована актуальність роботи, визначено її зв'язок з держбюджетною тематикою Київського національного університету будівництва і архітектури, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, описано об'єкт, предмет та методи досліджень, наведені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації, дані про публікації за темою дисертації, а також про структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі на основі аналізу літературних джерел формулюються проблеми, на вирішення яких спрямована дисертаційна робота. Розглядаються результати попередніх теоретичних та експериментальних досліджень, що стосуються параметрів мікроклімату в музейних приміщеннях. Зазначається, що відхилення температури та вологості повітря в таких приміщеннях від нормативних значень може приводити до деформації структурних елементів художніх виробів. Перезволоження або пересушення експонатів може бути причиною зменшення міцності матеріалів, з яких вони виготовлені, утворення тріщин на їх поверхнях та плісняви, а також до корозії на металевих виробах. Розробка заходів щодо запобігання згаданих негативних явищ повинна ґрунтуватися на докладному теоретичному та експериментальному вивченні процесів їх протікання. Розглядаються основні теоретичні підходи до аналізу тепломасообмінних, фізико-механічних і деформаційних процесів в матеріалах, що складають основу ряду музейних експонатів, та до впливу зовнішніх факторів на протікання цих процесів. Визначаються фактори цього зовнішнього впливу, що характерні для музейних приміщень. Важливим показником в цьому плані є архітектурно - художні особливості музейних споруд та приміщень. В розділі проаналізовано ряд їх характерних особливостей, що впливають на мікроклімат всередині приміщень та на організацію систем його підтримання. Зазначається, що параметри мікроклімату та система його формування повинні відповідати організації експозиції, властивостям матеріалу експонатів, архітектурно-художнім рішенням будівлі та характеру надходження шкідливих виділень у приміщення. Ці параметри мікроклімату повинні біти особливими для кожного окремого музею. При цьому треба також враховувати кількість відвідувачів музею.

Наводяться результати попередніх натурних досліджень стану повітряного середовища та динаміки його зміни в ряді музейних приміщень. З результатів досліджень випливає, що підтримка стабільних параметрів повітря в музейних приміщеннях цілодобово протягом року, можлива тільки за допомогою відповідних систем кліматизації та розподілення повітря. Для вирішення питання

щодо організації повітрообміну та повітророзподілення в музейних приміщеннях застосовуються головним чином витісняюча вентиляція без стратифікації; витісняюча вентиляція зі стратифікацією; ежекційно – перемішувальна або повністю перемішувальна системи, а також зональні системи вентиляції. Розглядаються їх характерні особливості. Наведено відомі з літератури підходи до математичного описання характеристик струминних течій повітря, що надходить з повітророзподільників.

Аналізуються існуючі підходи до оцінки ефективності організації системи повітрообміну. Зазначається, що підвищення енергетичної ефективності систем вентиляції та кондиціонування безпосередньо пов'язана з питаннями ефективності використання повітря, що подається у приміщення.

В даному розділі розглядаються також відомі підходи до опису процесів тепломасоперенесення в капілярно – пористих матеріалах, які складають основу музейних експонатів, а також вплив цих процесів на механічні характеристики зазначених матеріалів. Розглядаються форми зв'язку вологи з капілярною структурою матеріалу. Для цього застосовується аналіз відомих залежностей рівноважного вологовмісту матеріалу від відносної вологості повітряного середовища. Наведено існуючі математичні моделі тепломасоперенесення в капілярно - пористих тілах. Описуються характеристики пружності полімерних матеріалів, що складають основу багатьох художніх виробів, які зберігаються в музеях, та аналізуються їх механічні властивості.

З аналізу результатів, що розглядаються в даному розділі, формулюються завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено питанням вдосконалення методів дослідження процесів тепломасообміну і деформації полімерних матеріалів при їх взаємодії з повітряним середовищем музейних приміщень. Одним з таких напрямків пов'язаний з геометричним аналізом ізотерм сорбції-десорбції в колоїдних капілярно-пористих тілах. З цього аналізу визначаються механізми поглинання вологи з повітря на різних етапах заповнення вологою капілярів. Важливим є також питання кінетики поглинання вологи з повітря шляхом сорбції.

