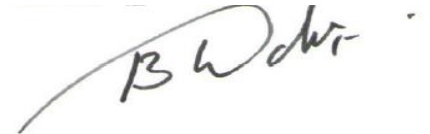


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

ДОВГАЛЮК ВОЛОДИМИР БОРИСОВИЧ



УДК 697.922; 628.8.644.1

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ
ТЕМПЕРАТУРНО–ВОЛОГІСНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРЯНОГО
СЕРЕДОВИЩА В МУЗЕЙНИХ ПРИМІЩЕННЯХ**

Спеціальність 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
КОРБУТ Вадим Павлович,
професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції
Київського національного університету будівництва
і архітектури, заслужений будівельник України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший
науковий співробітник
ДАВИДЕНКО Борис Вікторович,
провідний науковий співробітник
Інституту технічної теплофізики
Національної академії наук України

доктор технічних наук, професор
РЕДЬКО Олександр Федорович,
завідувач кафедри теплогазопостачання,
вентиляції та використання теплових
вторинних енергоресурсів
Харківського національного університету
будівництва та архітектури

доктор технічних наук, професор
ДЕШКО Валерій Іванович,
завідувач кафедри теплотехніки
та енергозбереження
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Захист відбудеться «08» липня 2020 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31.

Автореферат розісланий «05» червня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор



Ткаченко Т.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Збереження музейних експонатів є глобальною науково-практичною проблемою, рішення якої базується на створенні та підтримуванні основних мікрокліматичних параметрів: температури, вологості, рухомості повітря в приміщенні. Ці параметри в значній мірі визначають фізико-механічний і біологічний стан експонатів, структура яких при багатолітньому зберіганні суттєво змінюється. Виходячи з цього, оптимізація і регулювання температурно-вологісного режиму є одним з основних факторів музейної кліматології.

При відхиленні від нормованих параметрів повітряного середовища музейних приміщень створюється надлишкове напруження, змінюються лінійні і об'ємні розміри з подальшим руйнуванням експоната. Такому руйнуванню, насамперед, підлягають предмети зі шкіри, тканини, паперу, дерева, масляний та темперний живопис, що складається із гігроскопічних багаточастинних речовин з різними структурами. Підвищення швидкості повітряних потоків біля поверхні експонатів порушує структуру межових шарів, інтенсифікує тепломасообмін з навколишнім середовищем. При незначній рухомості повітря, що спостерігається в складних архітектурно-будівельних об'ємах, наявності анфілади виставкових залів, великої кількості перегородок, в приміщенні створюються невентильовані зони із застійним повітрям, що при підвищеній температурі й відносній вологості прискорює біологічні процеси та призводить до утворення плісняви і грибів.

В Україні працює 576 державних і комунальних музеїв, в яких зберігається понад 11 млн 590 тис. музейних експонатів (з тенденцією до збільшення), які є державною власністю. В процесі експлуатації різнотипові музейні об'єкти в більшості утримуються в тих самих температурно-вологісних умовах, що застосовуються при комплексному зберіганні і експонуванні музейних колекцій. Виділення спеціальних приміщень або зон з особливим кліматичним режимом у вітчизняних музеях не практикується.

Отже, розробка енергоефективних систем формування температурно-вологісних режимів повітряного середовища як в окремих зонах, так і в усьому музейному приміщенні, реалізація яких базується на комплексному врахуванні тепломасообмінних і деформаційних процесів в гігроскопічних експозиційних матеріалах, аеродинаміки повітряних потоків у приміщеннях і конструктивних елементах системи повітророзподілення, є актуальною науковою проблемою.

Теоретичною основою роботи є дослідження провідних вчених у галузях:

- тепломасообміну: О.В. Ликова, П.А. Ребіндера, Г.М. Дульнева, С.С. Кутателадзе, А.А. Халатова, Б.І. Баска, Б.В. Давиденка, Е.С. Малкіна, Р.В. Луцика, В.А. Дешко, М.Ф. Казанського, О.В. Приймака, В.М. Желиха, А.І. Накорчевського, І.І. Абаржі та ін.

- аеродинаміки: Г.Н. Абрамовича, М.Й. Гримітліна, В.Н. Талієва, А.Я. Ткачука, В.П. Корбута, Л.М. Дудінцева, Є.І. Полякова, М.Д. Тарнопольського, П.В. Участкіна, Л.С. Клячка, Л.Б. Успенської, Г. Шліхтінга, В.В. Батуріна, С.Є. Бутакова, І.А. Шепелева, Л. Прандтля, Ж. Бусінеска, Г. Рейхарда, Т. Кармана, М.Ф. Бромеля та ін.

- теорії моделювання об'єктів, процесів та явищ: В.М. Глушкова, Б.М. Бублика,

В.М. Михайленко, В.О. Плоского, В.Ю. Мейтуса, Е. Лоренца, Б. Мандельборта та ін.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до Закону України “Про музеї та музейну справу” (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 25, ст. 191) та тісно пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0119U102866) та госпдоговірних науково-дослідних робіт за темою «Проведення комплексного науково-технічного дослідження Софійського собору, XI ст. – об'єкту нерухомої культурної спадщини Національного заповідника «Софія Київська», що знаходиться за адресою: м. Київ, вул. Володимирська, 24».

Мета дисертаційної роботи полягає в науковому обґрунтуванні створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях, що побудовані на принципах теплообміну, масопереносу, закономірностях деформаційних процесів експонатів полімерної групи та вдосконаленні повітророзподілення у змінному режимі тепловологонадходжень, забезпечуючи в зонах розміщення експозиції нормовані мікрокліматичні параметри.

Завдання дослідження:

- розробити фізичні моделі механізму і кінетики поглинання вологи та виконати геометричний аналіз ізотерм сорбції-десорбції в полімерних дисперсних матеріалах експозицій;
- удосконалити фізико-математичні залежності тепломасообмінних процесів в дисперсних тілах, з урахуванням напруження і деформації, в залежності від температурних і вологісних параметрів внутрішнього повітряного середовища;
- розробити систему рівнянь, що описують взаємний вплив тепломасообмінних і деформаційних процесів в анізотропних пружних і пружно-в'язких капілярно-пористих матеріалах;
- визначити залишкові деформації в експозиційних матеріалах при перемінних температурно-вологісних режимах для управління мікрокліматичними параметрами приміщень;
- розробити критерії оцінки ефективності організації повітрообміну для обґрунтованого прийняття рішень створення систем забезпечення нормованих параметрів повітряного середовища в окремих зонах та у всьому музейному приміщенні;
- запропонувати алгоритм системи керування температурно-вологісним режимом, що базується на узагальненому індексі дискомфорту та метод контролю вологопереносу в колоїдних капілярно-пористих тілах, який заснований на принципах поглинання енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності;
- удосконалити теоретичні розрахунки аеродинамічних і теплових параметрів струмин при змінних тепловологісних режимах;
- розробити наукові основи створення енергоефективних апаратів тепловологісної обробки повітря та повітророзподільних пристроїв для музейних приміщень спеціального призначення;
- виконати на завершальному етапі прогнозування процесів старіння музейних експонатів та коригування параметрів повітряного середовища протягом періоду їх зберігання;

- впровадити виконані наукові розробки забезпечення мікрокліматичних умов в музеях різного призначення.

Об'єкт досліджень – енергоефективні технології створення нормованих мікрокліматичних параметрів повітряного середовища в музейних приміщеннях.

Предмет досліджень – процеси тепломасообміну і деформації в гігроскопічних матеріалах експонатів та формування температурно-вологісного режиму музейних приміщень.

Методи досліджень. У роботі використано фізико-математичні методи досліджень; методи математичної статистики та обчислювальної математики; методи математичного моделювання та комп'ютерного дослідження в середовищах MathCAD, Maple, Python та SolidWorks; експериментальні дослідження в лабораторних та реальних умовах музейних приміщень.

Вірогідність наукових гіпотез, положень, висновків і рекомендацій зумовлена використанням фундаментальних законів тепломасообмінних і деформаційних процесів у полімерних матеріалах та організації ефективного повітророзподілу при задовільній збіжності результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- розроблена узагальнена фізико-математична модель, яка описується системою диференціальних рівнянь для аналізу взаємного впливу тепломасообмінних і деформаційних процесів в матеріалах полімерної групи, які відбуваються при змінних параметрах оточуючого повітря, що дозволяє максимально точно описати анізотропні, пружні і пружно-в'язкі процеси в дисперсних матеріалах;
- отримані аналітичні залежності, що визначають вологовміст та деформацію матеріалу методом геометричного аналізу ізотерм сорбції $W(\varphi)$ та деформації $\varepsilon(\varphi)$ колоїдних капілярно-пористих матеріалів за один повний цикл сорбції-десорбції;
- досліджено залежності зміни залишкових деформацій в колоїдних капілярно-пористих тілах (ККПТ) у часі, які враховують необхідний температурно-вологісний режим музейних приміщень;
- запропоновано алгоритм регулювання температурно-вологісного режиму, що базується на узагальненому індексі дискомфорту, серед якого пріоритетним є локальний показник дискомфорту музейних експонатів;
- визначено аеродинамічні і теплові параметри неізотермічної струмини, які впливають на її розвиток при змішувальній вентиляції та змінних витратах повітря, що забезпечують необхідну циркуляцію повітряних потоків незалежно від глибини регулювання та нормативних кліматичних параметрів у визначених зонах приміщення;
- запропоновано критерії оцінки ефективності організації повітрообміну, що дозволяють обґрунтовано прийняти рішення при застосуванні інженерних систем забезпечення нормованих параметрів повітряного середовища в окремих зонах та у всьому музейному приміщенні.

Удосконалено:

- кінетичні та теплові характеристики повітряного потоку для розрахунку повітророзподільників з настиленням повітря на криволінійну поверхню, що

забезпечують ефективне затухання плоскої настільної струмини з покращеними показниками енергоефективності повітророзподілення;

- системи формування мікроклімату, що дозволило забезпечити оптимальні умови зберігання музейних експонатів;

- фізичну і математичну модель контактного апарату для застосування в спеціальних музейних приміщеннях з тепловологісною обробкою повітря, завдяки якій узагальнені аналітичні залежності тепломасообміну і гідродинаміки у водоповітряному шарі з блоком термоелектричних модулів.

Отримано подальший розвиток:

- застосування фрактального аналізу часових рядів, за допомогою якого сформульовані критерії вибору оптимальних режимів зберігання музейних колекцій.

Практичне значення одержаних результатів.

Створено новий підхід при розробці систем формування мікроклімату музеїв різного призначення на основі розроблених критеріїв ефективності забезпечення повітряного середовища, як в цілому по приміщеннях так і в окремих зонах. Розроблено принципово нові конструкції припливних пристроїв системи повітророзподілу зі змінною витратою (охоронні документи України № 73805, № 91617, № 92261, № 96625, № 112405, № 120507), а також конструкцію енергоефективного контактного апарату для тепловологісної обробки повітря музейних приміщень спеціального призначення (охоронні документи України № 101290, № 106579). Запропонована методика вибору режимів роботи повітророзподільника зі змінним типом струминних течій при кількісному регулюванні систем кондиціонування повітря. Запропоновано алгоритм прогнозування процесів старіння музейних колекцій та, при необхідності, корегування температурно-вологісного режиму умов зберігання. Наукова робота має і соціальні наслідки, оскільки сприяє покращенню умов зберігання музейних колекцій, комфорту відвідувачів та збереженню будівлі.

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи, на базі яких виконувалося проектування систем формування мікроклімату музейних приміщень, впроваджено в Національному художньому музеї України (м. Київ), Національному науково-дослідному реставраційному центрі України (м. Київ), ТОВ «Стандартпарк Захід» (м. Львів), а також у навчальний процес КНУБА.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі теоретичні результати по обґрунтуванню енергоефективних технологій формування температурно-вологісного режиму отримано здобувачем самостійно. Автором здійснено аналіз стану науково-технічної проблеми; розроблено фізико-математичну модель тепломасообмінних процесів у полімерних тілах з урахуванням напруження і деформації при змінних параметрах повітряного середовища; отримані критерії ефективності забезпечення стану повітряного середовища в залах музеїв; запропоновано метод визначення впливу аеродинамічних і теплових параметрів струмини на глибину регулювання системи повітророзподілу; удосконалено теоретичні розрахунки кінематичних і теплових параметрів струмини при змінних тепловологісних режимах; розроблено конструкції повітророзподільних пристроїв зі змінним типом струмин; розроблено метод вибору режимів роботи

повітророзподільних пристроїв при змінній витраті повітря; розроблено методологію створення енергоефективних апаратів тепловологісної обробки повітря для музейних приміщень спеціального призначення; розроблено метод оцінки і прогнозу умов зберігання музейних колекцій на основі фрактального аналізу.

Конструктивний внесок автора дисертації в кожную наукову працю, яку опубліковано зі співавторами, наведено на стор. 32...37.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на наступних конференціях: на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2004 – 2007), міжнародній науково-практичній конференції «Геометричне і комп'ютерне моделювання, енергозбереження, екологія, дизайн» (м. Новий світ, 2004); State of Art, Trends of Development and Challenges in Civil Engineering: Book of Abstracts: 10th Scientific Conference Rzeszov-Lviv-Kosice (Kosice 2005); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми збереження, консервації та експертизи музейних пам'яток» (м. Київ, 2005); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Збереження, дослідження, консервація, реставрація та експертиза музейних пам'яток» (м. Київ, 2008); Міжнародній науково-практичній конференції «Енергоінтеграція», (м. Київ, 2013, 2014, 2016, 2017, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції «Наукова реставрація. Історія, сучасність, шляхи модернізації» (м. Київ, 2018); 12 міжнародній науково-технічній конференції «Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym» (м. Ченстохова, м. Нові Сонч, Польща 2015); 5th International Scientific Conference moNGeometrija 2016: Serbia, Belgrade, June 23–26: Proceedings (Belgrade, 2016); The 4th International Technical Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2016): (Hong Kong, 2016); Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym.-Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. (Częstochowa, 2016); Міжнародній науково-технічній конференції «ЕкоКомфорт» Національного університету «Львівська політехніка» 2016; 1 міжнародній азербайджансько-українській конференції «Building Innovations – 2018» (м. Баку); I International Scientific and Practical Conference «Technology, Engineering and Science – 2018» (London, 2018); Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія і практика формування мікроклімату та енергопостачання будівель і споруд» (м. Київ, 2019).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 40 друкованих праць, зокрема: 1 монографія, 28 – у фахових виданнях України; 6 – у наукометричних базах даних, отримано 1 патент України на корисну модель та 5 патентів на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу та шести розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел із 295 найменувань, додатків, викладених на 384 сторінках машинописного тексту, у тому числі 309 сторінок основного тексту, 127 рисунків, 20 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито зміст і стан наукової проблеми, обґрунтовано її теоретичну та прикладну значимість, сформульовано мету та задачі дослідження, його наукову

новизну та практичну цінність одержаних результатів.

У першому розділі сформульована значимість проблеми, що розкриває принципи і сучасні підходи з науковим поглибленням подальшого розвитку створення енергоефективних систем вентиляції та кондиціонування повітря для забезпечення необхідних режимів температури, відносної вологості та швидкості повітря у музейних приміщеннях. Комплексний аналіз формування мікроклімату показав, що до традиційних поглядів забезпечення температурно-вологісних режимів в різних зонах приміщення музеїв необхідно додатково врахувати: склад і значимість колекції; архітектурно-планувальні рішення внутрішнього простору, будівельно-конструктивні форми та їх теплофізичні властивості, кліматичні умови розташування будівлі, характерну динаміку відвідування. Вивчення багаторічного досвіду натурних досліджень мікроклімату музеїв різного призначення показав, що в залежності від обладнання інженерними системами та режиму відвідування температура повітря в приміщеннях протягом року змінювалась від 10°C до 32°C , вологовміст від 80% до 25%, добове коливання температури в приміщеннях стрибкоподібне і досягає 7°C - 10°C , швидкість повітря біля експонатів до 0,35 м/с, що не відповідають сучасним вимогам. Немає обґрунтованого пояснення існуючих в літературі стандартів ASHRAE і Європейських норм, в яких рекомендації по організації повітрообміну не охоплюють різноманіття схем подачі і видалення повітря з приміщення. За такими методиками неможливо визначити ефективність системи повітророзподілу, значення якого є важливим показником при розробці систем формування мікроклімату. Це дає підстави для подальшого поглиблення досліджень аеродинамічних процесів при роботі системи вентиляції у стаціонарному і змінному режимах.

Виконано термодинамічний аналіз структурних змін та умов зв'язку в капілярно-пористих тілах при тепломасопереносних процесах, що базуються, за теорією П. Ребіндера, на «енергії зв'язку» вологовмісту в капілярних структурах. Цей показник свідчить про дифузійний перенос, куди входить макромолекулярна і капілярна дифузія. За наявності неізотермічних умов при тепломасопереносі виникає усадочне напруження спрямоване на деформацію полімерних матеріалів. Систематизовано і обґрунтовано вплив взаємозв'язку термодинамічних, фізико-механічних, тепломасообмінних і деформаційних процесів в експонатах полімерної групи з навколишнім середовищем. Цей науковий етап прийнятий за базовий при подальшій розробці комфортних якостей музейних приміщень, принципів удосконалення і утворення енергоефективних систем забезпечення мікроклімату.

У другому розділі вдосконалені теоретичні дослідження тепломасообмінних і деформаційних процесів у полімерних дисперсних музейних експонатах при взаємодії їх з оточуючим повітряним середовищем. За суттю спрямування ці питання важливі для оптимізації вологісно-теплових процесів у колоїдних капілярно-пористих тілах (ККПТ) в умовах їх навантаження при часовій зміні температурно-вологісних режимів у приміщенні.

