

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

ВОЗНЯК ОРЕСТ ТАРАСОВИЧ



УДК 697.922.565; 697.921.47

**ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНОГО
МІКРОКЛІМАТУ У СТИСНЕНИХ УМОВАХ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ**

Спеціальність 05.23.03. – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ-2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: КОРБУТ ВАДИМ ПАВЛОВИЧ

доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського Національного університету будівництва і архітектури, заслужений будівельник України.

Офіційні опоненти: ДАВИДЕНКО БОРИС ВІКТОРОВИЧ

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник відділу ТОЕТ Інституту технічної теплофізики НАНУ.

ДЕШКО ВАЛЕРІЙ ІВАНОВИЧ

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

РЕДЬКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури

Захист відбудеться “__” _____ 2018 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при 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.

Відгуки на автореферат просимо надсилати в двох примірниках за підписом, завіреним печаткою організації, на адресу: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, КНУБА, Вчена рада.

Автореферат розісланий “__” _____ 2018 р.

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



Довгалюк В.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні в Україні успішно розвиваються такі галузі промисловості, як легка (трикотажна, текстильна, швейна, шкіряно-взуттєва, тощо), приладобудівна, електронна, радіоелектронна, електротехнічна, виробництво електромедичного, електротерапевтичного устаткування та медичної апаратури, ювелірної продукції, видавництва та друкарні, а також ремонтні майстерні, які стосуються даних галузей. В них технологічний процес відбувається в малогабаритних виробничих приміщеннях, надмірно завантажених обладнанням та персоналом. Існує необхідність подачі великої кількості припливного повітря у стиснених умовах приміщення. При цьому ускладнюється завдання забезпечення у робочій зоні (РЗ) швидкості та температури в нормативних межах. Вони часто перевищують нормовані значення, оскільки відомі конструкції та схеми не забезпечують належного затування швидкості та температури повітряного потоку. Внаслідок цього збільшується матеріало- та енергоємність. Прогресивним напрямком у вирішенні цієї задачі є застосування зіткнення зустрічних неспіввісних струмин, а також ефекту закручування та настилення струмин.

На сьогодні ще недостатньо вивченим є питання енергоощадності повітроділення, за рахунок інтенсифікації затування параметрів повітряного потоку завдяки взаємодії зустрічних струмин та ефекту закручування і настилення струмин у поєднанні з динамічним мікрокліматом. У виробничих приміщеннях з монотонним характером роботи стали параметри мікроклімату підвищують втомлюваність працівників і негативно відображаються на продуктивності їх праці. Позитивно відображається на самопочутті людського організму та сприяє підвищенню продуктивності праці змінний режим. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових конструктивних рішень повітроділення, які забезпечили б як створення необхідного мікроклімату, так і економію матеріальних та енергетичних ресурсів.

Недоліки, що визначені при забезпеченні внутрішніх мікрокліматичних умов малогабаритних виробничих приміщень, зумовлені в першу чергу відсутністю надійних математичних моделей для опису складних аеродинамічних та теплообмінних процесів. Відсутність таких теоретичних розробок стає на заваді оптимізації відповідних вентиляційних систем в цілому та їх окремих елементів. Тому підвищення ефективності та енергетичної економічності вентиляційних систем малогабаритних виробничих приміщень, а також зниження їх матеріалоємності, є актуальною науково-технічною проблемою. Одним з перспективних методів вирішення цієї проблеми є використання найсучасніших енергоощадних технологій з переходом на енергоефективні системи вентиляції технологічного та комфортного призначення, які здатні працювати у змінному режимі, створюючи динамічний мікроклімат у приміщенні.

Отже, створення комфортних умов праці та досягнення енергоощадності при повітроділенні у стиснених умовах виробничого приміщення є надзвичайно актуальним.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «Енергоощадність систем теплогазопостачання і вентиляції». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт: "Аеродинаміка вентиляційних струменів" (№ 0107U005264), "Енергоаудит житлових та громадських будинків" (№0110U007103), "Аеродинаміка вентиляції" (№ 0110U007104), "Енергоощадність на об'єктах сільськогосподарського комплексу" (№0110U007105), "Розробка методики розрахунку параметрів мікроклімату у виробничо-технологічних приміщеннях" (№0112U006212), "Розроблення інноваційних методів підвищення енергоефективності систем теплогазопостачання і вентиляції" (№0115U004222).