Розглядається спосіб визначення кількості активних центрів сорбції в об'ємі полімеру та максимальної кількості гігроскопічної вологи, який впливає з графічного аналізу ізотерм сорбції.

Виходячи з системи рівнянь, що характеризують співвідношення між напруженнями та деформаціями для анізотропного пружно – в'язкого тіла, на яке діють механічні та температурні напруження, сформульовано математичну модель, що описує процеси тепломасообміну і деформації в матеріалах полімерної групи, що складають основу музейних експонатів. Розглядаються методи моделювання ядер повзучості та релаксації, що входять до вихідної системи інтегральних рівнянь, які стосуються дисперсних матеріалів. Наведено умови, яким повинні задовольняти відповідні функції. Розглядаються випадки незалежності механічних властивостей матеріалів від часу та випадки, коли така залежність існує.

Описуються моделі напруженого стану полімерних матеріалів при їх тепломасообміні з оточуючим середовищем. Наводиться рівняння, що описує

процес релаксації напружень у сухих та вологих зразках тканин та композитних матеріалів. Визначається фізична сутність складових, що входять до цього рівняння. Увага приділяється проблемі зворотної релаксації напруження, або астрінгації. Цей ефект є характерним для групи колоїдних капілярно-пористих тіл, що обмежено набрякають при зволоженні і дають усадку при сушці. Описано спосіб моделювання процесу астрінгації за допомогою сплайн - апроксимації експериментальних залежностей напруження в матеріалі від часу.

Досліджується також деформації і напруження, що виникають у в'язкопружних дисперсних системах в умовах тепломасообміну. За результатами аналітичних досліджень визначається ряд закономірностей деформаційно-напруженого стану дисперсних матеріалів, що дозволяють визначити зміни у часі напруження, деформації, ядра повзучості і релаксації в залежності від вологісних і температурних параметрів матеріалу.

Проведено аналіз загальних термодинамічних співвідношень з метою їх застосування для опису процесів висушування або зволоження дисперсних матеріалів. З цього аналізу визначається вихідна систему рівнянь, що описують взаємно пов'язані процеси релаксації напружень у матеріалі стрижня при його висушуванні за умов тепломасообміну з зовнішнім середовищем. Ця система описує взаємний вплив тепломасообмінних та деформаційних процесів у дисперсних системах.

Розглядається метод розрахунку залишкових деформацій в експозиційних матеріалах музейних експонатів при змінних температурних та вологісних режимах повітряного середовища. Наводяться приклади можливих варіантів залежностей від часу залишкових деформацій при заданих часових залежностях для напружень.

Визначається вплив градієнта вологи в пористому матеріалі на виникнення залишкові деформації при його висушуванні або зволоженні за умов зміни температури в музейному приміщенні. Розглядається спосіб застосування одержаних в цьому розділі результатів аналітичних досліджень для керування кліматичними режимами музейних приміщень

Третій розділ присвячено методам комплексного контролю параметрів повітряного середовища та вологообміну в матеріалах музейних експонатів. Зазначається, що музейні приміщення характеризуються циклічними режимами підвищення та зниження вологості, а також збільшення та зменшення температури внаслідок перебування відвідувачів у цих приміщеннях. В залежності від вимог до температурно-вологісного режиму музейні приміщення діляться на відповідні кліматичні зони. Для оцінки ефективності роботи систем забезпечення необхідних параметрів повітряного середовища в залах музеїв розробляються відповідні критерії. За значеннями цих критеріїв можуть прийматися рішення щодо створення систем забезпечення нормованих параметрів повітряного середовища в окремих зонах та в усьому музейному приміщенні.

Визначаються засади щодо створення систем регулювання температурно-вологісним режимом музейних приміщень. Розглядається можливість використання для обробки вихідної інформації стосовно цього режиму системи типу «нечітка логіка». Описується послідовність етапів обробки інформації при

застосування цієї системи. Запропоновано алгоритм для систем керування мікрокліматом музейних приміщень. Цей алгоритм ґрунтується на визначенні локальних та узагальненого індекси дискомфорту, що враховує характер протікання процесів тепломасообміну і деформації у матеріалах музейних експонатів; комфорт перебування у приміщенні відвідувачів музею; та стан приміщення музею. Кожен з локальних індексів дискомфорту має свій пріоритет. Найбільший пріоритет має локальний індекс дискомфорту музейного експонату, який визначається шляхом розв'язання рівнянь, що описують взаємний вплив тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних системах.