Особливість вирішення цієї теоретичної і практичної проблеми полягає у створенні фізико-математичної моделі, яка враховує механічні, термодинамічні, структурно-параметричні величини полімерних матеріалів та описується системою

диференційних рівнянь для аналізу тепломасообмінних і деформаційних процесів у їх взаємодії.

Механізм і кінетика поглинання вологи у загальному випадку включає процеси адсорбції, абсорбції, капілярної конденсації і супроводжується набуханням тіл, що особливо характерно для колоїдних капілярно-пористих матеріалів, до яких відноситься більшість музейних експозицій.

Одним із загальноновживаних методів дослідження механізму сорбції – є адсорбційний (метод ізотерм сорбції-десорбції), який дозволяє отримати характеристики адсорбента, диференційні вологообмінні властивості і термодинамічні параметри масопереносу в матеріалі.

Аналіз ізотерм адсорбції та деформації тканин різного волоконного класу й ниток на основі експериментальних робіт В.М. Казанського, Р.В. Луцика, Е.С. Малкіна показує, що всі вони за формою кривих подібні й мають вид, характерний для більшості ККПТ (рис. 1). Петлі гістерезису спостерігаються у всьому діапазоні відносної вологості середовища. Гістерезис при високих значеннях φ пояснюється впливом механізму капілярної конденсації парів (вологи) у мікропорах. Ширина петлі характеризує неоднорідність мікропор. Набухання руйнує структуру матеріалу в результаті розриву слабких зв'язків і відкриває молекулам сорбату шлях у раніше недоступні порожнини. При десорбції деформація структури не є повністю зворотною і деякі молекули води виявляються замкненими у порах. Отже, для окремих видів волокон, навіть після тривалого зволоження, ізотерма сорбції частково незворотна.

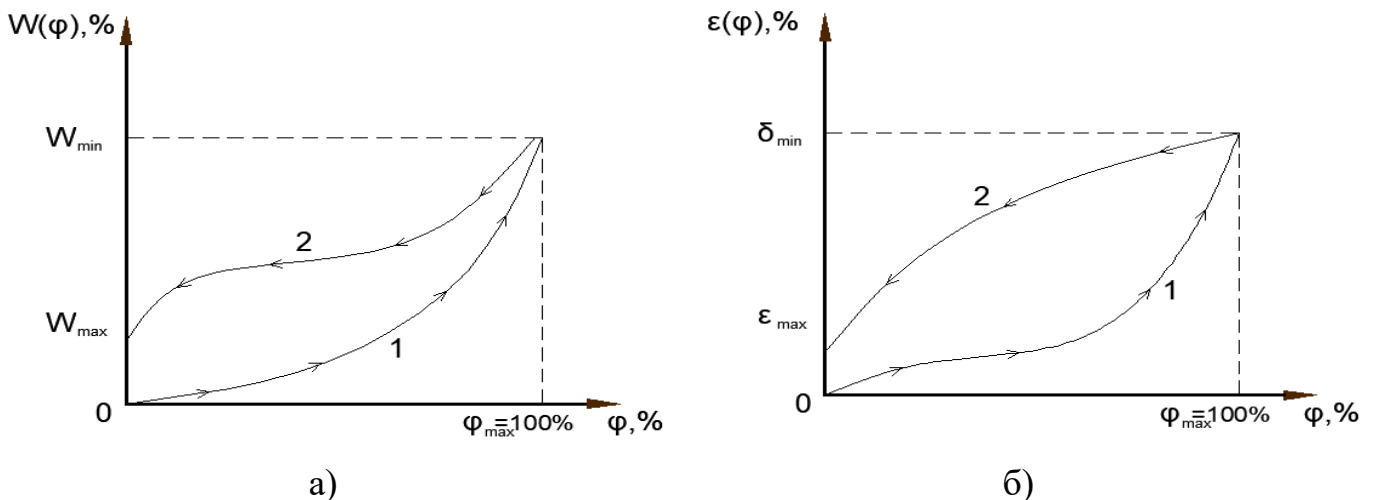


Рис. 1 – Схема ізотерми: а) сорбції $W(\varphi)$ текстильних матеріалів; б) деформації $\varepsilon(\varphi)$ текстильних матеріалів; 1 – процес сорбції; 2 – процес десорбції

Згідно методів математичного аналізу площа, що обмежена гістерезисною кривою обчислюється:

$$S_W = \int_0^{\varphi_{max}} [W_2(\varphi) - W_1(\varphi)] d\varphi, \quad S_\varepsilon = \int_0^{\varphi_{max}} [\varepsilon_2(\varphi) - \varepsilon_1(\varphi)] d\varphi. \quad (1)$$

Геометричний зміст S_W і S_ε наступний: величина S_W визначає вологовміст, а S_ε деформацію матеріалу, що в процесах сорбції-десорбції залишились у матеріалі після закінчення одного циклу. Довжина кривих, що описує гістерезис, визначається:

$$L_w = \int_0^{\varphi_{max}} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{dW_1(\varphi)}{d\varphi}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dW_2(\varphi)}{d\varphi}\right)^2} \right\} d\varphi, \quad (2)$$

$$L_\varepsilon = \int_0^{\varphi_{max}} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{d\varepsilon_1(\varphi)}{d\varphi}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{d\varepsilon_2(\varphi)}{d\varphi}\right)^2} \right\} d\varphi.$$

За умови, коли квадрат виразу, що стоїть під знаком радикала, значно більше 1, тобто: $(dW_i(\varphi)/d\varphi) \gg 1$, $(d\varepsilon_i(\varphi)/d\varphi) \gg 1$, $i = (1,2)$, маємо:

$$L_w \approx \int_0^{\varphi_{max}} \left\{ \frac{dW_1(\varphi)}{d\varphi} + \frac{dW_2(\varphi)}{d\varphi} \right\} d\varphi; L_\varepsilon \approx \int_0^{\varphi_{max}} \left\{ \frac{d\varepsilon_1(\varphi)}{d\varphi} + \frac{d\varepsilon_2(\varphi)}{d\varphi} \right\} d\varphi. \quad (3)$$

Геометричний зміст виразів L_w і L_ε визначає за відносною вологістю φ сумарну швидкість процесів сорбції-десорбції W та деформації ε . Для наведених величин W та ε застосуємо наступні залежності:

$$\left(\frac{dW}{d\varphi}\right)_\varphi = \frac{L_w}{\varphi_{max}}; \left(\frac{d\varepsilon}{d\varphi}\right)_\varphi = \frac{L_\varepsilon}{\varphi_{max}}. \quad (4)$$

Виконаний аналіз показує, що механізм поглинання вологи у волокнистих музейних матеріалах пояснюється наступними етапами: зв'язування молекул вологи активними центрами макромолекул ($0 < \varphi < 0,2$); проникнення молекул вологи в міжмолекулярний простір ККПТ, що характеризується набуханням волокон ($0,2 < \varphi < 0,8$); капілярною конденсацією вологи в порах волокон ($0,8 < \varphi < 1$). Для визначення фізико-математичних закономірностей тепломасообмінних процесів в ККПТ з врахуванням напруження і деформації, механічні властивості яких не залежать від часу, застосуємо рівняння Больцмана-Вольтерра (БВ):

$$\begin{cases} \sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) - E \cdot \int_0^t R(t-\tau) \cdot \varepsilon(\tau) d\tau; \\ \varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \cdot \int_0^t K(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) d\tau, \end{cases} \quad (5)$$

де $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ – напруження та деформація у матеріалі в моменті спостереження t для одновісного напруженого стану; τ – момент часу, який передумовлює моменту спостереження t ; E – модуль пружності; $K(t-\tau)$, $R(t-\tau)$ – функції впливу (відповідно, ядра повзучості і релаксації).

Для базових рівнянь (5) використовуємо залежності ядер $R(t, \tau)$ та $K(t, \tau)$ у вигляді:

$$R(t, \tau) = \eta(\tau) \cdot \exp \left\{ - \int_\tau^t [L(\theta) + \eta(\theta)] d\theta \right\}, \quad (6)$$

$$K(t, \tau) = \eta(\tau) \cdot \exp \left\{ - \int_\tau^t L(\theta) d\theta \right\}. \quad (7)$$

Отже, рівняння БВ з врахуванням залежностей (6), (7) перетворюється до вигляду:

$$\varepsilon_t \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) \right\} = \frac{\sigma(t)}{E} \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) + \eta(t) \right\}, \quad (8)$$

$$\varepsilon(t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E}. \quad (9)$$

Виконаний етап аналітичних досліджень механічних закономірностей для ККПТ дозволяє визначити зміни у часі напруження, деформації, ядра повзучості і релаксації в залежності від вологісних і температурних параметрів повітряного середовища.

Для узагальненої системи диференціальних рівнянь тепломасообмінних і деформаційних процесів розглянемо основні термодинамічні співвідношення у дисперсних тілах при їх висушуванні. Загальна кількість теплоти δQ , що надійшла до дисперсного тіла визначається:

$$\delta Q = dU + \delta A - \mu dm, \quad (10)$$

де dU – зміна внутрішньої енергії тіла за час dt ; δA – механічна робота за час dt (оскільки розглядається ізотермічний процес $\delta A = 0$); μ – питомий хімічний потенціал речовини; dm – маса вологи, що випаровується із матеріалу за час dt .

Зміни внутрішньої енергії в матеріалі dU обумовлені трьома факторами:

а) зміною температури $C_\varepsilon(t)dT$; б) усадкою матеріалу (прихованим розтягом) $V \cdot \sigma \cdot d\varepsilon$; в) дисипацією енергії внаслідок релаксації напружень $V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot d\delta$.

Отже, рівняння зміни внутрішньої енергії має вигляд:

$$dU = C_\varepsilon(t)dT + V \cdot \sigma \cdot d\varepsilon + V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot d\delta, \quad (11)$$

де dT – безрозмірний коефіцієнт дисипації, що відображає відповідні властивості матеріалу; V – об'єм тіла, м³.

У сучасній фізико-хімічній термодинаміці найбільшого розповсюдження набула класифікація, запропонована П.А. Ребіндером, в основі якої лежить термодинамічний критерій оцінки вологообмінних властивостей матеріалу у зв'язку з питомим хімічним потенціалом, що визначається формулою:

$$\mu = RT \cdot \ln(1/\varphi) - RT \cdot \ln(n_o) + \frac{2\alpha \cdot V_0}{\tilde{r}}, \quad (12)$$

де $\frac{2\alpha \cdot V_0}{\tilde{r}}$ – енергія зв'язку капілярної вологи, Дж/к-моль; α – локальний (на одиницю площі) коефіцієнт зовнішнього теплообміну капілярів, Дж/м²; \tilde{r} – радіус капілярів, м; V_0 – молярний об'єм, м³/к-моль.

Підставляючи вирази (11), (12) у залежність (10), отримаємо:

$$\begin{aligned} & C_\varepsilon(t) \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} + f(t) \cdot \Delta T = \\ & = \left\{ RT \cdot \ln(1/\varphi) - RT \cdot \ln(n_o) + \frac{2\alpha \cdot V_0}{r} \right\} \cdot \frac{dm}{dt} - V \cdot \sigma x \\ & \quad \times \frac{d}{dt} \left\{ \frac{l}{l_0(t)} \right\} - V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot \frac{d\sigma}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння (13) разом з (8), (9) складають вихідну систему рівнянь, що описують взаємно пов'язані процеси релаксації напружень у матеріалі при висушуванні та його тепломасообміні з навколишнім середовищем. Ця система дозволяє визначити будь-яку пару з трьох величин $\Delta T(f)$, $m(t)$, $\varepsilon(t)$ при заданій третій. Якщо додатково врахувати, що розтяг $\varepsilon(t)$ визначається зміною температури $T(t)$ та вологовмісту матеріалу, тоді замість трьох величин $\Delta T(f)$, $m(t)$, $\varepsilon(t)$ у рівняннях (8) й (9) виявляється тільки дві: $\Delta T(f)$, $m(t)$, котрі будуть вже однозначно

визначатися коефіцієнтними функціями рівнянь (8), (13) при початкових умовах (9). Система (8), (13) в принципі прийнятна для визначення параметрів, які опосередковано визначають фізичні величини, що важкодоступні для прямих вимірювань. Проведений аналіз наведених рівнянь дає підстави побудувати узагальнену систему взаємного впливу тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних матеріалах у вигляді:

$$\begin{aligned}
 & [C_\varepsilon(t) + \theta(t - t_y) \cdot \tilde{C}_1 \cdot V \cdot \sigma(t)] \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} + f(t) \cdot \Delta T(t) = \\
 & \left\{ RT \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{\varphi} \right) - \ln n_0 \right] + \frac{2\alpha \cdot V_0}{\tilde{r}} - \theta(t - t_y) \cdot \tilde{C}_2 \cdot V \cdot \sigma(t) \right\} \frac{dm}{dt} - \\
 & - V \cdot D(t) \cdot \left\{ \theta(t - t_y) \left[\tilde{C}_1 \cdot (T(t) - T(t_y)) + \tilde{C}_2 [m(t) - m(t_y)] \right] \right\} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt}; \\
 & \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) \right\} \left\{ \theta(t - t_y) \cdot \left[\tilde{C}_1 \cdot (T(t) - T(t_y)) + \tilde{C}_2 [m(t) - m(t_y)] \right] \right\} = \\
 & = \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) + \eta(t) \right\} \frac{\sigma(t)}{E}; \quad \eta(t) = \varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t); \\
 & L(t) = - \frac{d}{dt} \left\{ \ln \left[\frac{\varphi_1(t)}{\varphi_2(t_0)} \right] \right\}; \quad \varphi_1(t) = \xi_1 \cdot \exp[-\alpha_1 \cdot t]; \\
 & \varphi_2(t) = \xi_2 \cdot \exp[\alpha_1 \cdot t]; \quad \frac{\sigma(0)}{E} = \theta(t - t_y) \cdot \left\{ \tilde{C}_1 \cdot (T(t_0) - T(t_y)) + \right. \\
 & \quad \left. + \tilde{C}_2 (m(t_0) - m(t_y)) \right\}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Особливість наведеної системи диференціальних рівнянь полягає у введенні відносної вологості навколишнього середовища, що дозволяє максимально точно описати процеси тепломасообміну і деформації в музейних дисперсних матеріалах при їх зберіганні та експозиції. Порівняння експериментальних даних (Р. Луцик) по кінетиці сорбції (рис. 2) та залежності деформації від вологовмісту (рис. 3) з отриманими теоретичними залежностями для тканин різного волокнистого складу показує задовільне співпадіння.

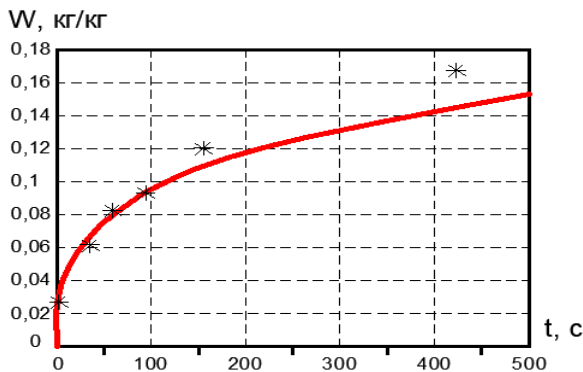


Рис. 2 – Порівняння експериментальних даних кінетики сорбції ниток з вовни з теоретичними залежностями

* - експериментальні дані;
 — - теоретична залежність

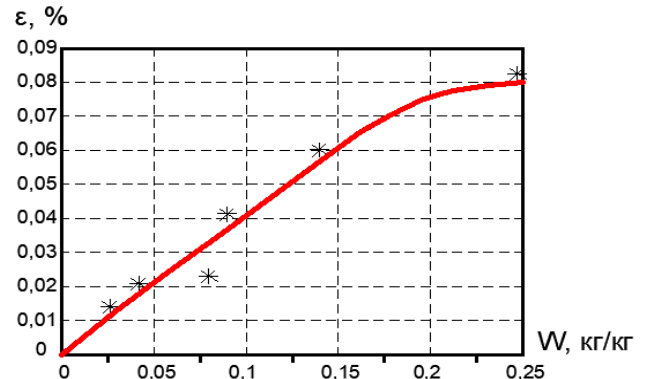


Рис. 3 – Порівняння експериментальних даних залежності деформації від вологовмісту для ниток фенілону $\varepsilon(W)$ з теоретичними залежностями процесу сорбції

* - експериментальні дані;
 — - теоретична залежність

У третьому розділі розроблено критерії ефективності забезпечення мікрокліматичних параметрів у музейних приміщеннях, опрацьовані питання систем керування температурно-вологісним режимом в них та контролю вологопереносу в матеріалах експонатів методом поглинання енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності.

В залежності від об'ємно-планувальних рішень будівлі, її декоративних елементів, побудови експозиції, вимог до температурно-вологісного режиму, виставкові зали за кількістю функціональних зон доцільно поділити на однозональні, двозональні та багатозональні. Від поділу на зони залежить: вибір схеми організації повітрообміну; метод регулювання та автоматичного контролю параметрів мікроклімату; тип повітророзподільних пристроїв; обладнання систем кондиціонування повітря (СКП).

Критерії ефективності забезпечення параметрів повітряного середовища в залах музеїв оцінюють стан повітря як у приміщенні в цілому, так і в зонах розміщення експонатів. Кожний параметр повітряного середовища X , який використовується при розрахунку повітрообміну (ентальпія, вологовміст, температура повітря, концентрація газу тощо), має свій нормативний діапазон, що відповідає оптимальним умовам для експонату. Нестачу /надлишок теплоти/ вологи ΔS_e , які необхідно подати/ видалити в музейне приміщення, визначають по найменшим затратам на підготовку припливного повітря в межах нормованих вимог («ощадливе» значення параметра):

$$\Delta S_e = G \Delta \bar{X}_s [(кг/год) \cdot (\text{розмірність } X)], \quad (15)$$

де G – витрата повітря [кг/год]; $\Delta \bar{X}_s = \bar{X}_s - X$ – ефективний потенціал припливного повітря за параметрами X , який є різницею між \bar{X}_s середньозваженим «ощадливим» параметром повітря приміщення та його значенням X у припливному повітрі.