Мета дисертаційної роботи полягає в науковому обґрунтуванні енергоощадних технологій формування динамічного мікроклімату у стиснених умовах виробничих приміщень та вдосконаленні на цих основах повітророзподілення у змінному режимі пристроями з ефективним затуханням швидкості і температури (ПЕЗШТ) за умови забезпечення в робочій зоні (РЗ) їхніх нормованих значень.

Завдання дослідження:

- проаналізувати існуючі схеми повітророзподілу, конструкції пристроїв, їх ефективність та методи розрахунку;
- розробити напрям із створення повітророзподільників нового класу: із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин з можливістю регулювання витрати повітря у розподільних повітропроводах, а також двоструминного пристрою, який утворює закручену і плоску настільну струмину;
- узагальнити і поглибити теорію аеродинамічних і тепломасообмінних процесів при подачі повітря взаємодією зустрічних неспіввісних компактних та плоских струмин, а також закрученими та плоскими настільними потоками у змінному режимі;
- розробити метод числового моделювання руху повітряних потоків закрученими та плоскими настільними струминами у виробничих приміщеннях у змінному режимі;
- виконати експериментальні дослідження повітророзподілу у стаціонарному та змінному режимах новими пристроями та визначити їх характеристики;
- розробити методики і рекомендації з використання, конструювання і розрахунку енергоефективних систем повітророзподілу, впровадити у виробництво енергоощадні технології із застосуванням повітророзподільників нового класу у виробничих приміщеннях у змінному режимі та досягнути економічного ефекту.

Об'єкт досліджень – процеси руху повітряних потоків і тепломасообміну у виробничих приміщеннях у змінному режимі.

Предмет досліджень – наукове обґрунтування енергоощадних технологій створення належного повітряного і теплового середовища у виробничих приміщеннях у змінному режимі.

Методи дослідження. Теоретичні методи досліджень використовувались для реалізації фізичного та математичного моделювання руху повітряного потоку на підставі рівнянь аеродинаміки, аналізу процесів взаємодії струмин та наукового обґрунтування створення динамічного мікроклімату. В результаті теоретичних досліджень було отримано розрахункові залежності для визначення по-

трібних аеродинамічних параметрів результуючого потоку і геометричних параметрів пристроїв з інтенсивним затуханням швидкості і температури.

Експериментальні лабораторні та натурні дослідження проводились з використанням фізичного моделювання повітряно-теплових режимів на основі теорії подібності та масштабів моделювання для перетворення фізичних величин, а також планування багатофакторних експериментів.

Вірогідність наукових гіпотез, положень, висновків і рекомендацій зумовлена використанням фундаментальних законів струминних течій при задовільній збіжності результатів теоретичних і експериментальних досліджень, та їх обробленні з використанням методів теорії імовірності та математичної статистики, а також числового моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено напрям із створення повітророзподільників нового класу: із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин з регулюванням витрати повітря у розподільних повітропроводах, а також двоструминного пристрою, який утворює закручену і плоску настільну струмину, та подає потік у змінному режимі;

- уточнено фізичну та математичну моделі руху потоків повітря у змінному режимі, досліджено і науково обґрунтовано ефективність повітророзподілу двоструминним повітророзподільником та взаємодією зустрічних неспіввісних струмин із можливістю створення динамічного мікроклімату в приміщенні;

- вперше виконано комплексне 4D числове моделювання руху повітряних потоків закрученою та плоскою настільною струминою у виробничих приміщеннях у змінному режимі;

- запропоновано метод отримання багатофакторних емпіричних залежностей для розрахунку повітророзподілу пристроями нового класу у стаціонарному та змінному режимах;

- науково обґрунтовано принципи створення енергоефективних технологій формування у виробничих приміщеннях нестационарного внутрішнього повітряно-теплого режиму вентиляційними потоками з періодичною зміною швидкості і температури повітря;

- вперше отримано експериментальні дані по динамічних та теплових характеристиках струмин, які підтверджують адекватність прийнятої фізичної моделі і допустимість методик її математичного описання; одержано аналітичні залежності, які характеризують вплив стиснення струмини на її параметри; визначено співвідношення незалежних змінних, які забезпечують максимальні показники енергоощадності;

- вперше вирішено оптимізаційну задачу стосовно динамічних, теплових та енергетичних характеристик закручених струмин;

- на основі експериментальних досліджень на фізичних моделях у виробничих приміщеннях при різному завантаженні обладнанням та персоналом визначено раціональні схеми повітророзподілення, оптимальні співвідношення витрат повітря, а також розподілення швидкостей і температур в об'ємі приміщення при формуванні динамічного мікроклімату.