Увага також приділяється методам контролю вологопереносу в капілярно – пористих матеріалах музейних експонатів. Однією з основних вимог до цього методу контролю є безконтактність та безперервність вимірювань. В роботі зазначається, що цим вимогам відповідає метод поглинання енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності, що не руйнує дисперсний матеріал і відноситься до непрямих методів визначення вологості. Цей метод дозволяє забезпечити оперативність вимірювання, неруйнівний контроль та високу чутливість до змін вологості.

Четвертий розділ присвячено проблемам організації повітророзподілу в музейних приміщеннях при змінних режимах тепло- та вологонадходжень з застосуванням інтенсивно затухаючих струмин. Для організації повітророзподілу в музейних приміщеннях використовуються стельові повітророзподільники, що здійснюють подачу повітря у верхню зону приміщення під кутом до зони обслуговування. Застосовується також витісняюча вентиляція з застосуванням малошвидкісних повітророзподільників. Зазначається, що для оцінки їх ефективності доцільно визначити параметри повітророзподільних пристроїв, зміна яких дозволяє збільшити мінімальну глибину регулювання. За цих параметрів визначається мінімально можлива глибину регулювання витрати повітря в системі повітророзподілення за умови забезпечення розрахункової схеми циркуляції повітряних потоків у приміщенні. Глибина регулювання визначається як відношення плинного витратного навантаження до максимального розрахункового значення. Наведено та проаналізовано розрахункові співвідношення для визначення мінімальної глибини регулювання. Як параметр, що характеризує формування повітряного середовища в музейних приміщеннях, застосовується також енергія вентиляційних і теплових струмин.

Кількість механічної енергії в процесі турбулентного перемішування повітряних потоків визначається енергією припливних струмин, конвекційних потоків, та енергією від руху відвідувачів. Наведено математичний вираз для розрахунку ефективності організації повітрообміну, що визначається за механічною енергією припливних струмин, а також вираз для співвідношення енергії вентиляційних і теплових струмин. Визначається співвідношення між променевою та конвекційною складовими теплообміну в музейному приміщенні. Оцінюється вплив відвідувачів музею на аеродинамічні процеси та температурний стан музейного приміщення. Для цього визначаються характеристики динамічної та теплової взаємодії конвекційних потоків, що утворюються від груп

відвідувачів. Одержані дані розрахункових досліджень необхідно враховувати при розробці систем вентиляції та кондиціонування повітря в музеях.

Увага також приділяється особливостям організації та розрахунку повітрообміну при вентиляції анфілади виставкових залів. Наведено систему рівнянь, що визначає розподіл тисків між окремими приміщеннями анфілади, а також баланс витрат повітря та енергії.

Зазначається, що енергоефективні технології створення і підтримання температурно-вологісного режиму повітряного середовища в зонах розміщення музейних експонатів та знаходження відвідувачів передбачають використання струминних течій з високою інтенсивністю затухання. Розглядаються особливості розвитку інтенсивно затухаючих струминних течій у музейних приміщеннях. Сформульовано математичну модель для описання характеристик струминної течії повітря, що витікає з перфорованої поверхні. Наведено наближені математичні співвідношення для інженерних розрахунків параметрів вентиляційних струменів, зокрема залежність коефіцієнта затухання швидкості повітря від кількості отворів у перфорованій поверхні повітророзподільника, залежність для визначення параметрів струмини на необхідній відстані від повітророзподільника та ін. Розглядається також вплив гравітаційних сил на розвиток неізотермічної струмини, що надходить у приміщення крізь перфоровану панель.

Отримано залежності, за якими визначаються параметри течії, яка виникає при взаємодії двох неізотермічних струмин. Керування параметрами сумарного потоку забезпечує підтримання в зоні розміщення музейних експонатів нормованого температурно-вологісного та швидкісного повітряного режиму.