У випадку, коли параметри повітря, що подається у різні зони приміщення, не співпадають, використовують загальний ефективний потенціал $Y_{G,e}$ припливного повітря, який дорівнює ефективному потенціалу припливного повітря $\Delta \bar{X}_s$ помножений на сумарну по зонам витрату припливного повітря:

$$Y_{G,e} = \sum_{j=1}^m G_{in,j} \Delta \bar{X}_s. \quad (16)$$

Використовуючи поняття ефективного залишку/ нестачі теплоти/ вологи ΔS_e у приміщенні, визначеного для «ощадливого» параметра повітря та загального ефективного потенціалу припливного повітря $Y_{G,e}$ критерій оцінки ε_v організації повітрообміну представимо у вигляді:

$$\varepsilon_v = \Delta S_e / Y_{G,e}. \quad (17)$$

Рівняння (17) показує співвідношення потреб у підтриманні нормованих значень повітряного середовища музейного приміщення (асиміляція надлишків або компенсація нестачі теплоти, зволоження або осушення повітря) та загальним ефективним потенціалом припливного повітря.

Для оцінки зональної ефективності повітрообміну використовуємо ті ж самі підходи, що і для оцінки повітрообміну для всього приміщення. Визначення

параметрів повітря, що надходить в зону розміщення музейних експонатів, є найбільш складним питанням. Загальний ефективний потенціал $Y_{G,e,i}$ припливного повітря зони може бути визначено як добуток повітряного потенціалу $\Delta X_{in,e,j}$ на кількість припливного повітря $G_{in,j}$ мінус ефективний потенціал перетоку повітря $\Delta X_{outf,e,h}$ до інших зон зважений за витратою потоків $G_{outf,h}$:

$$Y_{G,e,i} = \sum_{g=1}^p \Delta G_{inf,g} \cdot \Delta X_{inf,e,g} - \sum_{h=1}^q G_{inf,g} \Delta X_{outf,e,h}, \quad (18)$$

де p – кількість потоків повітря, що надходять до зони; q – кількість потоків, що видаляються до інших зон.

Аналогічно рівнянню (17), зональна ефективність організації повітрообміну визначається за залежністю:

$$\varepsilon_{\Delta S,i} = \Delta S_{e,i} / Y_{G,e,i}. \quad (19)$$

Рівняння (19) показує співвідношення між вимогами зони та потенціалами, що постачаються.

Отримані критерії ефективності організації повітрообміну, з урахуванням інших факторів, можуть бути застосовані, насамперед, в інтелектуальних системах управління мікрокліматом, що особливо актуально для музеїв.

Оцінити ефективність функціонування таких систем керування СКП можливо за сукупністю параметрів, що визначають комфорт повітряного середовища для музейних експонатів, відвідувачів та будівлі музею. Для розрахунку комфортних умов в музеях доцільно застосувати узагальнений індекс дискомфорту $D_{узг}$, який враховує три локальні складові: параметри повітря в зоні музейного експонату – D_1^* ; комфорту відвідувачів – D_n ; приміщення музею – D_n^* .

Отже, можна стверджувати, що:

$$D_{узг} = D_n \cap D_n^* \cap D_1^*. \quad (20)$$

Кожний з індексів дискомфорту D_n , D_n^* й D_1^* є локальним критерієм і повинен мати свій пріоритет, який визначається шляхом рішення рівнянь, що описують взаємний вплив тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних системах, надходження теплоти та вологи у приміщення та ефективну роботу СКП.

При завданні локальних критеріїв дискомфорту визначають основні характеристики пріоритету: ряд пріоритету \mathcal{J} -впорядкована множина індексів локальних критеріїв ($\mathcal{J} = 1,2,3$), яка показує якісні відношення домінування критеріїв; вектор пріоритету $V = (V_1, V_2, V_3)$ – визначає у скільки разів критерій D_q важливіший за критерій D_{q+1} , будь яка компонента V_q вектора пріоритету V сукупності локальних пріоритетів, що впорядкована в сенсі пріоритету \mathcal{J} , задовольняє співвідношенню $V_q \geq 1, q \in (\overline{1,3})$; ваговий вектор $\tilde{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ – трьохвимірний вектор, компоненти якого пов'язані співвідношенням $0 \leq \lambda_q \leq 1, q \in (\overline{1,3}), \sum_{q=1}^3 \lambda_q = 1$. Компоненти λ_q вектора $\tilde{\lambda}$ – вагові коефіцієнти, які визначають відносну перевагу q -го критерію над іншими, знаходимо за залежністю:

$$\lambda_q = \left(\prod_{i=q}^K V_i \right) / \left(\sum_{q=1}^3 \prod_{i=q}^3 V_i \right), q \in (\overline{1,3}). \quad (21)$$

Наприклад, згідно з експертними оцінками: ряд пріоритету – $D_1 = D_1^*$, $D_2 = D_H$, $D_3 = D_P$; компоненти вектору пріоритету – $V_1 = 4$, $V_2 = 2$, $V_3 = 1$. На базі значень J та V розраховують компоненти вагового вектора $\lambda_1 = 0,727$, $\lambda_2 = 0,182$, $\lambda_3 = 0,091$ та отримують формулу $D_{узаг}$:

$$D_{узаг} = \lambda_1 D_1 + \lambda_2 D_2 + \lambda_3 D_3 = 0,727 D_1^* + 0,182 D_P + 0,091 D_H^*. \quad (22)$$

Для $D_{узаг}$ складають таблицю індексів дискомфорту, на основі якої формують блок правил для СКП, ефективності її функціонування й узгодження цього функціонування з логічною системою обробки інформації.

Одним з основних параметрів, що визначає умови оптимального зберігання музейної колекції є вологовміст матеріалу експоната. При контролі вологопереносу в матеріалі предметів музейного зберігання необхідно забезпечити безконтактність та безперервність вимірювань. Найбільш придатним для такого контролю є метод поглинання енергії електромагнітних хвиль (НВЧ – надвисоких частот і НЗВЧ – надзвичайно-високих частот) нетеплової інтенсивності, що не руйнує дисперсний матеріал. Вологовміст в експозиційних матеріалах визначається по стабілізації поглинання НВЧ/НЗВЧ енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності. Такий підхід дозволяє забезпечити оперативність вимірювання, неруйнівний контроль та високу чутливість до змін вологовмісту.

У четвертому розділі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень енергоефективних технологій організації повітророзподілу з інтенсивно затухаючими струминами. Узагальнено питання регулювання систем повітророзподілу з урахуванням енергії припливних струмин та зміни режимів теплонадходжень при формуванні параметрів повітряного середовища в музейних приміщеннях. Вивчено поточкорозподілення при вентиляції анфілади залів музеїв різного призначення. Проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, що дозволило науково обґрунтувати енергоефективні схеми організації повітрообміну. Забезпечення необхідних мікрокліматичних параметрів в розрахункових зонах виставкових залів визначається умовами формування та розвитку припливних і теплових струмин. Ефективність повітрообміну з врахуванням енергії припливних струмин знаходимо за виразом:

$$\varepsilon_{in} = \frac{K_l \sum_{i=1}^n 0,5 \rho \bar{v}_i^2 (1 + Tu_{e,i}) V_i - E_+}{\sum_{j=1}^n G_{in,j} 0,5 \bar{v}_j^2 (1 + Tu_{e,i})}, \quad (23)$$

де \bar{v}_i – середнє значення швидкості в об'ємі зони, м/с; v_j – середня швидкість на виході з повітророзподільника, м/с; V_i – об'єм зони, м³; $Tu_{e,i}$ – енергетична інтенсивність турбулентності на виході з повітророзподільника; K_l – кратність зміни енергії за годину, 1/год; $G_{in,j}$ – повітрообмін, кг/год; E_+ – енергія від внутрішніх джерел, Дж/год.

Аналіз рівняння (23) показує, що ефективність повітрообміну в приміщеннях підвищується зі зменшенням швидкості випуску повітря з повітророзподільника \bar{v}_j .

Однією з особливостей об'ємно-планувальних рішень музеїв є приміщення, які сполучаються між собою, утворюючи анфіладу залів. В багатьох музеях при такому плануванні практикують періодичний природний повітрообмін (провітрювання), що не забезпечує потрібні мікрокліматичні параметри. Таким чином, організація переміщення потоків повітря, як між приміщеннями в межах будинку, так і в межах одного приміщення, з урахуванням аеродинамічної характеристики будівлі, її теплового режиму, є суттєвою практичною задачею. Для вирішення цієї задачі за основу було прийнято метод перепаду тиску в отворах, розроблений А.Я. Ткачуком. Подальший розвиток ця теорія знайшла в роботі автора. Перевагою методу є прямий зв'язок між наявними тисками вентиляційних потоків та перепадами тиску в отворах приміщення. Завдяки цим розробкам основні рівняння балансу повітрообміну піддаються математичному аналізу, в результаті якого витрати повітря через зв'язуючий отвір визначаються за виразом:

$$S_{зв}\sqrt{\Delta P_{зв}} = \sum_{i=1}^n S_i \sqrt{(P_{зв-i} - \Delta P_{зв})}. \quad (24)$$

де $S_i = \mu A \sqrt{2\rho}$ – комплексна величина, що враховує приведену площу отвору та густину повітря; μ – коефіцієнт витрати; A – площа отвору, м²; $\Delta P_{зв}$ – перепад тиску у зв'язуючому отворі, Па; $P_{зв-i}$ – наявний тиск між зв'язуючим отвором та отвором, що розглядається, Па.

Врахування роботи механічної вентиляції здійснюється шляхом введення в рівняння (24) незбалансованої кількості повітря $\pm \Delta G_{мех}$, що переміщує механічна вентиляція:

$$\left(\sum_{i=1}^n S_i \sqrt{\Delta P_i} \right)_{in} - \left(\sum_{j=1}^n S_j \sqrt{\Delta P_j} \right)_l \pm \Delta G_{мех} = 0. \quad (25)$$

Якщо в отворі перепад тисків змінюється від нуля до максимального значення ΔP_{max} (рис. 4, а), то витрата повітря G_{max} дорівнює:

$$G_{max} = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g\rho_1(\rho_1 - \rho_2)} \sqrt{H_0^3}, \quad (26)$$

де H_0 , b – відповідно висота і ширина отвору, м.

Відсутність рециркуляції повітря в суміжному отворі забезпечується при $G_{\partial} \geq G_{max}$.

Гранично допустиму висоту визначаємо за виразом:

$$H_0 \leq \sqrt[3]{2,25G^2/\mu^2 b^2 2g\rho_1(\rho_1 - \rho_2)}. \quad (27)$$

При розрахункових аеродинамічних схемах з отворами, які частиною свого перерізу працюють на приплив, а частково на видалення (рис.4,в) $G_{\partial} < G_{max}$, відношення витрати повітря через його нижню частину G_{in} до витрати повітря через верхню частину G_l , дорівнює:

$$\frac{G_{in}}{G_l} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \sqrt{\left(\frac{h_{in}}{h_l}\right)^3}. \quad (28)$$

Кількість повітря, при інших рівних умовах, визначається висотою даного отвору. Отримані залежності руху повітряних потоків наведені для прямокутних отворів шириною b і висотою H .

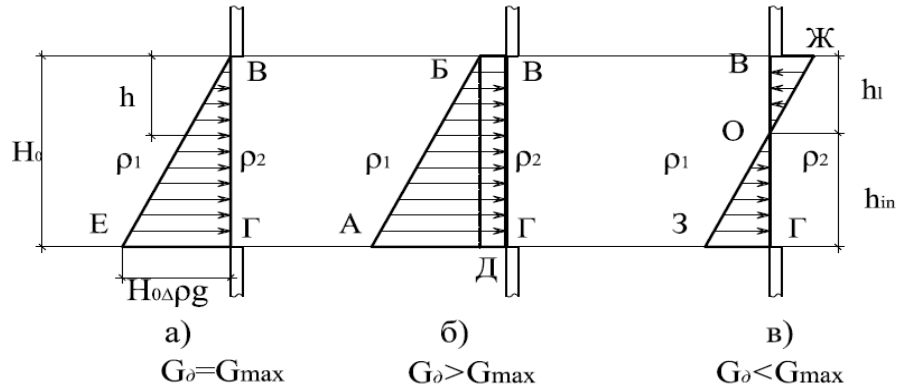


Рис. 4 – Розподіл тисків в області отвору, що сполучає суміжні приміщення

Якщо в музеях між суміжними приміщеннями застосовується отвір у формі арки, кривизна якої описується рівнянням еліпсу, тоді при $h_2/v = 0,25 \dots 0,5$, що найчастіше зустрічається на практиці, витрата повітря зменшується в межах 4...8% у порівнянні з отворами прямокутної форми (рис. 5). При вентиляції анфілади залів рівняння (24) доповнюється перепадами тиску в суміжних отворах ΔP_i :

$$\Delta P_{ЗВ} = \sum_{i=1}^n (P_{(ЗВ-i)} \pm \Delta P_{I,i} - \Delta P_{ЗВ}). \quad (29)$$

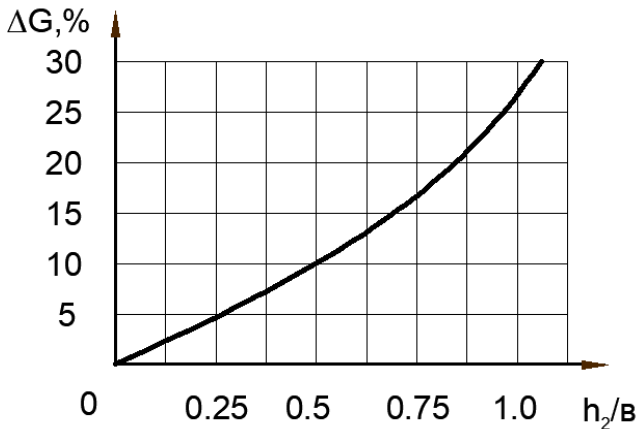


Рис. 5 – Залежності витрати повітря через отвір від кривизни арки

Недостаючі рівняння розподілу наявних тисків у вентиляційних схемах приміщень, які сполучаються між собою, компенсуються рівняннями повітряних балансів для кожного з приміщень і балансу повітрообміну в цілому по будівлі, а також тепловими балансами аналогічно. Виконані дослідження показали, що більшість музейних приміщень потребують застосування повітророзподільних пристроїв, які забезпечують високу інтенсивність

затухання струмини, нормовані значення температури, відносної вологості та швидкості в зонах розміщення музейних експонатів при мінімальній витраті припливного повітря. Таким вимогам відповідають повітророзподільники з принципово новими кінематичними і тепловими характеристиками, що створюють струмину, яка спрямована на криволінійну поверхню (рис. б), що регулюється в широкому діапазоні в залежності від кривизни поверхні, кількості випусків та геометричних розмірів.

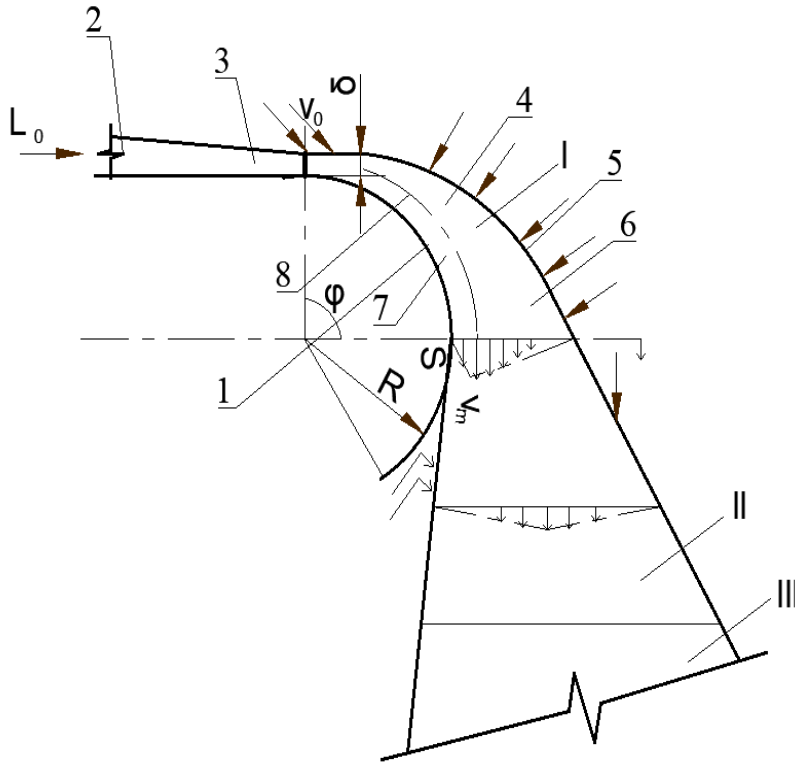


Рис. 6 – Схема витікання плоскої струмини на криволінійну поверхню:

I – зона настилання на криволінійну поверхню; II – зона формування струмини, після відриву від поверхні; зона III – основна ділянка струмини. Позначення ділянки настилання:

- 1 – криволінійна поверхня настилання; 2 – плоска щілина;
- 3 – вихідний канал;
- 4 – струмина; 5 – вільна межа струмини; 6 – струминний примежовий шар;
- 7 – пристінний примежовий;
- 8 – лінія максимальних швидкостей

Визначення параметрів наведеної струмини виконано на підставі рівнянь балансу маси, теплоти та рівняння кількості руху:

$$\int_0^{y_{\text{меж}}} \rho u dy - \int_0^{y_{\text{меж},0}} \rho u dy = \int_0^{\varphi} \rho v (R + y_{\text{меж}}) d\varphi, \quad (30)$$

$$c_p \rho_0 \delta (T_0 - T_\infty) = \int_0^{y_{\text{меж}}} c_p (T - T_\infty) \rho u dy, \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & \Delta P_{c_1 c_1} y_{\text{меж},0} - \Delta P_{c_1 c} y_{\text{меж}} \cos \varphi + R \int_0^{\varphi} \Delta P_{c_1 n} \sin \varphi d\varphi - \\ & - g \sin j \int_0^{\varphi} \rho_m y_{\text{меж}}^2 K_{\rho, j} d\varphi = \cos \varphi \int_0^{y_{\text{меж}}} \rho u^2 y dy \Big|_{\varphi} - \int_0^{y_{\text{меж},0}} \rho u^2 y dy \Big|_{\varphi=0}, \end{aligned} \quad (32)$$

де u, u_0 – відповідно швидкість повітря в довільній точці струмини та початкова швидкість, м/с; v – швидкість підтікання повітря до струмини, м/с; $\rho, \rho_0, \rho_\infty, \rho_m$ – відповідно густина повітря в довільній точці, на витіканні, навколишнього повітря на лінії максимальних швидкостей, кг/м³; $y, y_{\text{меж}}, y_{\text{меж},0}$ – відповідно, відстань від точки струмини до поверхні настилання, ширина струмини та початкова ширина струмини, м; R – радіус поверхні настилання, м; δ – ширина щілини, м; φ – кут між щілиною та перерізом; j – кут нахилу повітродозподільника; T_0, T_∞, T – відповідно абсолютна температура припливного повітря, навколишнього повітря та повітря в точці струмини, К; $\Delta P_{c_1 c_1}, \Delta P_{c_1 c}, \Delta P_{c_1 n}$ – відповідно середній статичний тиск у початковому перерізі струмини, у довільному перерізі струмини та статичний тиск

на поверхні настилання, Па; $K_{\rho,j}$ – коефіцієнт усереднення густини повітря; c_p – теплоємність повітря, кДж/(кг⁰С).