Практичне значення одержаних результатів:

- створено повітророзподільники з поліпшеними аеродинамічними характеристиками (охоронні документи України №40185, № 67530);
- основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, метод розрахунку та підбору розроблених пристроїв, а також концепцію проектування систем повітророзподілу у змінному режимі у виробничих приміщеннях впроваджено на ряді підприємств: Львівському державному ювелірному заводі, ТзОВ «ОВК Проект», ТОВ „Сервіскотломонтаж – Львів”, ІФ «Тепло-електропроект, ПП НВФ «Екоспектр» (м. Львів), ТзОВ «Сантехмонтаж–539», що дозволило забезпечити необхідні параметри мікроклімату в цих приміщеннях;
- розроблено і впроваджено у виробництво нові пристрої системи повітророзподілу, що дозволило ефективно реалізувати уточнену фізичну модель у виробничих приміщеннях у стаціонарному та змінному режимах;
- створено методику проведення енергоаудиту системи кондиціонування повітря у виробничому приміщенні;
- питомий економічний ефект від впровадження енергоощадних технологій становить 165 – 196 грн/(рік тис.м³/год), а ефект по галузі 3,5 – 4,0 млн.грн/рік;
- наукова робота має і соціальні наслідки, оскільки призводить до покращення умов праці на робочих місцях і зменшення впливу технологічних процесів на профзахворювання.

Особистий внесок автора. Теоретичні дослідження, що увійшли в дисертацію, виконані автором самостійно. Особистий внесок здобувача включає постановку мети і завдань дослідження, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, обґрунтування й розроблення принципів методик їх проведення, розроблення математичних моделей, алгоритмів чисельного аналізу; отримання аналітичних, емпіричних та узагальнених залежностей і конструктивних параметрів розроблених пристроїв; якісний і кількісний аналіз результатів, їх інтерпретацію. Конкретний внесок автора дисертації в кожен наукову працю, яка опублікована зі співавторами, наведено на стор. 31 – 35.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались і обговорювались на науково-практичних конференціях НУ «Львівська політехніка» (м.Львів, 2003–2017 рр.); КНУБА (м.Київ, 2010 р.); на Міжнародних наукових конференціях: “Актуальні проблеми будівництва та інженерії доквілля” Львів–Кошице–Жешув (1995, 2000–2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 рр.); “Efektywnosc dystrybucji i wykorzystania ciepla”, ”Perspektywy rozwoju cieplownictwa” та ”Ograniczanie zuzycia energii w systemach grzewczych”, Politechnika Rzeszowska, Solina, 2001–2005pp.; „Внедрение инновационных технологий и перспективы развития систем теплогазоснабжения и вентиляции» (м.Харків, 2008 р.); “Energeticky a ekonomicky efektivna vyroba, distribucia a spotreba tepla”, Kosice, 2008 р.; “Енергозбереження в галузях національного господарства”, Вінниця, 2009 р.; “Збірно-монолітні і збірні попередньо напружені залізобетонні конструкції та мости”, Львів, 2010 р.; “Проблемы энергосбережения” «ENERGIA 2010», Луганск–Симферополь–Львов–Люблин, (2010–2012 рр); Geodesy, Architecture & Construction (2010–2011 рр); в TU Ostrava, 2013р; „Environmental Engineering” 2014, 2017pp, Vilnius, Lithuania; Conference on Process Integration Modelling and

Optimisation for Energy and Pollution Reduction PRES 2014, Prague, Czech Republic 2014 р; “Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції та водо постачання і водовідведення”, Рівне 2015 р; “Екокомфорт”, Львів, 2016 р; “Актуальні проблеми енергоресурсозбереження та екології”, Одеса, 2017 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 36 друкованих праць, зокрема 2 монографії (з них 1 англійською мовою в закордонному виданні (Німеччина); 5 статей у наукометричних базах даних (3 – SCOPUS, 1 – Web of Science, 1 – Corepicus), 15 – у фахових виданнях України, 12 – у міжнародних виданнях, одержано 2 охоронних документи України.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 240 найменувань та додатків, містить 315 сторінок основного тексту, 138 рисунків, 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну та практичну цінність роботи, особистий внесок автора, відомості про апробацію досліджень та публікації.

У **першому розділі** описано вимоги до організації повітророзподілу та способи подачі припливного повітря у виробничих приміщеннях, виконано порівняльний аналіз основних типів припливних струмин та наведено методики їх розрахунку. Проаналізовано переваги і недоліки існуючих пристроїв для подачі повітря в РЗ приміщення у стаціонарному та змінному режимах.