Увага також приділяється особливостям течії, що формується при витіканні плоскої струмини на криволінійну поверхню. Зазначається, що струмини, які спрямовані на криволінійну поверхню, мають високу інтенсивність затухання, а їх аеродинамічні та теплові параметри регулюються в широкому діапазоні в залежності від кривизни поверхні настилення та інших геометричних характеристик. Сформульовано наближену математичну модель, що описує характеристики цієї течії.

Розглядаються конструктивні рішення повітророзподільних пристроїв та результати їх дослідження. За результатами експериментальних досліджень уточнювалися одержані в роботі наближені теоретичні залежності. Для повітророзподільних пристроїв зі спрямуванням струмини на криволінійну поверхню експериментально визначалась доцільна форма і геометричні розміри вихідних каналів однощільних повітророзподільників. Показано, що для пристроїв з криволінійним дифузорним вихідним каналом форма цього каналу суттєво впливає на параметри струмини. Обґрунтовано розбіжності між експериментальними даними і результатами розрахунків за запропонованими наближеними моделями.

Далі розглядаються характеристики малошвидкісних панельно-секційних повітророзподільників. Визначаються розміри конструктивних елементів розподільної камери повітророзподільника з незмінною площею поперечного перерізу з відокремлювачами потоку, що забезпечують рівномірну початкову швидкість сформованої струмини. Показано, що відокремлювачі потоку

розрахованої геометрії дозволяють зменшити нерівномірність надлишкового статичного тиску по висоті повітророзподільника. Одержані результати свідчать про доцільність використання даної системи повітророзподілення для організації повітрообміну в музейних приміщеннях.

Визначено методологію вибору режимів роботи повітророзподільних пристроїв у системах кондиціонування зі змінними витратами повітря. Її застосування може забезпечувати підтримання нормованих параметрів повітряного середовища як в окремих зонах, так і в приміщенні музею в цілому.

П'ятий розділ присвячено розробці і дослідженню удосконалених енергоефективних апаратів для тепловологісної обробки повітря для музейних приміщень спеціального призначення. Наведено результати дослідження гідродинаміки та тепломасообміну у контактних апаратах, призначених для тепловологісної обробки повітря. Розглядаються теоретичні підходи для вирішення даних задач у контактних апаратах. Зазначається, що розрахункові залежності, одержані на їх основі, досить наближені і справедливі лише для окремих випадків.

Більш досконалим є підхід, що передбачає CFD моделювання течій багатофазних середовищ в апаратах. Один з таких підходів ґрунтується на застосуванні підходу Лагранжа, який передбачає розв'язання рівняння руху окремих частинок дисперсної фази. В підході Ейлера до розв'язання цієї задачі передбачається взаємне проникнення фаз, які складають загальний континуум. Для чисельних досліджень таких течій застосовуються відповідні моделі турбулентності, зокрема k-ε модель.

Аналітичні дослідження процесів обробки повітря у контактному апараті з термоелектричними модулями передбачають застосування наближених математичних моделей. Ці моделі ґрунтуються на рівняннях балансу теплоти, що складаються для об'єму апарату, та рівняннях тепломасообміну між повітрям та водою в пінному шарі. З аналізу теплових та гідродинамічних процесів, що протікають в пінних апаратах, визначаються основні фактори, які впливають на інтенсивність теплообміну між теплообмінною поверхнею і шаром піни.

Наводиться система диференціальних рівнянь для моделі Ейлера, що описує динаміку та теплоперенос в двофазних течіях. Ця модель реалізується в пакеті ANSYS FLUENT, який може застосовуватися для чисельного моделювання двофазної течії в пінному апараті. За результатами моделювання визначаються поля швидкості, тиску і температури в потоці. З аналізу результатів моделювання знаходяться залежності гідравлічного опору апарату від швидкості повітря та рівня рідини в піддоні апарату. Визначається вплив швидкості течії в апараті на якісні показники і ефективність його роботи. Побудовано розподіли відносної вологості та температури повітряного потоку по висоті апарату для певних режимів його роботи. Проведено аналіз коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні теплообмінника, що виконаний у вигляді пластин з трубками.