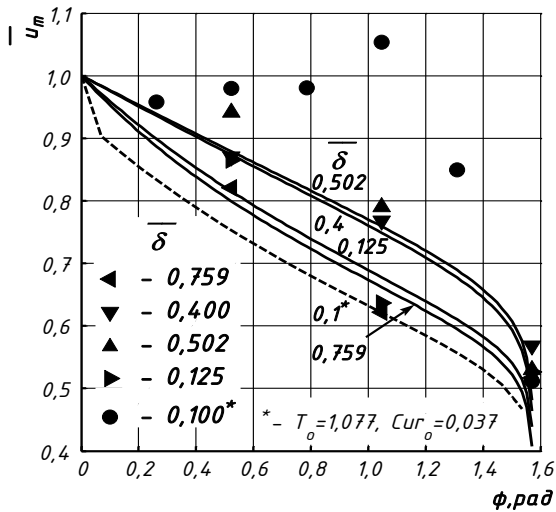
Розв’язання рівнянь (30...32) показує, що розвиток струмини на ділянці настилання на криволінійну поверхню призводить до затухання швидкості вдвічі, зменшення перепаду температур – до 0,6 початкового.

Принцип швидко затухаючих струмин був покладений в основу розробок повітророзподільників нового класу. Вирішення цієї задачі вимагало дослідження впливу на параметри струминних течій співвідношення геометричних розмірів і форм елементів повітророзподільників.

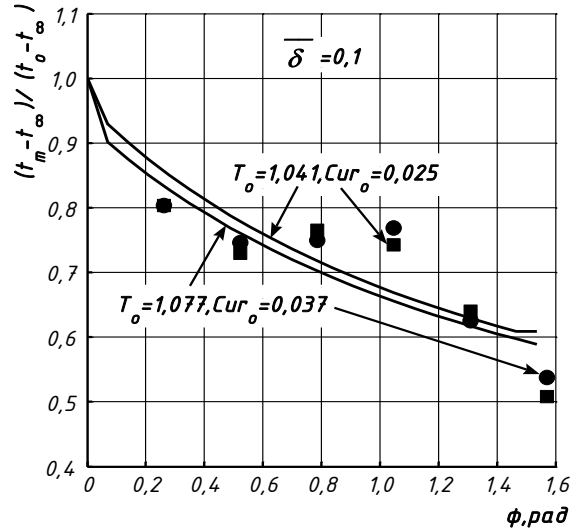
Узагальнення аналітичних і експериментальних досліджень розроблених конструкцій однощільних повітророзподільників з плоским вихідним каналом та інтенсивним затуханням струмини наведено на рис. 7.

Інтенсифікація затухання струмини багатоканального повітророзподільника здійснюється за рахунок симетричних тангенціальних випусків повітря на криволінійну поверхню при умові, що кожна наступна струмина створювала вдуг попередньої (рис. 8).

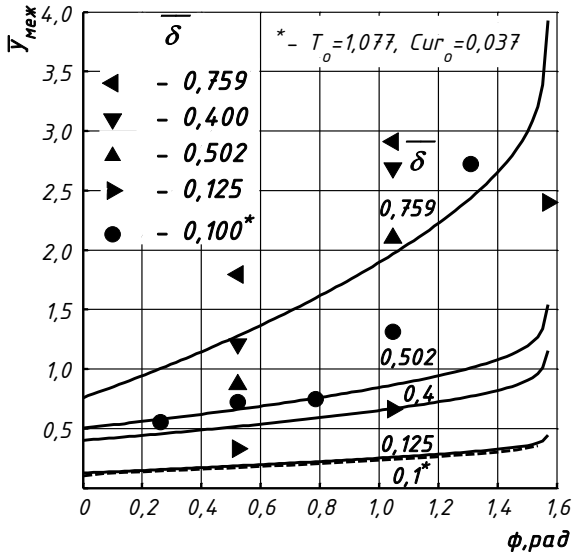
а)



б)



в)



$Cur_0 = g/(u^2/R)$ – початкове число криволінійної неізотермічності (відношення прискорень вільного падіння та доцентрового).

Рис. 7 – Результати узагальнених аналітичних та експериментальних досліджень настилання струмини на криволінійну поверхню: а – відносна швидкість; б – відносний перепад температур; в – відносна ширина струмини

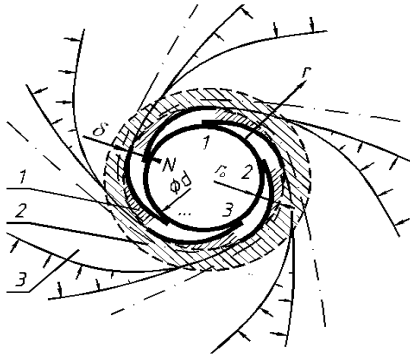


Рис. 8 – Принципова схема затухання струмини з тангенціальними випусками на криволінійну поверхню: 1 – початкова ділянка; 2 – ділянка взаємодії; 3 – ділянка розвитку.

Виконане фізичне та математичне моделювання визначило кількість випусків та оптимальну відстань між ними. При настиганні на криволінійну поверхню до точки відриву струмина проходить кут біля 90° . Таким чином, доцільно передбачати кількість випусків повітря у повітророзподільнику для забезпечення взаємодії струминок від 4 до 5. Для дослідження впливу геометричних розмірів повітророзподільних пристроїв (довжини l , ширини щілини δ , діаметра патрубку D) на параметри струмини було виконано фізичний експеримент. Експериментальні дослідження проводились на підставі ортогонального центрального композиційного плану.

Основними факторами, що впливають на параметри такої струмини є відношення довжини щілини l до діаметра D повітропроводу $\bar{l} = l/D$ ($\bar{l}_{max} = 6,283$; $\bar{l}_{min} = 0,775$), відношення ширини щілини δ до діаметра D повітропроводу - $\bar{\delta} = \delta/D$ ($\bar{\delta}_{min} = 0,103$; $\bar{\delta}_{max} = 0,2026$). Проведені дослідження дев'яти моделей повітророзподільників показали, що темп затухання параметрів струмини апроксимується квадратичними поліномами:

$$\bar{u} = \frac{u}{u_0} = A_u \bar{r}^2 + B_u \bar{r} + C_u; \Delta t = \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = A_t \bar{r}^2 + B_t \bar{r} + C_t, \quad (33)$$

де $A_u, B_u, C_u, A_t, B_t, C_t$ - регресивні коефіцієнти; $\bar{r} = r / \sum \delta$ – відносний радіус.

Узагальнення виконаних досліджень повітророзподільників (рис. 9) дозволяє отримати залежності, які визначають коефіцієнти зміни швидкості m та надлишкової температури n :

$$m = \frac{\bar{u}}{\sqrt{5\delta_0/\bar{r}}} = \frac{A_u \bar{r}^2 + B_u \bar{r} + C_u}{\sqrt{5\delta_0/\bar{r}}} = \frac{((A_u \bar{r} + B_u)\bar{r} + C_u)\sqrt{\bar{r}}}{\sqrt{5\delta_0}}, \quad (34)$$

$$n = \frac{\Delta t}{\sqrt{5\delta_0/\bar{r}}} = \frac{A_t \bar{r}^2 + B_t \bar{r} + C_t}{\sqrt{5\delta_0/\bar{r}}} = \frac{((A_t \bar{r} + B_t)\bar{r} + C_t)\sqrt{\bar{r}}}{\sqrt{5\delta_0}}. \quad (35)$$

Значення коефіцієнта затухання швидкості m та надлишкової температури n в залежності від відносної ширини щілини δ/d та відносної довжини щілини для виходу повітря l/d наведено на рис. 10.

Коефіцієнт місцевого опору повітророзподільника визначається залежністю:

$$\xi_{n.p.} = \frac{0,44 + 0,759 \bar{A}_{вих}^{2,238}}{\bar{A}_{вих}^{3,589}} + 1,051, \quad (36)$$

де $\bar{A}_{вих} = A_{вих}/A_{патр}$ – відносна площа виходу повітря.

Розбіжність значень втрат тиску, визначених по формулі (36) з дослідними даними не перевищує 3,5% (рис. 11).

Таким чином, виконані теоретичні і експериментальні дослідження дозволили визначити раціональні конструктивно-технологічні параметри та характеристики нового типу повітророзподільних пристроїв з настиленням струмини на криволінійну поверхню, на які отримано п'ять патентів України.

Особливість застосування витісняючої вентиляції в музеях потребує повітророзподільних пристроїв, що забезпечують рівномірну початкову швидкість сформованої струмини та регулювання витрати повітря без зміни її параметрів. Для отримання високих аеродинамічних характеристик розроблена та досліджена конструкція малошвидкісного панельно-секційного повітророзподільника (рис. 12).

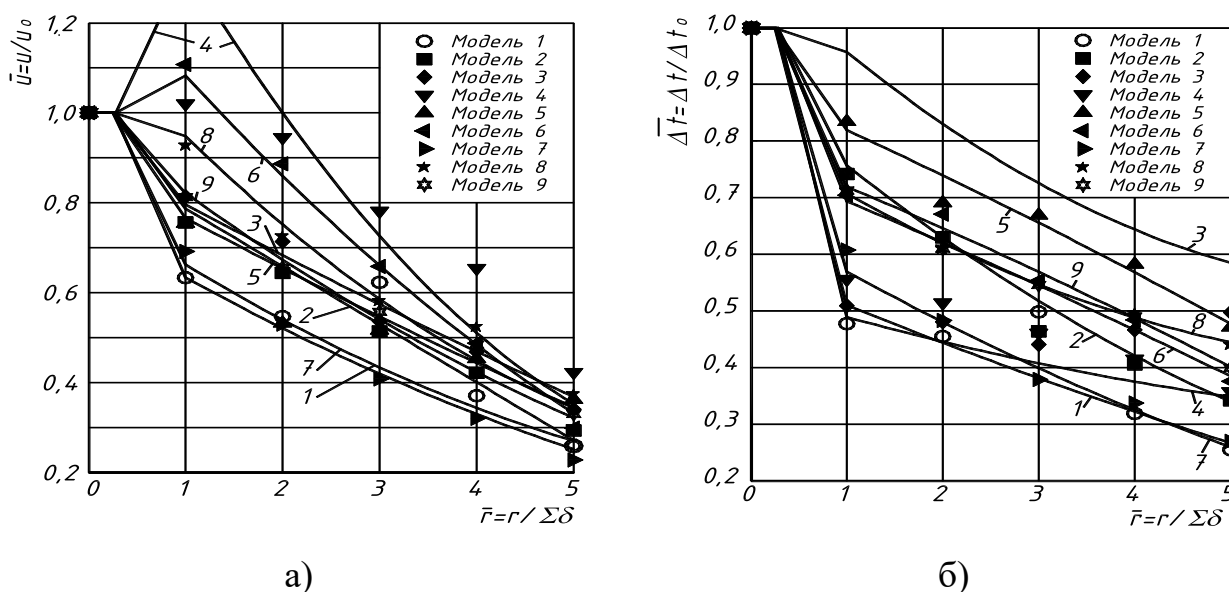


Рис. 9 – Результати дослідження розвитку струмини різних моделей повітророзподільників:

а) – швидкості; б) – температури

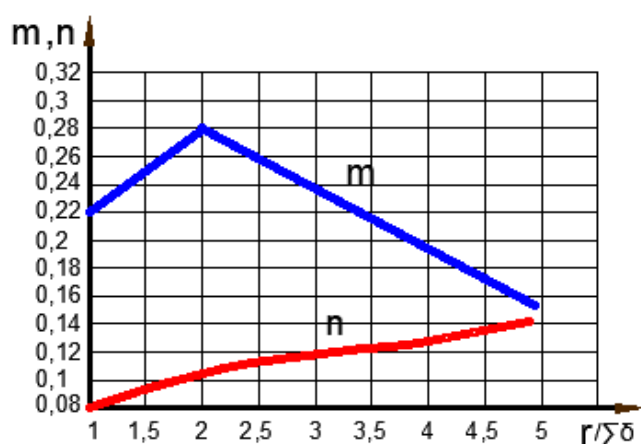


Рис. 10 – Значення коефіцієнтів m та n при $\delta/D = 0,2$; $l/D = 6$

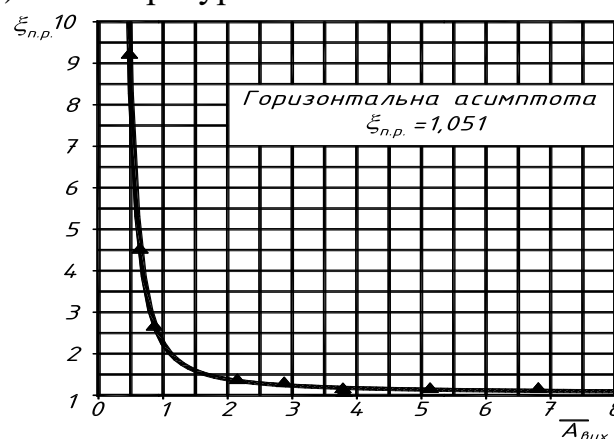


Рис. 11 – Узагальнення аналітичних та експериментальних досліджень втрат тиску в повітророзподільниках з тангенціальним випуском повітря на криволінійну поверхню

В результаті аналітичних та експериментальних досліджень малошвидкісного панельно-секційного повітророзподільника отримані раціональні розміри конструктивних елементів, просвіти відокремлювачів, епюри розподілу надлишкового статичного тиску за висотою у корпусі повітророзподільника, епюри відносних швидкостей та відносної різниці температур у перерізах струмини. Залежність (37) та графік (рис. 13) дозволяють визначити відносні розміри відокремлювачів потоку:

$$\frac{h_i}{h_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_{i-1}^*}{a_p} = \left(\frac{\alpha_i^*}{a_p} \right) / \sqrt{3,1 - (\alpha_i^*/a_p)(2,1 + 0,54(\alpha_i^*/a_p) \sqrt{1 - (\alpha_i^*/a_p)}}. \quad (37)$$

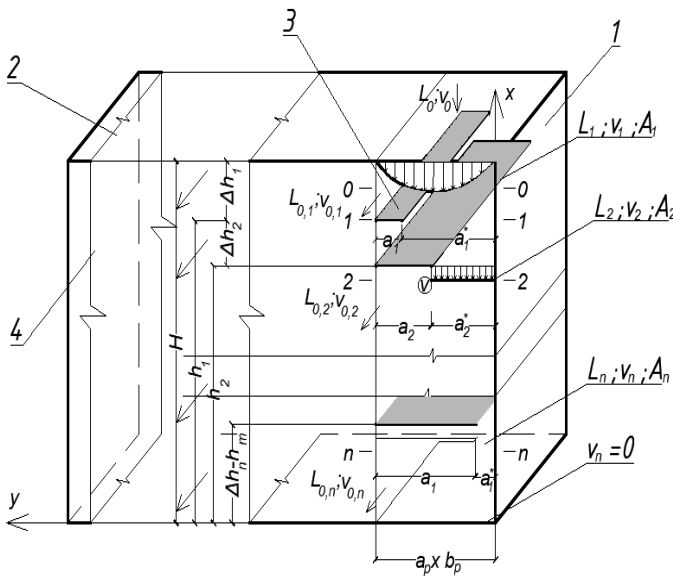


Рис. 12 – Розрахункова схема малошвидкісного панельно-секційного повітророзподільника:
 1 – розподільна камера з відокремлювачами потоку;
 2 – стабілізаційна камера;
 3 – відокремлювачі потоку;
 4 – зовнішня перфорована панель.