За результатами даного математичного моделювання теплообмінного апарату було визначено зони з найбільшим аеродинамічним опором, найменшим коефіцієнтом тепловіддачі, а також інші характерні особливості його роботи. За

цими результатами визначаються шляхи вдосконалення апарату з метою підвищення його ефективності як пристрою для тепловологої обробки повітря.

В результаті запропоновано більш досконалу нову модель контактного апарату з блоком термоелектричних модулів. Його конструкція за рахунок організації руху структурованого потоку забезпечує підвищення інтенсивності процесів теплової і вологісної обробки повітря. Його варто використовувати для забезпечення мікроклімату в спеціальних музейних приміщеннях, що характеризуються невеликим об'ємом та особливими вимогами до параметрів повітряного середовища. Як джерела теплоти (холоду) в апараті використовуються термоелектричні моделі, які засновані на ефекті Пельтьє. За результатами експериментальних досліджень цього апарату побудовано відповідні регресійні залежності, застосування яких дозволяє оптимізувати конструкцію основних вузлів апарату. Вдосконалений поверхневий теплообмінник, що застосовується в апараті, дає можливість підвищити ефективність його роботи шляхом інтенсифікації процесів теплообміну.

Розглядаються питання щодо застосування енергоефективних апаратів тепловологісної обробки повітря. Проведено термодинамічну оцінку ефективності роботи розробленого контактного апарату. Виконано порівняльний аналіз термодинамічних показників апарату запропонованої конструкції з показниками контактних апаратів, що випускаються серійно.

У шостому розділі описано результати досліджень систем керування температурно-вологісним режимом музейних приміщень на основі фрактального аналізу. Фрактальним методом пропонується виконувати оцінку та прогноз змін характеристик музейних експонатів. Цей метод можливо застосовувати для дослідження процесів тепломасообміну колоїдних капілярно-пористих матеріалів, що складають основу даних експонатів. Фрактальну вимірність поверхні колоїдних капілярно-пористих матеріалів можливо використовувати при аналізі процесів сорбції-десорбції матеріалу музейних експонатів, адекватно описувати наявні в тілах з пористою структурою гістерезисні явища та тепломасообмін при зміні відносної вологості повітряного середовища в музейних приміщеннях. Розглядається також можливість застосування фрактальних моделей для ідентифікації та керування мікрокліматичними параметрами музейних приміщень. Наводяться приклади практичного застосування фрактальних моделей при виборі режимів роботи систем формування мікроклімату музейних приміщень.

За допомогою цих моделей можливо виконати якісні оцінки обраних режимів створення штучного клімату у музейному приміщенні. Задача формулювання оптимальних режимів створення штучного клімату у музейних приміщеннях розглядається з точки зору оцінки ризиків деструкції художніх цінностей. Задача, що ставиться для обрання конкретного кліматичного режиму у приміщенні, полягає у виборі з множини можливих режимів такий, що створює у музейному приміщенні максимально позитивний температурно-вологісний стан.

Для оперативного керування системами кондиціонування повітря запропоновано використовувати визначальний параметр, складовими якого є температура, відносна вологість та швидкість руху повітря. При наближенні цього параметра до однієї з меж області самоподібності фіксується імовірність

порушення нормованого температурно-вологісного режиму і система управління мікрокліматом змінює параметри припливного повітря, або його витрати, а при необхідності і тип струмини системи повітророзподілення.

У *загальних висновках* наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

У *додатках* представлені акти впровадження матеріалів дисертаційної роботи.

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

- запропоновано нову фізико-математичну модель і систему диференційних рівнянь, що описує протікання і взаємний вплив процесів тепломасообміну і деформації в музейних експонатах, які містять як основу матеріали полімерної групи.

- з застосуванням методу геометричного аналізу ізотерм сорбції-десорбції та деформації для колоїдних капілярно-пористих матеріалів отримані нові залежності для визначення залишкового вологовмісту і залишкової деформації для цих матеріалів після закінчення повного циклу сорбції-десорбції. Ці залежності враховують температурно-вологісний стан внутрішнього середовища музейних приміщень

- для систем керування мікрокліматом музейних приміщень запропоновано новий алгоритм, що базується на узагальненому індексі дискомфорту і враховує три локальних індекси дискомфорту – процесів тепломасообміну і деформації у матеріалах музейних експонатів; комфорту перебування у приміщенні відвідувачів музею та будівлі музею. Найбільший пріоритет має локальний індекс дискомфорту музейного експонату.

- знайдено вплив аеродинамічних і теплових характеристик припливного повітря на розвиток неізотермічних струменів при змішувальній вентиляції та змінних витратах повітря, що забезпечують необхідну циркуляцію повітря у визначених зонах музейного приміщення. Отримані нові залежності для розрахунку параметрів сумарної течії, що утворюється неізотермічними струменями, спрямованими під різними кутами.

- для оцінки ефективності організації повітрообміну в окремих зонах музейного приміщення та в приміщенні у цілому запропоновано відповідні критерії, за значеннями яких приймаються рішення про застосування відповідного обладнання та інженерних систем, що забезпечують нормовані параметри повітряного середовища.

- розроблено метод розрахунку повітророзподільників з настиланням повітряного потоку на криволінійну поверхню, що забезпечують ефективне затухання плоскої настільної струмини; визначено динамічні та теплові характеристики струминної течії, що утворюється при роботі цих повітророзподільників,

- методом чисельного моделювання визначено закономірності процесів тепломасообміну в контактному апараті з блоком термоелектричних модулів, що призначений для термовологісної обробки повітря. Аналіз результатів чисельного

моделювання дозволив визначити напрямки вдосконалення цього апарату та підвищення його ефективності.

IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

- одержані в роботі математичні залежності для визначення характеристик колоїдних капілярно-пористих матеріалів при часовій зміні параметрів повітряного середовища в музейних приміщеннях можуть бути використані при розробці інженерних методів розрахунку систем формування мікроклімату як на стадії проектування так і при їх експлуатації.

- отримані теоретичні залежності для реологічних характеристик колоїдних капілярно-пористих матеріалів при часовій зміні параметрів повітряного середовища музейного приміщення можуть використовуватися при розробці інтелектуальних систем управління штучним мікрокліматом.

- запропонований в роботі критерій якості управління системою штучного мікроклімату може використовуватися при розробці алгоритму керування пристроями для створення належних температурних та вологісних умов в музейних приміщеннях

- визначені в роботі закономірності розвитку неізотермічних струменів при змішувальній вентиляції та змінних витратах повітря, а також математичні залежності, що їх описують, можуть використовуватися при проектуванні вентиляційного обладнання та повітророзподільників для музейних приміщень

- за результатами чисельних досліджень обґрунтовано та розроблено конструкцію контактного апарату з тепловологісною обробкою повітря, що може застосовуватися в спеціальних музейних приміщеннях та при транспортуванні експонатів для забезпечення необхідних параметрів повітряного середовища. Термодинамічні показники запропонованої конструкції контактного апарату в порівнянні з серійними апаратами покращені на 20%.

- запропоновані в роботі заходи по формуванню мікроклімату в експозиційних залах сприятимуть покращенню умов зберігання музейних експонатів та будівель музеїв

Про практичну цінність дисертаційної роботи свідчать також результати її впровадження в Національному художньому музеї України (м. Київ); Національному науково-дослідному реставраційному центрі України (м. Київ); на підприємстві "Стандартпарк Захід" (м. Львів), а також в навчальному процесі студентів спеціалізації "Теплогазопостачання і вентиляція" на факультеті інженерних систем і екології Київського національного університету будівництва і архітектури, про що в роботі містяться відповідні акти.

V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та висновків підтверджується коректною постановкою задач аналітичних та чисельних досліджень, достатнім обґрунтуванням фізичних припущень, застосуванням надійних програмно-розрахункових комплексів SolidWorks та ANSYS FLUENT для проведення CFD моделювання. Достовірність результатів аналітичних

досліджень підтверджується також їх задовільним узгодженням з результатами експериментів.

VI. Повнота викладення наукових положень та висновків.

Основні положення дисертаційної роботи та висновки викладені в 40 друкованих наукових працях, до яких входять: 1 монографія; 28 статей, що опубліковані у фахових наукових журналах; 6 статей, що опубліковані в виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus, Web of Science, Google Scholar, Copernicus). За результатами роботи отримано також 1 патент України на корисну модель та 5 патентів на винахід.