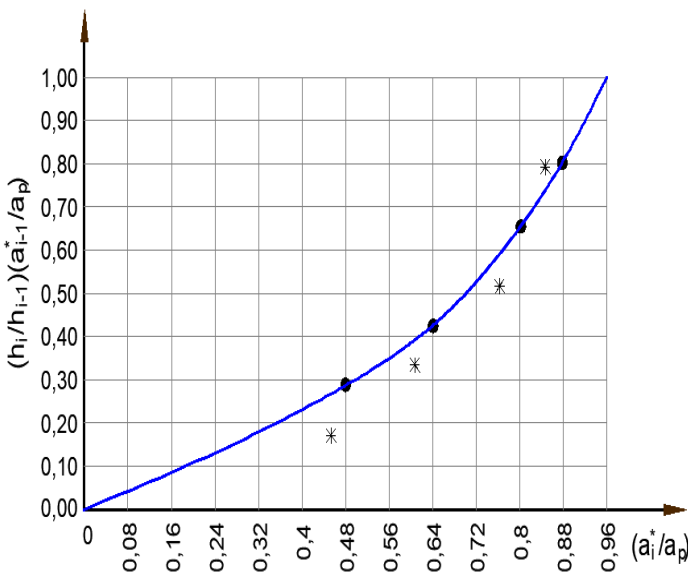


Рис. 13 – Визначення просвіту відокремлювачів потоку

Результати досліджень розподілу швидкості та надлишкової температури надані як безрозмірні ізотяхи
 $100(v/v_m) = 100; 70; 50; 30 \%$
 та відносні ізотерми
 $100 \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_{in}} \right) = 100; 70; 50; 30 \%$ у відносних координатах $\bar{z} = z/H$; $\bar{x} = x/H$; $\bar{y} = y/H$ (рис. 14).

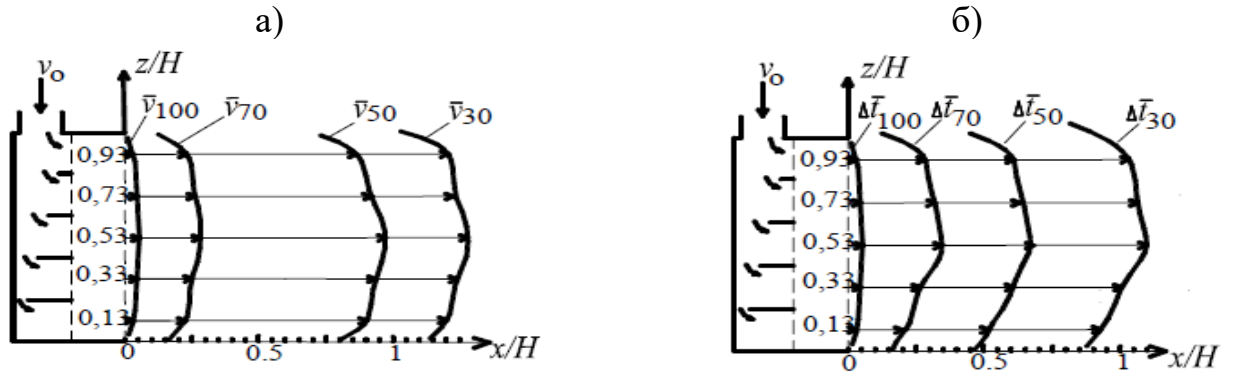


Рис. 14 – Відносні ізотахи: $\bar{v}_{30}, \bar{v}_{50}, \bar{v}_{70}, \bar{v}_{100}$ (а) і відносні надлишкові температури: $\Delta\bar{t}_{100}, \Delta\bar{t}_{70}, \Delta\bar{t}_{50}, \Delta\bar{t}_{30}$ (б) в межах рівнів $\bar{z} = 0,13 \dots 1,0$

Для розширення області застосування струминних течій, що витікають з перфорованої панелі, розглянемо їх взаємодію з плоскою струминою, яка спрямована до першої під кутом θ . Вважаємо, що струмини неізотермічні (рис. 15).

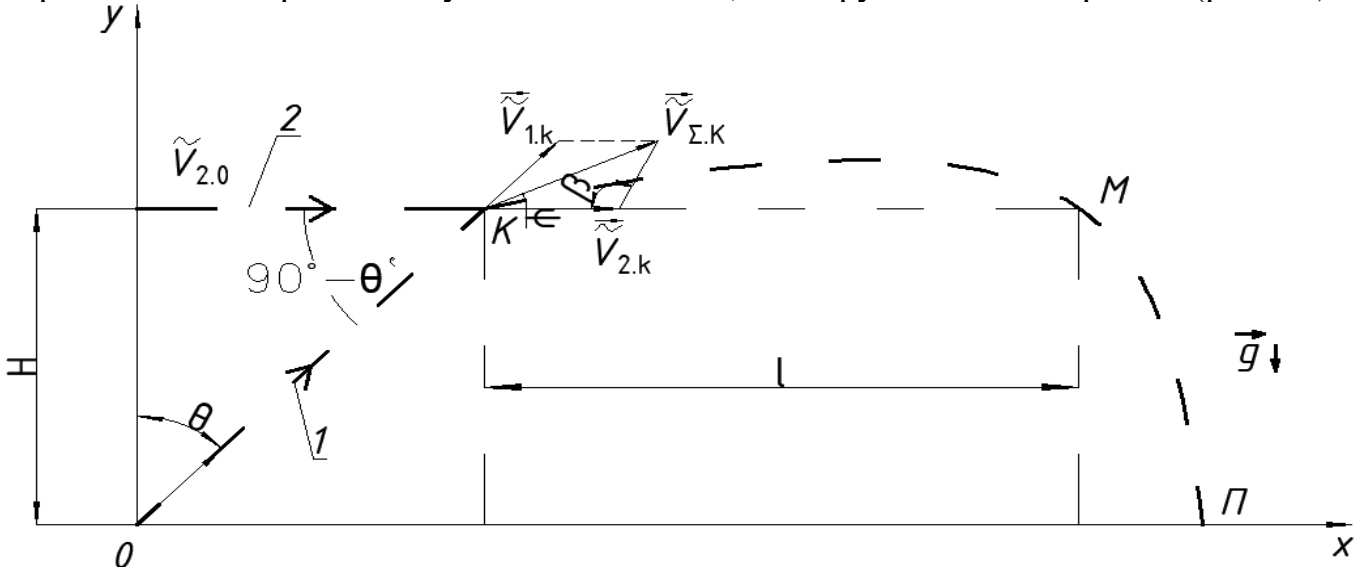


Рис. 15 – Розрахункова схема взаємодії двох неізотермічних повітряних потоків

Для визначення параметрів сумарного потоку повітря, який виникає при взаємодії двох неізотермічних струмин використовуємо закон збереження імпульсу і балансу енергії:

$$\gamma_1 \cdot \vec{v}_{1K} + \gamma_2 \cdot \vec{v}_{2K} = (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot \vec{v}_{\Sigma,K}; \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 \cdot \left\{ c_p \cdot T_{1,K} + \frac{1}{2} |\vec{v}_{1,K}|^2 \right\} + \gamma_2 \cdot \left\{ c_p \cdot T_{2,K} + \frac{1}{2} |\vec{v}_{2,K}|^2 \right\} \\ = \{ \gamma_1 + \gamma_2 \} \cdot \left\{ \frac{|\vec{v}_{\Sigma}|^2}{2} + c_p \cdot T_{\Sigma,K} \right\}, \end{aligned} \quad (39)$$

де $\gamma_1 = \rho_{1,K} |\vec{v}_{1,K}| S_{1,K}$, $\gamma_2 = \rho_{2,K} |\vec{v}_{2,K}| S_{2,K}$; $\vec{v}_{1,K}, \vec{v}_{2,K}, \vec{v}_{\Sigma,K}$ – середня швидкість потоку 1, потоку 2 і сумарного потоку в точці K , м/с; $S_{i,K}$ – площа поперечного перерізу потоку, m^2 ; $T_{1,K}, T_{2,K}, T_{\Sigma,K}$ – середня температура потоку 1, потоку 2 та сумарного потоку в точці K , $^{\circ}K$.

Вирішення рівнянь (38), (39) дозволяє отримати формули для визначення \vec{v}_{Σ} , $T_{\Sigma,K}$:

$$|\vec{v}_{\Sigma,K}| = \left\{ \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)^2} \cdot [\gamma_1 |\vec{v}_{1,K}| \cdot \sin \theta + \gamma_2 |\vec{v}_{2,K}|]^2 + \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)^2} \cdot [\gamma_1 |\vec{v}_{1,K}| \cdot \cos \theta]^2 \right\}^{0,5}; \quad (40)$$

$$T_{\Sigma,K} = \left[\gamma_1 \cdot \left\{ c_p \cdot T_{1,K} + \frac{1}{2} |\vec{v}_{1,K}|^2 \right\} + \gamma_2 \cdot \left\{ c_p \cdot T_{2,K} + \frac{1}{2} |\vec{v}_{2,K}|^2 \right\} - (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot \frac{|\vec{v}_{\Sigma}|^2}{2} \right] \cdot \frac{1}{c_p \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (41)$$

та відстань, яку проходить сумарний потік між точками K та M (рис. 15):

$$l = \sqrt[3]{v_{o,K}^2 m^2 A_{o,K} \sin 2\Psi / g}, \quad (42)$$

де $v_{o,K}$ – середня швидкість сумарного потоку в точці K , м/с (рис.15); $A_{o,K}$ – площа перерізу сумарної струмини в точці K , м².

Максимальна відстань, яку проходить струмина між точками K та M (l_{max}) досягається коли кут Ψ становить 45° . В точці M сумарний потік починає опускаться до підлоги за рахунок дії сил гравітації. Отримані залежності дозволяють визначити параметри сумарної струмини, які залежать від співвідношення імпульсів та температури потоків, що взаємодіють. Змінюючи параметри однієї або обох струмин можливо реагувати на зміну надходження теплоти та вологи у музейне приміщення та забезпечувати оптимальні умови повітряного середовища в зоні розміщення експоната.

Для застосування в системах змішувальної вентиляції музейних приміщень розроблено повітророзподільні пристрої з якісно новими властивостями, що дозволяють регулювати параметри припливного повітря змінюючи тип струмини (отримано два патенти України №120507, №92261). Конструкція розробленого повітророзподільника (рис. 16) дозволяє створювати струминні течії зі значеннями коефіцієнта m від 0,8 до 6,8 та коефіцієнта n від 0,65 до 4,8, забезпечуючи найбільшу енергоефективність організації повітрообміну в системах кондиціонування повітря зі змінною витратою повітря.

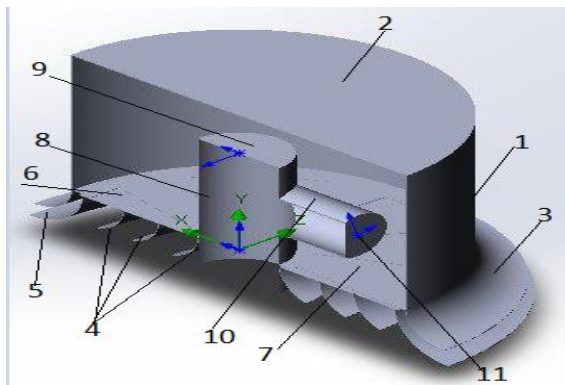


Рис. 16 – Конструкція повітророзподільника зі змінним типом припливної струмини:
 1 – корпус; 2, 3 – вхідний та вихідний патрубки; 4 – кільцева вставка; 5 – розсікаючі канали; 6 – регулюючий пристрій;
 7 – пластини з отворами;
 8 – циліндричний повітропровід;
 9, 11 – повітряні клапани; 10 – тангенціально приєднаний повітропровід

Для даного типу повітророзподільних пристроїв проведено аналіз впливу кінематичних, теплових характеристик припливної струмини та конструктивних

параметрів на глибину регулювання D витрати повітря. В результаті досліджень отримана залежність глибини регулювання (D) у вигляді:

$$D = \frac{G_{\text{пл.1}}}{G_{\text{max}}} = \left(\frac{n_1}{n}\right)^{0.5} \left(\frac{m}{m_1}\right) \left(\frac{A_{0,1}}{A_0}\right)^{0.75} \left(\frac{Ar_{x \text{ max}}^{\text{кр}}}{Ar_{x.1}^{\text{кр}}}\right)^{0.5}, \quad (43)$$

де $G_{\text{пл.1}}, G_{\text{max}}$ – плинна та максимальна розрахункова витрата, кг/год; n_1, n – коефіцієнт зміни осьової швидкості при новій аеродинамічній схемі та максимальному розрахунковому навантаженні; m, m_1 – коефіцієнт зміни осьової швидкості при новій аеродинамічній схемі та максимальному розрахунковому навантаженні; $A_{0,1}, A_0$ – характерна площа повітророзподільника при новій аеродинамічній схемі та максимальному розрахунковому навантаженні, м²; $Ar_{x.1}^{\text{кр}}, Ar_{x \text{ max}}^{\text{кр}}$ – критичний критерій Архімеда при новій аеродинамічній схемі та максимальному розрахунковому навантаженні.

Встановлено, що збільшення глибини регулювання (зменшення величини D) системи повітророзподілення відбувається при відповідному збільшенні коефіцієнта m_1 , критерія Архімеда $Ar_{x.1}^{\text{кр}}$ та зменшення коефіцієнта n_1 і площі повітророзподільника $A_{0,1}$ (рис. 17).

Для керування розроблених систем повітророзподілу пропонується метод вибору режимів роботи на основі сучасної методології геометричної теорії управління.

Мінімальна глибина регулювання подачі повітря через повітророзподільний пристрій визначається згідно залежності (43), де чотири співмножники $a_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right)$, $a_2 = \left(\frac{m}{m_1}\right)$, $a_3 = \left(\frac{A_{0,1}}{A_0}\right)$, $a_4 = \left(\frac{Ar_{x \text{ max}}^{\text{кр}}}{Ar_{x.1}^{\text{кр}}}\right)$, є мультипликативною залежністю параметрів регулювання. Для визначення впливу параметрів регулювання кожного з множників, необхідно розв'язати дві задачі: встановити значимість впливу кожного з множників на D та відносну похибку визначення кожного множника; встановити кількість способів регулювання D для конкретних випадків, та обрати найбільш впливові параметри регулювання.

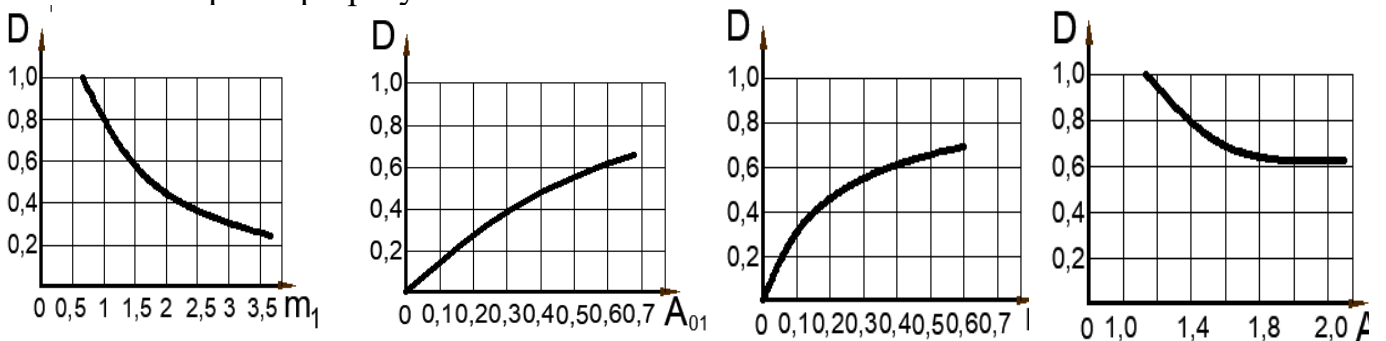


Рис.17 – Залежність глибини регулювання від аеродинамічної схеми повітророзподільних пристроїв і співвідношення сил інерції та гравітації у струміні: а) залежність D від $m_{\text{пл.1}}$; б) залежність D від $A_{0 \text{ пл.1}}$; в) залежність D від $n_{\text{пл.1}}^{0.5}$; г) залежність D від $Ar_{x \text{ пл.1}}^{\text{кр}}$

Аналіз рівняння (43) показує, що найбільший вплив на глибину регулювання D справляє параметр $a_2 = t/m_1$. Параметр $a_3 = (A_{01}/A_0)$ впливає на D менше на 25% ніж параметр a_2 , а параметри $a_1 = (n_1/n)$ і $a_4 = (Ar_{max}^{кр}/Ar_{x,1}^{кр})$ – менше на 50%.

Отримані дані дозволяють обрати конкретні дії регулювання і відповідний геометричний образ регулювання (гіперплощину – 4 параметри; площину – 3 параметри; пряму – 2 параметри; точку – 1 параметр) для заданих змін ΔD . Вісями простору регулювання є ті параметри, які будуть змінювати. Будь яка точка, що лежить на геометричному образі регулювання, проектується на вісі координат і знаходиться сполученням регульованих параметрів, які відповідають потрібному значенню ΔD .