Автореферат дисертаційної роботи Довгалюка В. Б. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертації.

VII. Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам

Дисертаційна робота відповідає вимогам до докторських дисертацій, а саме пунктам 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 р.).

VIII. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою науковою роботою, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертаційна робота написана з використанням сучасної наукової термінології. Стиль викладення наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння. Дисертація оформлена згідно прийнятих вимог до оформлення.

IX. Зауваження до дисертації

1. В розділі 1 надто докладно викладено підходи до опису турбулентної течії, які, в загалі, є достатньо відомими і наведеними в більшості монографій з аеродинаміки. Достатньо було б зробити посилання на відповідні літературні джерела.

2. В підрозділі 2.2 при дослідженні фізико-математичних закономірностей тепломасообмінних процесів та їх вплив на деформацію в дисперсних тілах наводиться система рівнянь (2.32), що описує співвідношення між напруженнями та деформаціями для анізотропного пружно-в'язкого матеріалу. Доцільно було б детальніше зупинитися на їх фізичному змісті.

3. В розділі 3 розглядаються концептуальні основи створення систем регулювання температурно - вологісного режиму музейних приміщень, що передбачають застосування системи «нечітка логіка». Бажано було б більш докладно зупинитися на перевагах цієї системи у порівнянні з відомим існуючими системами керування мікрокліматом музейних приміщень.

4. Більшість наближених математичних моделей струминних течій, що розглядаються в розділі 4, представляються вже після ряду перетворень. Для оцінки їх адекватності бажано було б також навести вихідну систему диференціальних рівнянь переносу і зазначити, які саме припущення та

спрощення застосовуються для одержання наближених математичних виразів. Це, наприклад, стосується рівнянь (4.152-4.155), що описують задачу настилення плоскої струмини на циліндричну поверхню.

5. Адекватність наведених наближених математичних моделей перевіряється шляхом порівняння результатів розрахунків за їх застосуванням з результатами експериментальних досліджень та результатами CFD моделювання. Але техніка проведення експериментальних досліджень та метод обробки експериментальних даних висвітлені недостатньо. Не визначено також граничні умови для системи рівнянь при чисельному моделюванні аеродинаміки повітророзподільників, результати якого наведено на рис. 4.27 та в таблиці 4.2.

6. В роботі доцільно було б провести експериментальні дослідження, або чисельне моделювання для визначення розподілу температури, швидкості та вологовмісту повітряного середовища в музейному приміщенні при роботі систем повітророзподілу, що розглядаються в дисертаційній роботі.

7. В наведених математичних виразах часто застосовуються символи та індекси, пояснення до яких відсутні. Вони також не містяться в загальному списку позначень.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що захищаються дисертантом, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Довгалока В.Б. є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що стосуються вирішення актуальної та важливої науково-практичної проблеми створення належних температурно-вологісних умов в музейних приміщеннях. Наукове значення роботи полягає в розробці теоретичної бази для реалізації заходів щодо забезпечення нормованих мікрокліматичних параметрів в зонах розміщення музейних експонатів. Ці заходи ґрунтуються на комплексному врахуванні тепломасообмінних і деформаційних процесів в гігроскопічних експозиційних матеріалах. Практичне значення роботи полягає в тому, що в ній запропоновані ефективні системи повітророзподілення та вдосконалені технічні рішення стосовно обладнання для цих систем. Запропоновано також інженерні методи розрахунку параметрів систем формування мікроклімату як на стадії їх проектування, так і при їх експлуатації.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації характеризуються високим ступенем обґрунтованості, а їх вірогідність не викликають сумнівів.

Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

За напрямком обраних та вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання та профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Довгалюка Володимира Борисовича “ Розвиток наукових основ створення температурно – вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях” відповідає вимогам до докторських дисертацій, а саме пунктам 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19.08. 2015 р.), а її автор, Довгалюк Володимир Борисович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
головний науковий співробітник
Інституту технічної теплофізики НАН України



Б.В. Давиденко

Підпис доктора технічних наук Давиденка Б.В. засвідчую:
Вчений секретар
Інституту технічної теплофізики НАН України
кандидат технічних наук



Р.В. Сергієнко