На практиці, при визначенні глибини регулювання для повітророзподільних пристроїв в системах зі змінною витратою, доцільно використовувати для геометричного образу регулювання максимум три параметри. Тоді геометричну інтерпретацію (геометричний образ) регулювання можливо представити, як рівняння для площини (у просторі (x_1, x_2, x_3)) у відрізках:

$$1 = \frac{x_1}{\left(\frac{\tilde{D}}{\alpha_1}\right)} + \frac{x_2}{\left(\frac{\tilde{D}}{\alpha_2}\right)} + \frac{x_3}{\left(\frac{\tilde{D}}{\alpha_3}\right)}, \quad (44)$$

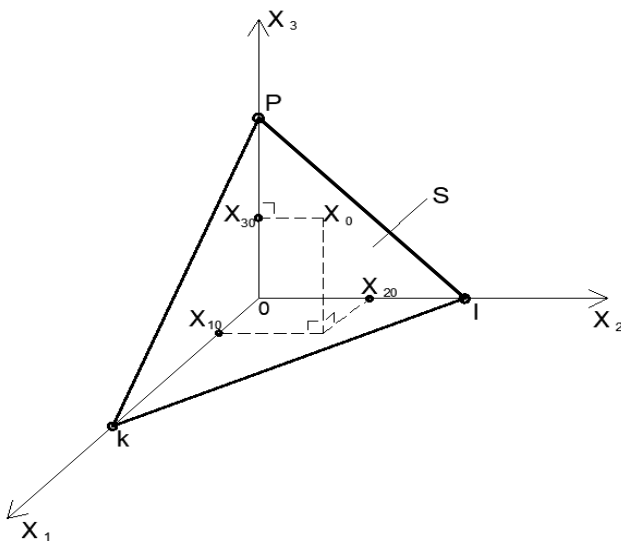


Рис. 18 – S-площина регулювання D параметра

де α_i – коефіцієнти значущості (впливовості) на глибину регулювання D ; $\tilde{D} = \Delta D/D_0$ ($\tilde{D} < 0, \tilde{D} \neq 0$) – відносна похибка при визначенні D .

Рівняння (44) при $\frac{\tilde{D}}{\alpha_1} = k > 0, \frac{\tilde{D}}{\alpha_2} = l >$

0 і $\frac{\tilde{D}}{\alpha_3} = p > 0$ має геометричний образ

наведений на рис. 18. Будь яка точка, наприклад (x_0) цієї площини S має три конкретні координати $(x_{10}; x_{20}; x_{30})$, які відповідають необхідним величинам регулювання параметрів x_1, x_2, x_3 , що задовольняють заданій глибині регулювання D .

У п'ятому розділі наведено результати досліджень контактних тепломасообмінних апаратів з підвищеними енергоефективними показниками для музейних приміщень спеціального призначення (реставраційні, науково-дослідні лабораторії, консервації, дезінфекції, акліматизації та ін.), що характерні незначними об'ємами. Одним з перспективних напрямків удосконалення апаратів, за результатами експериментальних даних, отриманих за участю автора, і концептуальної моделі Корбута В.П., є інтенсифікація гідродинамічних і тепломасообмінних процесів за рахунок збільшення міжфазної поверхні теплообміну, що за особливостями формування параметрів мікроклімату, технічних рішень, принципово відрізняються від існуючих установок. Сучасна теорія тепло- і

масообміну між рідиною і газом в контактних апаратах базується на турбулентності змішування обертових потоків Прандля, завихрованості Тейлора, кінетичної енергії турбулентності, алгебраїчних рівнянь і геометричного опису руху двофазних потоків. Проте, у даний час немає повного розкриття термодинамічних процесів при тепло- і масообміну, особливо у зоні завихрованих потоків. Таким чином, в практиці при розрахунках контактних апаратів найчастіше реалізовується емпіричний підхід, який не дозволяє виявити внутрішній зв'язок фізичних явищ у складних процесах. Отримані експериментальним шляхом залежності використовуються для визначеного типу апарата, схеми взаємного руху середовищ у ньому, направленості процесу, діапазону фізичних і режимних параметрів. Науково-практичне вирішення задачі включає: узагальнення та удосконалення методів розрахунку комплексних аеродинамічних і тепломасообмінних процесів, удосконалення існуючих і розробка теплообмінних елементів нового типу для інтенсифікації тепловологісної обробки повітря.

Контактні апарати характерні різними аеродинамічними і термодинамічними потенціалами взаємодіючих фаз, що визначають міжфазний обмін масою, імпульсом, енергією і речовиною. Такі процеси характеризуються газовмістом і геометрією шару контактних фаз та відбуваються в реактивному просторі апаратів. Газовміст визначає структуру піни і дорівнює відношенню об'єму газу у двофазному пінному шарі до його загального об'єму. Геометрія двофазного шару залежить від фізичних параметрів газу і рідини, тиску газу та ін. Фізичну взаємодію у газорідинному середовищі визначають через диференційні рівняння гідродинаміки. Величина втрат тиску в пінному апараті є однією з складових енерговитрат. Розроблені методи розрахунку гідравлічного опору пінних апаратів базуються на поділенні повного гідродинамічного опору на окремі складові: опір сухого повітряного тракту та газорідинного шару.

Виконані дослідження процесів гідродинаміки та тепломасообміну існуючих конструкцій контактних апаратів проводились на базі програмно-розрахункового комплексу FLUENT, використовуючи модельні методи Лагранжа та Ейлера. Аналіз досліджень виявив основні фактори, що визначають інтенсивність теплообміну між тепловіддаючою ребреною поверхнею і шаром піни. До цих факторів відносяться: швидкість повітряного потоку у вільному перерізі; статичний рівень рідини, який впливає на висоту пінного шару; конструкцію теплообмінних елементів; фізичні властивості рідини, що омиває теплообмінники.

Отримані результати фізичного і математичного моделювання дозволили виявити зони з найбільшим аеродинамічним опором, найменшим коефіцієнтом тепловіддачі та іншими конструктивними недоліками, які головним чином стосуються теплообмінників.

На основі аналізу виконаних досліджень узагальнено і доповнено математичним моделюванням теоретичні передумови, що дозволили розробити уточнену нову модель контактного апарату з блоком термоелектричних модулів (рис. 19). За базовий елемент в апараті прийнята ребрена теплообмінна секція (рис. 20), яка виконана у вигляді лінійно розміщених рядів з П-подібними пластинами. Запропоновані пази інтенсифікують тепловіддачу від ребер

теплообмінників до водоповітряної суміші і позбавляють повздовжніх коливань пінного шару при високих швидкостях повітря. Дослідження окремих секцій тепломасообмінників і всієї конструкції апарату проводились із застосуванням математичного методу планування експерименту. В якості конструктивних факторів, що впливають на інтенсивність процесів теплообміну в дослідженнях, передбачалося варіювати висоту ребер, висоту та ширину пазів.

Контакт повітря з рідиною визначався товщиною прошарку рідини і швидкістю повітря. Утворення піни дозволяє збільшити поверхню контакту з удосконаленими теплообмінниками 1, 2 при визначених швидкостях повітря в апараті. Найбільш інтенсивний турбулентний рух водоповітряної суміші спостерігається в нижній частині апарату. По мірі підйому двофазного потоку руйнування піни перевищує її оновлення. Внаслідок цього вирішено збільшити поверхню теплообміну теплообмінників з частковим віддаленням їх від піддону апарату.

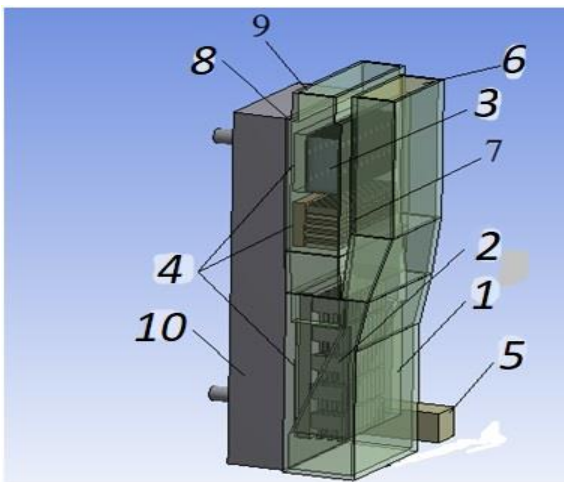


Рис. 19 – Удосконалена конструкція контактного апарату з блоком ТЕМ. (Патент на винахід №101290 та №106579)
1 – теплообмінник частково розміщений в пінному шарі; 2 – теплообмінник краплевловлювач; 3 – теплообмінник-доводчик; 4 – термоелектричний модуль ТЕМ; 5 – піддон з регулятором рівня води; 6 – вхідний патрубок для обробки повітря; 7 – щілинний канал; 8 – корпус; 9 – вихід повітряного потоку; 10 – технологічний канал.

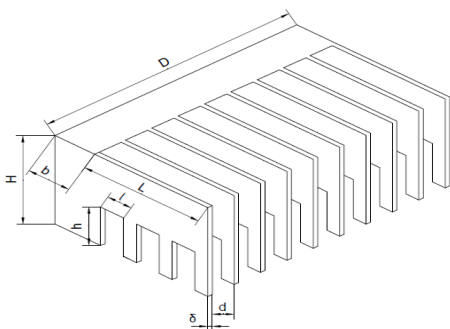


Рис. 20 – Конструктивна особливість елемента секції теплообмінника з П-подібними пазами

Основні розміри: висота ребра $H=35$ мм; довжина ребра $L=40$ мм; висота пазів $h=15$ мм; ширина пазів $l=13$ мм; товщина ребер $\delta=15$ мм; крок ребер $d=10$ мм; товщина основи $b = 15$ мм.

Осушування і краплевловлювання здійснювалося в теплообміннику-краплевловлювачі, пластини якого виконані під кутом нахилу зигзагів 30° , кроком 10 мм та трьома гребінцями в місцях перегину. Такий краплевловлювач забезпечує ефективне відділення краплин при швидкості потоку до 9 м/с.

Для догріву або доохолодження повітря в апараті передбачений теплообмінник – доводчик 3, який розміщений у верхній «сухій» частині корпусу.

В якості джерела теплоти (холоду) в апараті використовуються термоелектричні елементи, які засновані на ефекті Пельтьє.

Виконані модельні дослідження гідродинамічних режимів в удосконаленому апараті з ТЕМ довели, якщо висота ребер в теплообміннику перевищує 60 мм – утворюються повздовжні канали, які перешкоджають ефективному поперечному перемішуванню водоповітряної суміші. Водночас, збільшується аеродинамічний опір пристрою та зменшується висота пінного шару. Зменшення висоти ребра теплообмінника від 60 мм до 35 мм збільшує коефіцієнт тепловіддачі від $1,2 \text{ кВт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ до $1,8 \text{ кВт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, що складає більш як на 20%. При зменшенні ширини пазів від 13 мм до 5 мм, коефіцієнт тепловіддачі збільшується, від $1,6 \text{ кВт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ до $2,5 \text{ кВт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. При $l \geq 0,3L$ відбувається перетікання води без ефективного змішування водоповітряної суміші. Зменшення розмірів П-подібних пазів до $l \leq 0,1L$ призводить до незначного збільшення теплообмінної поверхні, а аеродинамічний опір коливається в межах 20-30 Па. Ефективне перемішування та збільшення коефіцієнту тепловіддачі від теплообмінників до піни спостерігається при висоті ребер теплообмінника $35 \geq H \geq 40 \text{ мм}$ та висоті і довжині пазів $20 \geq h \geq 30 \text{ мм}$, $6 \geq l \geq 8 \text{ мм}$.

На рис. 21, 22 наведені порівняння аеродинамічних і теплових характеристик трьох типів теплообмінників: пластинчатого з паралельними ребрами, у вигляді трубних пучків, з шаховим розташуванням та пластинчатого з П-подібними пазами, розміщеними у пінному шарі при статичному рівні води 20 мм.

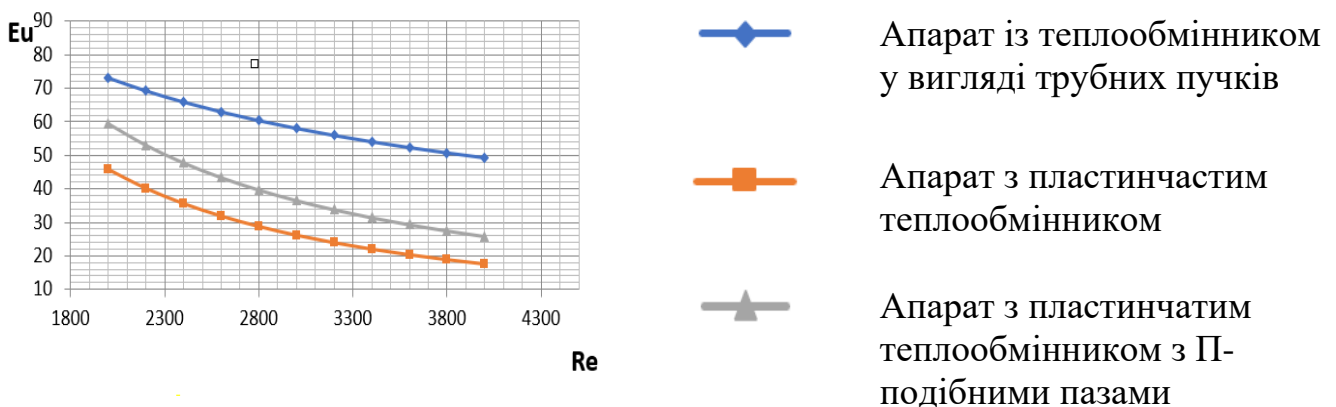


Рис. 21 – Порівняння аеродинамічних характеристик теплообмінників різних конструкцій та теплообмінника з П-подібними пазами, при швидкості повітря в перерізі апарату $w_a=3 \text{ м/с}$ та статичному рівні води $h_{ст}=20 \text{ мм}$

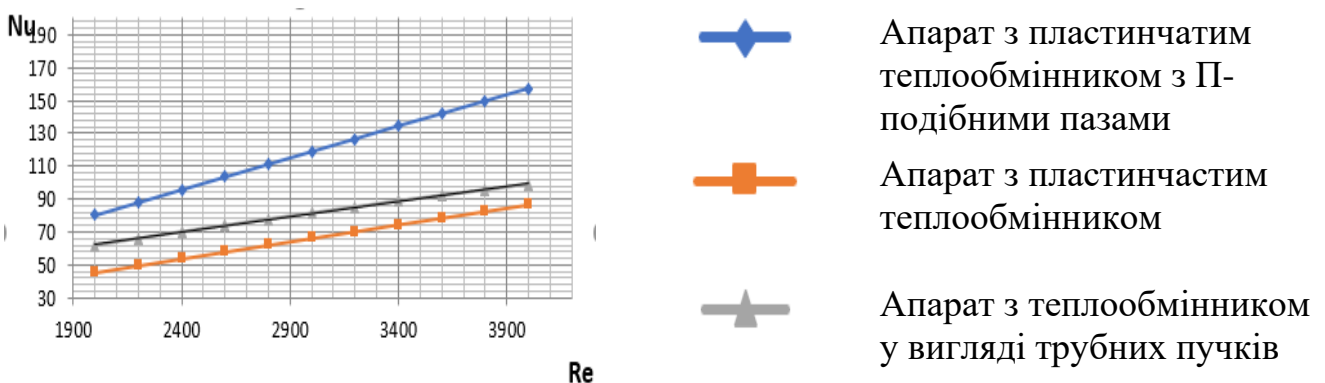


Рис. 22 – Порівняння теплових характеристик пластинчатого теплообмінника 1 та теплообмінника з П-подібними пазами, при швидкості повітря в перерізі апарату $w_a=3 \text{ м/с}$ та статичному рівні води $h_{ст}=20 \text{ мм}$

Виконаний аналіз графіків показує, що найменший опір має звичайний пластинчастий теплообмінник, а найбільший – трубні пучки з максимально ефективною для теплопередачі густиною розміщення.

Якщо проаналізувати теплові характеристики теплообмінників, то найкращий ефект дає оптимізована конструкція пластинчатого теплообмінника 1 з П-подібними пазами.

Узагальнена характеристика інтенсивності конвективної тепловіддачі з П-подібними пазами, розташованих в пінному шарі, має вигляд:

$$Nu = 0.035 Re_r^{0,92+0,01 h_{ст}/de_1} Pr_p^{0,015}. \quad (45)$$

Результати досліджень аеродинаміки та тепловіддачі від оребреної поверхні теплообмінника 2 до водоповітряної суміші показані на рис. 23, 24. Доведено, що на тепловіддачу від поверхні теплообмінника, розміщеного в зоні винесених краплин води з пінного шару, впливають не тільки швидкість в перерізі апарату, але й статичний рівень рідини у піддоні.

Узагальнена залежність тепловіддачі для теплообмінника-краплевловлювача

$$Nu = 0.22 \cdot 10^{-\frac{0.11h}{de}} Re_r^{0,4} Pr_p^{0,02}. \quad (46)$$

Загальний вигляд рівняння для визначення тепловіддачі від поверхні теплообмінника до потоку повітря:

$$Nu = 0,0015 Re_r^{1,4}. \quad (47)$$

Розрахункове рівняння залежності аеродинамічного опору апарату від гідродинамічних показників

$$Eu = \left(A + b \frac{h_{ст}}{d_e} \right) 10^4 Re^m. \quad (48)$$

Числа Ейлера, що характеризує загальний опір апарату, від визначних факторів

$$Eu = \left(5,2 + 0,29 \frac{h_{ст}}{d_e} \right) 10^3 Re^{-1,49}. \quad (49)$$

Створення ефективних умов протікання міжфазних тепло- і масообмінних процесів підтверджується термодинамічними (ексергетичними) розрахунками обробки повітря в апараті при різних початкових параметрах повітря та води в контактному апараті (табл. 1).

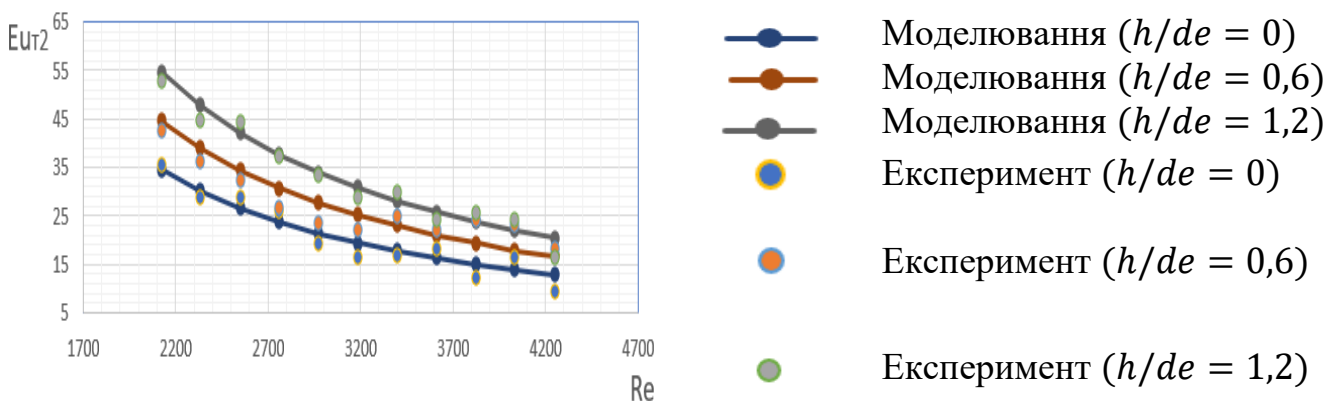


Рис. 23 – Залежність $Eu = f(Re; h_{ст})$ для теплообмінника-краплевловлювача при моделюванні в програмному комплексі Fluent та експериментальних дослідженнях

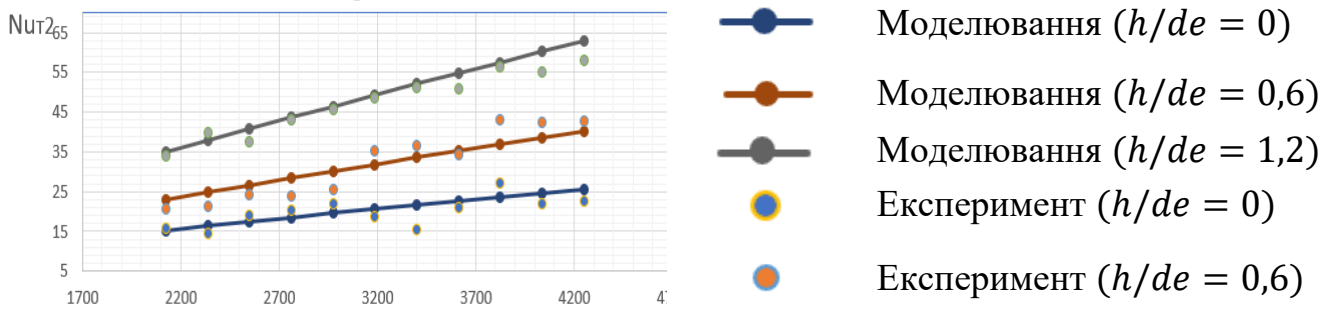


Рис. 24 – Залежність $Nu = f(Re; h_{ст})$ для теплообмінника-краплевловлювача при моделюванні в програмному комплексі Fluent та експериментальних дослідженнях

Найбільша питома ексергія ($\eta_e, \%$), спостерігається при проходженні повітря через теплообмінник з П-подібними пазами у пінному шарі. Водночас, відбуваються найбільші втрати тиску E потоком при проходженні повітря через шар піни (табл.1).

Таблиця 1 – Зведені термодинамічні значення в контактному апараті

$t_b, \text{ }^\circ\text{C}$	Параметри повітря								$E, \text{ кВт}$	$N \text{ (Евх)}, \text{ кВт}$	$\eta_e, \%$
	На вході в апарат				На виході з апарату						
	$t_c, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_c, \text{ кДж/кг}$	$d_c, \text{ г/кг}$	$\varphi_c, \%$	$t_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_p, \text{ кДж/кг}$	$d_p, \text{ г/кг}$	$\varphi_p, \%$			
9	28	68,2	15,7	60	18	36,1	7,1	55	0,046	0,5	9,2
9	31	71,5	15,8	50	19	37,6	7,3	53	0,053	0,8	6,63
9	35	95,4	24,1	70	22	43,5	8,4	50	0,083	0,5	14,31
12	35	90,9	21,7	60	22	45,7	9,3	55	0,043	0,43	43
12	28	57,8	12	50	21	55,4	8,7	55	0,044	0,44	4,89
12	31	82,9	20,2	70	22	49	9	54	0,056	0,6	9,33
15	35	81,4	18	50	23	51,8	11,3	64	0,040	1,1	3,64
15	28	71,3	16,9	70	22	48,5	10,4	62	0,032	0,8	4,0
15	31	75,3	17,3	60	23	59,6	10,6	60	0,041	0,5	8,2

У шостому розділі запропоновані шляхи подальшого розвитку системи керування і контролю параметрів музейного мікроклімату із застосуванням математичних моделей фрактального типу.

Оперативне керування параметрами повітряного середовища базується на системі, яка подає сигнал про виникнення позаштатної ситуації (надмірна/ понижена відносна вологість, підвищена/ низька температура, висока швидкість повітря в зоні, де знаходяться експонати). Для розробки моделі ідентифікації кліматичних параметрів запропоновано алгоритм визначення області самоподібності визначального параметра. Складовими визначального параметру доцільно прийняти відносну вологість φ , температуру T , швидкість повітря v . Така область самоподібності визначиться, як постійність співвідношення цих величин:

$$K = \frac{[(\varphi_1 \cdot T_1)/v_1]}{[(\varphi_2 \cdot T_2)/v_2]} \approx const, \quad (50)$$

де v_1 – швидкість у зоні обслуговування з мінімальними значеннями (біля поверхні експонату), м/с; v_2 – швидкість у зоні обслуговування з максимальними значеннями (максимально допустима швидкість з умов збереження експоната), м/с; T_1, T_2 – температура повітря у вказаних областях, К; φ_1, φ_2 – відносна (у частинах одиниці) вологість повітря у вказаних областях.

При наближенні параметра K до однієї з меж області самоподібності фіксується імовірність порушення нормованого температурно-вологісного режиму і система управління мікрокліматом змінює параметри та/або кількість припливного повітря, а при необхідності і тип струмини системи повітророзподілення.

Наприклад, при зберіганні комплексних музейних колекцій нормуються наступні параметри повітряного середовища: $t_{з.о.} = 18 \pm 2^\circ\text{C}$; $\varphi_{з.о.} = 50 \pm 5\%$; $v_{з.о.} = 0,01 \dots 0,02$ м/с. Оптимальні параметри повітряного середовища для експоната: $\varphi_1 = 0,5, T_1 = 291 \text{ }^\circ\text{K}$; $v_1 = 0,1$ м/с. Верхня межа допустимих відхилень: $\varphi_2 = 0,55, T_2 = 293 \text{ }^\circ\text{K}$; $v_2 = 0,2$ м/с. Для цих умов критерій самоподібності $K_1 = 1,806$. Нижня межа допустимих відхилень: $\varphi_2^* = 0,45, T_2^* = 280 \text{ }^\circ\text{K}$, $v_2^* = 0,2$ м/с. Критерій самоподібності $K_2 = 2,238$.

Таким чином, критерій K повинен знаходитись в діапазоні $K \in [1,806; 2,238]$. Вихід за межі зазначеного діапазону означає необхідність зміни режиму роботи систем формування мікроклімату.

У розділі опрацьовано застосування фрактального аналізу часових рядів для оцінки детермінованих параметрів тепломасообміну, напруження та деформації в процесі зберігання музейних колекцій. Основою методики аналізу часових рядів є алгоритм фрактального R/S-аналізу для визначення показника Херста. На практиці фрактальну розмірність замінюють показником Херста H , на основі якого визначається ступінь згладженості часового ряду. Показник H визначається на основі фрактальної розмірності за формулою $H = 2 - D$, де $0 \leq H \leq 1$. Якщо розбити часовий ряд на v ділянок однакової довжини, тоді показник Херста визначається: $(R/S)_v = \alpha \cdot v^H$, де $(R/S)_v$ – нормований розмах від накопиченого середнього; v – число часових відліків або кількість спостережень; $\alpha = const$, яка незалежна від v .

Запропонований підхід дозволяє виконати фрактальне оцінювання відповідної статистичної інформації щодо вологовмісту, температури та деформації музейних експонатів.

Визначення фрактальної розмірності поверхні колоїдних капілярно-пористих тіл дозволяє використовувати її при аналізі процесів адсорбції-десорбції в матеріалах з пористою структурою, адекватно описувати гістерезисні явища та тепломасообмін при зміні відносної вологості повітряного середовища з метою управління мікрокліматом в музейних приміщеннях.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі виконаних теоретичних, експериментальних і натурних досліджень систем формування внутрішнього мікроклімату музейних приміщень та процесів теплообміну і масопереносу в капілярно-пористих матеріалах із

навколишнього середовища вирішена важлива науково-прикладна проблема складних нелінійних фізико-хімічних перетворень, що виникають при реологічних процесах в дисперсних тілах та обґрунтовані принципи розвитку енергоефективних технологій повітророзподілення, при яких забезпечуються нормовані параметри в музейних приміщеннях.

2. Дослідження мікроклімату в виставкових залах з різними об'ємно-планувальними рішеннями показали, що існуючі методи створення внутрішнього мікроклімату та режимів роботи в більшості систем ОВ і КП не відповідають нормативним вимогам, що призводить до деформації і прискорення руйнування музейних експонатів. При розробці технології повітрообміну без врахування гігроскопічності експозиційного матеріалу, енергоефективності розподілу повітря в приміщенні, інтенсивності потоку екскурсантів, інтелектуальних методів управління не можуть бути створені оптимальні умови збереження музейних експонатів особливої цінності.

3. Проведений комплексний науковий аналіз значної кількості дисперсних матеріалів за їх хімічним складом, пористістю, розмірами часток, складними анізотропними властивостями та процесами тепломасообміну при гігротермічному впливі показав, що доповнення деформаційної складової до термодинамічних залежностей сприяє розв'язанню важливої прикладної проблеми масопереносу в капілярно-пористих матеріалах при збереженні художніх цінностей.

4. Розроблена система рівнянь, що описує тепломасообмінні і деформаційні процеси в матеріалах полімерної групи при умовах, які найбільш наближені до нормованого середовища при нестационарних режимах. В системі рівнянь використані математичні моделі, які доповнені термодинамічними залежностями, що дозволяють максимально точно описати анізотропні, пружні й пружно-в'язкі процеси в дисперсних матеріалах, які відбуваються при різних температурно-вологісних режимах зберігання експонатів в приміщеннях музеїв.

5. Отримані теоретичні залежності реологічних характеристик колоїдних капілярно-пористих матеріалів при годинній зміні параметрів повітряного середовища музейного приміщення рекомендується використовувати при розробці інтелектуальних систем управління штучним мікрокліматом.

6. Запропоновано алгоритм системи керування температурно-вологісним режимом, що базується на узагальненому індексі дискомфорту повітряного середовища. Пріоритетним є його локальний показник повітряного середовища. Визначено метод неруйнівного контролю оперативного вимірювання вологопереносу в пористих матеріалах, який засновано на принципі поглинання енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності. Розроблено критерії оцінки енергоефективності зональної та загальнообмінної системи формування мікроклімату в експозиційних залах.

7. Отримані аналітичні залежності аеродинамічних, теплових і геометричних параметрів повітророзподільних пристроїв, які визначають розвиток неізотермічних струмин при змішувальній вентиляції та змінних витратах повітря. Визначено алгоритм роботи системи повітророзподілу при змінних тепло-вологонадходженнях у приміщення, що забезпечує розрахункові параметри повітряних потоків, незалежно від глибини регулювання систем вентиляції і кондиціонування.

Розроблено конструкцію повітророзподільника зі змінним типом струминних течій, які дозволяють варіювати параметри припливної струмини в залежності від тепловологісного режиму музейного приміщення та нормованих параметрів повітряного середовища у визначених зонах.

8. Проведені комплексні дослідження повітророзподільників з настиланням повітряного потоку на криволінійну поверхню дозволили виконати геометричний, кінематичний та температурний аналіз, на базі якого отримані основні закономірності струмини, що залежать від початкової швидкості, надлишкової температури, ширини щілини і радіуса поверхні настилання. Експериментально підтверджені теоретичні розрахунки ефективного затухання повітряного потоку під час настилання на криволінійну поверхню довжиною $l_0 \geq 2\delta$, при плоскій формі вихідного каналу з шириною щілини $\delta/R = 0,15 \dots 0,25$ і кутах $\varphi = 60^\circ - 90^\circ$. Отримана емпірична залежність для визначення аеродинамічного опору для повітророзподільників з криволінійною поверхнею, у яких коефіцієнт місцевого опору $\xi_{пр.} = 1,1 \dots 1,3$ при відносній площі виходу повітря $\bar{A}_{вих.} > 2$.

9. Обґрунтовано застосування малошвидкісних панельно-секційних повітророзподільників з покращеними аеродинамічними показниками (швидкість на виході $0,1 \dots 0,5$ м/с; коефіцієнт місцевого опору $2 \dots 2,3$), що дозволяє використовувати їх в системах зональної та витісняючої загальнообмінної вентиляції музейних приміщень. Узагальнено і поглиблено теоретичні дослідження аеродинамічних процесів взаємодії малошвидкісного потоку і плоскої неізотермічної струмини, спрямованої під кутом 45° до основного потоку, що дає можливість регулювати параметри сумарної струмини з визначеними динамічними і тепловими характеристиками.

10. Запропоновано удосконалену конструкцію контактного апарату з тепловологісною обробкою повітря для спеціальних музейних приміщень. Підвищено енергоефективність роботи апарату завдяки інтенсифікації тепломасообміну та збільшення міжфазової поверхні теплообміну. Отримані узагальнені співвідношення в області стійкого барботажного режиму течії, які дозволяють розрахувати величини середнього коефіцієнта конвективної тепловіддачі і найменшого аеродинамічного опору. Проведені комплексні дослідження дозволили отримати термодинамічні характеристики удосконаленої конструкції, що перевищують показники серійних апаратів на 20%.

11. Визначені основні напрямки подальшого розвитку досліджень, які спрямовані на застосування фрактального аналізу, з допомогою якого отримується більш достовірні інформація основних параметрів процесів тепломасообміну та деформації ККПТ, що знаходяться в постійному контакті з оточуючим повітряним середовищем. Запропонована методика фрактального аналізу часових рядів для оцінки параметрів $(t, \varphi, v, \varepsilon)$, сформульовані критерії визначення середньої довжини періодичного і неперіодичного циклів. Розроблено алгоритм визначення області самоподібності визначального параметру K музейного мікроклімату. Наведені практичні приклади конкретних задач збереження музейних експонатів, що дають підстави створення необхідних мікрокліматичних режимів при експлуатації СКП на новому рівні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Gumen O., Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. “Simplified Simulation of Flows with Turbulent Macrostructure”. The 4th International Technical Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2016). (16–17 July 2016). Hong Kong: Proceedings. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, 2016. P. 251 – 260, (Scopus). *(Особистий внесок здобувача полягає у формуванні основних положень методу аналізу макроструктури струминних течій та експериментальних досліджень струмини).*
2. Gumen O., Dovhaliuk.V., Mileikovskiy V., Lebedeva O., Dziubenko V., “Geometric Analysis of Turbulent Macrostructure in Jets Laid on Flat Surfaces for Turbulence Intensity Calculation”. *FME Transactions*. 2017. Vol.45, No2. P:236 – 242, ISSN: 2413 – 1032 с ISSN: 2014 – 6404. (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача полягає в теоретичному аналізі інтенсивності турбулентності у плоских напівобмежених струминах).*
3. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. New Approach for Refined Efficiency Estimation of Air Exchange Organization. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. 7 (3.2). P. 591 – 596, (Scopus). *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці нового методу визначення ефективності повітрообміну).*
4. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. New Approach for Refined Efficiency Estimation of Air Exchange Organization. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. 7 (4.8). P. 485 – 491, (Google Scholar). *(Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні методу оцінки зональної ефективності повітрообміну).*
5. Dovhaliuk. V., Gumen O., Mileikovskiy V., Dziubenko V. “Simplified Analysis of Turbulence Intensity in Curvilinear Wall Jets”. *FME Transactions*. 2018. Vol.46, No.2, P.177 – 182, URL:<http://doi.10.5937/fmet1802177D>, (Scopus, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні методу опису інтенсивності турбулентності криволінійних напівобмежених струмин).*
6. Dovhaliuk V.B., Chovnyuk Y.V., Ivanov E.A., Shyshyna M.O. The improvement of the rheological model for controlling the stress-strain state and humidity in the materials of museum pieces: Zener thermodiffusion model for capillary-porous bodies. // *Quality production improvement № 2 (11)*. 2019. P. 51 – 71. DOI: 10.30657/gpi.2019.11.05, (Index Copernicus International). *(Особистий внесок здобувача полягає у теоретичному аналізі тепломасообмінних і деформаційних процесів у капілярно-пористих музейних експонатах з використанням термодифузійної моделі Зінера).*

Статті у наукових фахових виданнях

7. Довгалюк В.Б. Формування та розвиток конвективних потоків біля теплових джерел промислових цехів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: *Наук.-техн. зб.* 2001. Вип 1. С.43 – 56.

8. Довгалюк В.Б., Комаренко О.І., Митківська Т.І. Мікроклімат музейних приміщень: метод. посібник. Київ: Асканія Нова, 2006. 108 с. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці принципів забезпечення параметрів мікроклімату музейних приміщень).*

9. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Взаємодія струмин, що настилаються на опуклу поверхню. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: Наук.-техн. зб. 2006. Вип. 23. С. 90 – 98. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці схеми струмини й проведенні експериментальних досліджень).*

10. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Експериментальне визначення втрат тиску в повітророзподільниках. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: Наук.-техн. зб. 2006. Вип.23. – *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики й проведенні експериментальних досліджень).*

11. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Аналітичні та експериментальні дослідження струмини, що настилається на опуклу поверхню. Нова Тема: науково-виробничий журнал. 2007. №2. С.11 – 32. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці математичної моделі струмини та проведенні чисельних і фізичних експериментів).*

12. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Ефективність організації повітрообміну в теплонапружених приміщеннях у стиснутих умовах. Будівництво України: Науково виробничий журнал. №3, 2007. С. 36 – 39. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці та аналізі математичної моделі тепломасообмінних процесів в теплонапружених приміщеннях).*

13. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Формування струмин при тангенціальних випусках повітря з повітророзподільника. Нова тема: Науково-технічний журнал. 2007. №2. С. 22 – 24. *(Особистий внесок здобувача полягає в проведенні чисельних та фізичних дослідів і розробці рекомендацій до застосування повітророзподільників).*

14. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Розрахункова модель неізотермічної струмини, що настилається на опуклу циліндричну поверхню. Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: Наук.-техн. зб. 2008. Вип.12. С. 11 – 32. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці моделі неізотермічної струмини, що настилається на криволінійну поверхню).*

15. Плоский В.О., Довгалюк В.Б., Фактори формування музейного середовища. Технічна естетика і дизайн: міжвідомчий наук.-техн. зб. 2010. Вип. 7. С. 41 – 44. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці різнохарактерних моделей, які в сукупності визначають збалансованість музейного середовища).*

16. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О. Геометричний аналіз структури струмин, що настилаються на поверхні різної кривизни. Прикладна геометрія та інженерна графіка: наук.-техн. зб. 2012. Вип. 89. С. 156 – 165. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці теоретичного опису профілю швидкості криволінійних напівобмежених струмин).*

17. Довгалюк В.Б., Шадура І.В. Енергоефективний ударно-пінний апарат для систем кондиціонування повітря. Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук. техн. зб. 2013. Вип.4. С. 89 – 94. *(Особистий внесок здобувача полягає у теоретичному обґрунтуванні конструкції ударно-пінного апарату).*

18. Довгалюк В.Б., Чабан І.В. Ефективний поверхневий теплообмінник для комбінованого ударно-пінного апарату. *Енергоефективність в будівництві та*

архітектурі : наук. техн. зб. 2014. Вип.6. С. 86 – 90. (Особистий внесок здобувача полягає у обґрунтуванні конструкції поверхневого теплообмінника на основі аналізу чисельних експериментів ударно-пінного апарату).

19. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Клименко Г.М. Аналітичні дослідження застосування витискальної вентиляції у теплонапружених приміщеннях. Енергоефективність в будівництві та архітектурі: Наук. – техн. зб. 2014. Вип.6. С. 81 – 85. *(Особистий внесок здобувача полягає у обґрунтуванні ефективності застосування витискальної вентиляції у теплонапружених приміщеннях).*

20. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Клименко Г.М. Аналітичні дослідження повітряної струмини при витіканні з перфорованої поверхні. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. зб. 2014. Вип.17. С. 10 – 15. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці методу аналізу параметрів повітряної струмини при витіканні з перфорованої поверхні).*

21. Довгалюк В.Б., Мілейковський В.О., Мусаєва А.Ю. Аналіз гідродинамічних процесів при проходженні вихору через витяжний пристрій. Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук.-техн. зб. 2016. Вип.19. С.16 – 22.

(Особистий внесок здобувача полягає в теоретичному обґрунтуванні кількості кінетичної енергії, що видаляється з приміщення, при проходженні вихору через витяжний отвір).

22. Довгалюк В.Б., Човнюк Ю.В. Концептуальні основи аналізу тепломасообмінних і деформаційних процесів у полімерних дисперсних тілах для формування мікроклімату музеїв // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. збірник. 2017. Вип. 23. С. 6 – 24. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці методу теоретичного опису тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних матеріалах музейних експонатів).*

23. Довгалюк В.Б., Човнюк Ю.В. Концептуальні основи аналізу тепло- і масопереносу у шаруватих капілярно-пористих тілах. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: наук. – техн. журнал. 2018. №2 (25). С. 86 – 95. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці методу аналітичного розв'язку нестационарної задачі тепло- й масопровідності кусково-однорідної необмеженої двошарової плити).*

24. Човнюк Ю.В., Диктерук М.Г., Довгалюк В.Б., Скляренко О.М. Концептуальні основи створення мехатронних систем керування мікрокліматом музейних приміщень з використанням нечітких логічних контролерів (регуляторів). Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук. – техн. зб. 2018. Вип. 27. С. 6 – 17. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці алгоритму керування системами кондиціонування повітря при змінному режимі надходження теплоти та вологи в музейне приміщення).*

25. Човнюк Ю.В., Диктерук М.Г., Довгалюк В.Б., Скляренко О.М. Використання електромагнітних хвиль для контролю процесів вологопереносу в матеріалах художніх виробів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. 2018. Вип. 26. С. 6 – 12. *(Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні застосування методу НВЧ/КВЧ, рефлектометрії для контролю вологопереносу в музейних експонатах).*

26. Dovhaliuk V., Sitnitska A., Tereschuk M. Method Analysis for assessing the effectiveness of the air exchange organization. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. 2018. Вип. 11. С.103 – 111. (Особистий внесок здобувача полягає в аналізі методів оцінки ефективності систем вентиляції).*

27. Довгалюк В.Б., Човнюк Ю.В., Шишина М.О. Аналіз процесів тепломасообміну та деформації колоїдних капілярно-пористих тіл методами фрактального аналізу та дискретної нелінійної динаміки. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук. техн. зб. 2019. Вип. 28. С.6 – 16. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів, які характеризують основні параметри процесів тепломасообміну та деформації колоїдних капілярно-пористих тіл).*

28. Довгалюк В.Б., Човнюк Ю.В., Іванов Є.О., Ситницька А.К. Можливості застосування фрактальних моделей для ідентифікації мікрокліматичних параметрів музейних приміщень. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук. техн. зб. 2019. Вип. 29. С. 6 – 11. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці алгоритму визначення області самоподібності та визначального параметру мікроклімату музейних приміщень).*

29. Човнюк Ю.В., Довгалюк В.Б., Кравчук В.Т. Метод аналізу ізотерм, поверхневої фрактальної розмірності та динамічного хаосу при вологообміні колоїдних капілярно-пористих музейних експонатів за змінних умов мікроклімату. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук. техн. зб. 2019. Вип. 30. С. 6 – 19. *(Особистий внесок здобувача полягає у встановленні параметрів просторово-часової еволюції поверхневої фрактальної розмірності під дією змінних параметрів повітряного середовища).*

Матеріали конференцій

30. Довгалюк В.Б., Комаренко О.І., Лушпієнко І.Г. Основи формування температурно-вологісного режиму в культових спорудах-пам'ятках історії та культури. Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми збереження, консервації, та експертизи музейних пам'яток». 23 – 27 травня 2005. С. 75 – 78. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці основних критеріїв оцінки стану температурно-вологісного режиму).*

31. Довгалюк В.Б., Гусєв А.О. Формування параметрів повітряного середовища музейних приміщень. Збірник наукових доповідей VI Науково-практичної конференції «Збереження, дослідження, консервація, реставрація та експертиза музейних пам'яток». Київ. . С. 142 – 146. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці теоретичних основ формування стану повітряного середовища музеїв).*

32. Gumen O., Dovhaliuk.V., Mileikovskiy V. Geometric Analysis of Turbulence Parameters in Wall Jets Dependent on the Wall Curvature. The 17th International Conference of Geometry and Graphics (IGG 2016): Beijing, China, August 4-8, 2016. Abstracts. P. 197 – 199. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробці методу теоретичного опису інтенсивності турбулентності криволінійних напівобмежених струмін).*

33. Довгалюк В.Б., Вахула В.Р., Комаренко О.І. Особливості формування мікроклімату в музеях, які містяться в будівлях пам'яток історії архітектури.

Наукова реставрація. Історія, сучасність, шляхи модернізації: праці XI міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 11-14 вересня 2018 р.). Київ, 2018. С. 153 – 157. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробці теоретичних основ організації повітрообміну в музеях, які знаходяться в будинках пам'яток історії та культури).*

Додаткові публікації

34. Повітророзподільник: пат. 91617 Україна: МПК F24F 13/06 (2006.01), №а200813993, заявл. 05.12.2008; В.Б. Довгалюк, В.О. Мілейковський, К.Є. Кривша; опубл. 10.08.2010, бюл. №15/2010. 3с. *(Особистий внесок автора полягає в розробці конструкції повітророзподільника).*

35. Повітророзподільник: пат. 96625 Україна: МПК (2011.01), F24F 13/00, F24F 13/06. №а200910615; заявл. 20.10.2009; В.Б. Довгалюк, В.О. Мілейковський, М.М. Драчук опубл. 25.11.2011, Бюл.№22. 3 с. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробленні конструкції повітророзподільника зі змінним типом струмини).*

36. Повітророзподільник: пат. 92261 Україна: МПК (2006.01), F24F 13/06, №а200902422; заявл. 18.03.2009; В.Б. Довгалюк, А.О. Гусєв, В.О. Мілейковський; опубл. 27.12.2010, Бюл. №24, 5 с. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробленні конструкції повітророзподільника з двома типами струмин).*

37. Пристрій для обробки повітря: пат. 106579 Україна: МПК F24F 3/14 (2006.01), №а201315239; заявл. 26.12.2013; В.Б. Довгалюк, І.В. Чабан; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17/2014, 6 с. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробленні конструкції ударно-пінного апарату з блоком термоелектричних модулів).*

38. Повітророзподільник: пат. на корисну модель 94084 Україна: МПК, F24F 13/06(2006.01). №u201405689; заявл. 25.05.2014; В.Б. Довгалюк, В.О. Мілейковський, О.Т. Возняк, Г.М. Клименко опубл. 27.10.2014, Бюл.№20. 5 с. *(Особистий внесок здобувача полягає у розробленні конструкції повітророзподільника).*

39. Довгалюк В.Б. Аеродинаміка вентиляції: Навчальний посібник. ІВНВКП «Укреліотех», 2015. 366 с.

40. Повітророзподільник: пат. 120507 Україна: МПК F24F 13/06 (2006.01), F24F 13/062 (2006.01), F24F 13/08 (2006.01), F24F 13/10 (2006.01), №а201608907; заявл. 18.08.2016; О.А. Дудніков, В.Б. Довгалюк, А.К Ситницька; опубл. 26.12.2019, бюл. № 24/2019, 5 с. *(Особистий внесок здобувача полягає в розробленні конструкції повітророзподільника зі змінним типом струмини).*

АНОТАЦІЯ

Довгалюк В.Б. Розвиток наукових основ створення температурно-вологісних режимів повітряного середовища в музейних приміщеннях. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми запровадження систем створення температурно-вологісних режимів в музейних

приміщеннях, реалізація яких базується на комплексному врахуванні тепломасообмінних і деформаційних процесів в гігроскопічних експозиційних матеріалах та удосконалення повітророзподілення у змінному режимі тепловологонадходжень, забезпечуючи в зонах розміщення експонатів нормованих мікрокліматичних параметрів. Розроблена система рівнянь, що описує тепломасообмінні і деформаційні процеси в матеріалах полімерної групи при умовах, що найбільш наближені до нормованого повітряного середовища при нестационарних режимах. Обґрунтовано та запропоновано критерії оцінки ефективності повітрообміну для зональної та загальнообмінної системи формування мікроклімату. Для керування параметрами повітряного середовища запропоновано алгоритм, що базується на узагальненому індексі дискомфорту, для якого пріоритетним є локальний показник дискомфорту музейного експонату. Визначено вплив аеродинамічних і теплових параметрів припливного повітря на розвиток неізотермічних струмин при змішувальній вентиляції та змінних витратах повітря. Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку повітряних потоків між суміжними приміщеннями анфілади виставкових залів. Встановлено аналітичні залежності для кінематичних, теплових і геометричних параметрів повітророзподільних пристроїв різних конструкцій, які визначають розвиток неізотермічних струмин при витісняючій, зональній та змішувальній вентиляції та змінних витратах повітря. На основі геометричної теорії управління запропонована методологія вибору режимів роботи повітророзподільників зі змінним типом струминних течій при кількісному регулюванні системи вентиляції та кондиціонування повітря. Розроблено удосконалену конструкцію контактного апарату для спеціальних музейних приміщень. Запропоновані перспективи подальшого розвитку досліджень, які спрямовані на застосування фрактального аналізу для оцінки та прогнозу умов зберігання музейних колекцій, що знаходяться в постійному контакті з повітряним середовищем. Для оперативного керування системами кондиціонування повітря розроблено визначальний параметр K , складовими якого є температура, відносна вологість та швидкість руху повітря в музейних приміщеннях.

Ключові слова: тепломасообмін, температурно-вологісний режим, повітророзподіл, повітророзподільник, струмина, музейне приміщення, контактний апарат, фрактальний аналіз, критерій ефективності повітрообміну.

АННОТАЦІЯ

Довгалоук В.Б. Развитие научных основ создания температурно-влажностных режимов воздушной среды в музейных помещениях. - Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.03 - Вентиляция, освещение и теплогазоснабжения. - Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы внедрения систем создания температурно-влажностных режимов в музейных помещениях, реализация которых базируется на комплексном учете теплообменных и деформационных процессов в гигроскопичных экспозиционных материалах и

усовершенствования воздухораспределения при переменном режиме тепловлагопоступлений, обеспечивая в зонах размещения экспонатов нормированные микроклиматические параметры. Разработана система уравнений, описывающая тепломассообменные и деформационные процессы в материалах полимерной группы при условиях, наиболее приближенных к нормативным параметрам воздушной среды при нестационарных режимах. Обоснованы и предложены критерии оценки эффективности воздухообмена для зональной и общеобменной системы формирования микроклимата. Для управления параметрами воздушной среды предложен алгоритм, основанный на общем индексе дискомфорта, для которого приоритетным является локальный показатель дискомфорта музейного экспоната. Определено влияние аэродинамических и тепловых параметров приточного воздуха на развитие неизотермических струй при перемешивающей вентиляции и переменных расходах воздуха. Получены аналитические соотношения для расчета воздушных потоков между смежными помещениями анфилады выставочных залов. Установлены аналитические зависимости для кинематических, тепловых и геометрических параметров воздухораспределительных устройств различных конструкций, которые определяют развитие неизотермических струй при вытесняющей, зональной и перемешивающей вентиляции и переменных расходах воздуха. На основе геометрической теории управления предложена методология выбора режимов работы воздухораспределителей с переменным типом струйных течений при количественном регулировании системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Разработана усовершенствованная конструкция контактного аппарата для специальных музейных помещений. Предложены перспективы дальнейшего развития исследований, направленных на применение фрактального анализа для оценки и прогноза условий хранения музейных коллекций, находящихся в постоянном контакте с воздушной средой. Для оперативного управления системами кондиционирования воздуха разработан определяющий параметр K , составляющими которого являются температура, относительная влажность и скорость движения воздуха в музейных помещениях.

Ключевые слова: тепломассообмен, температурно-влажностный режим, воздухораспределение, воздухораспределитель, струя, музейное помещение, контактный аппарат, фрактальный анализ, критерий эффективности воздухообмена.

ABSTRACT

Dovhaliuk V.B. Development of scientific bases of creation of temperature-humidity modes of air environment in museum premises. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.23.03 – Ventilation, lighting and heat and gas supply. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific and technical problem of introduction of systems of creation of temperature and humidity modes in museum premises which realization is based on the complex account of heat and mass transfer and deformation processes in hygroscopic exposition materials and improvement of air distribution in the variable mode of heat and moisture receipts, providing in zones of

placement of exhibits of the normalized microclimatic parameters. The mechanism and kinetics of moisture pickup in the general case includes the processes of adsorption, absorption, capillary condensation being accompanied by with bodies' swelling. It is especially typical for colloid capillary-porous materials and relevant to most of museum exhibits. It has been developed a system of equations describing heat and mass transfer and deformation processes in polymer group materials under conditions closest to the normalized air environment under non-stationary regimes. The criteria for assessing the efficiency of air exchange for the zonal and general exchange system of microclimate formation are substantiated and proposed. The efficiency criteria relates the need to maintain the parameters' normalized values of the air environment in the museum premises and the total effective potential of the air supply ratio. An algorithm based on a generalized discomfort index has been proposed to control the parameters of the air environment, among which its local indicator is a priority for exhibition halls. It is advisable to provide moisture transfer control in the materials being subject to museum storing constantly using the contactless method of electromagnetic energy absorption of electromagnetic waves of non-heat intensity. The influence of aerodynamic and thermal parameters of supply air on the development of non-isothermal jets during mixing ventilation and variable air flow rates is determined. Analytical relations for the calculation of air flows between adjacent rooms of the enfilade of exhibition halls are obtained. It is shown the influence of geometric dimensions and shape of adjacent openings on the magnitude and direction of air flow. Analytical dependences for kinematic, thermal and geometrical parameters of air distribution devices of different constructions are established, which determine the development of non-isothermal jets during displacement, zonal and mixing ventilation. The developed designs of new class air diffusers used in variable flow ventilation and air conditioning systems are based on the obtained theoretical dependences. On the basis of the geometrical theory of management is offered the methodology of a choice of operating modes of air distributors with variable type of jet streams at quantitative regulation of system of ventilation and air conditioning. An improved design of the contact apparatus for special museum premises and transportation of exhibits has been developed. Improving the energy efficiency of the device is carried out by intensifying heat transfer and increasing the interfacial heat transfer surface.

Prospects for further development of research are proposed, which are aimed at the use of fractal analysis to assess and predict the storage conditions of museum collections that are in constant contact with the air. For operational control of air conditioning systems, the defining parameter K has been developed, the components of which are temperature, relative humidity and air velocity in museum premises.

Key words: heat and mass transfer, temperature-humidity regime, air distribution, air distributor, flow, museum premises, contact apparatus, fractal analysis, criterion of air exchange efficiency.