Аналіз літературних даних засвідчив, що вплив рухомості повітря на комфортний стан людини необхідно розглядати в сукупності з температурою, вологістю повітряного середовища приміщення, температурою поверхонь та термічним опором одягу. Крім того, наведено порівняльний аналіз оцінок ефективності повітророзподілу в приміщенні та стандартів оцінок якості повітророзподілення, а саме: оцінка за допомогою ефективного перепаду температури θ ; стандарт ASHRAE Comfort; стандарт ADPI (Air distribution performance index) – показник характеристики повітророзподілу; метод П.О.Фангера із застосуванням діаграм комфорту; метод Г.Е.Штрауба; метод Л.В.Павлухіна і В.Н.Тетеревнікова.

Проаналізовано вплив змінного режиму подачі повітря на самопочуття людини та ефективність її праці. У виробничих приміщеннях для адаптації апарату терморегуляції, покращення самопочуття і зниження втомлюваності працівників, особливо при монотонному характері роботи, гігієнічно обґрунтовано змінювати за періодичним законом один з параметрів, наприклад температуру чи швидкість руху повітря, тобто створювати динамічний мікроклімат. Фізіологічному обґрунтуванню змінного температурного режиму в умовах монотонної роботи присвячені дослідження Ю.Н. Хомутецького, Т.В. Куксінської, В.І. Лисєва та інших. Проведений аналіз показав, що при змінному тепловому навантаженні середнє значення температури $t_{в.сер}$ доцільно стабілізувати саме зміною швидкості руху припливного повітря та його витрати.

Розглянуто та проаналізовано схеми розподілу повітря, які найбільш доцільно застосовувати у стиснених умовах виробничих приміщень із врахуванням затухання припливних неізотермічних струмин. При цьому обґрунтовано, що максимальної ефективності можна досягнути, використовуючи горизонтальні компактні та плоскі струмини з ефектом їх зіткнення та настилення, а також вертикальні закручені потоки.

Організацію повітророзподілу, розрахункові залежності та конструкції повітророзподільних пристроїв розглянуто в працях Г.Н.Абрамовича, М.Й.Гримітіна, В.Н.Талієва, І.А.Шепельова, А.Я.Ткачука, В.П. Корбута, В.Б.Довгалюка, В.О.Мілейковського, а також – Р.Г. Невінза, Д.Рюдберга, Г.Штрауба та ін. Розглянуто та проаналізовано розрахункові аналітичні та графічні залежності для визначення параметрів стиснених компактних, плоских та закручених неізотермічних струмин, а також повітророзподільних пристроїв. Це такі параметри: початкова та поточна швидкість і надлишкова температура, коефіцієнти їх затухання, коефіцієнти стиснення, геометричні характеристики повітророзподільників. В практичних розрахунках визначення результуючої швидкості і надлишкової температури на осі закрученої струмини може здійснюватися по відомих формулах компактних струмин з підстановкою в них відповідних значень коефіцієнтів затухання m і n .

Відтак розглянуто та проаналізовано відомі конструкції пристроїв для подачі повітря згідно з розглянутими схемами. При цьому слід позитивно відмітити ефект взаємодії зустрічних струмин, настилення та закручування потоку. Це призводить до більш інтенсивного затухання параметрів повітряного потоку і досягнення максимально низьких коефіцієнтів m і n , що необхідно у стиснених умовах виробничих приміщень. Кількісне та векторне регулювання витрати дає можливість подачі повітря у змінному режимі. Однак, кількісне регулювання здійснюється дискретно системами VAV (Variable Air Volume) і не створює динамічний мікроклімат, а векторне регулювання не забезпечує енергоощадності та зниження матеріалоємності.

На основі теоретичного вивчення літературних джерел сформульовано завдання і напрямки досліджень та намічено шляхи вирішення проблеми.

У **другому розділі** проведено теоретичні дослідження, які присвячені: взаємозв'язку параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення і теплообміну людини; взаємодії зустрічних неспіввісних струмин; фізичному та числовому моделюванню повітряних потоків у стиснених умовах виробничого приміщення у стаціонарному та змінному режимах; створенню динамічного мікроклімату.

На основі рівняння теплового балансу складено універсальну діаграму комфорту (рис.1), яка дає змогу визначати необхідну швидкість руху повітря в РЗ залежно від температура повітря t_s , радіаційної температури t_R , метаболічної теплоти M та термічного опору одягу R . Ця номограма дає можливість враховувати зміну цих факторів загалом, а не попарно, як на діаграмах Фангера.

Аналітично досліджено взаємодію неспіввісних зустрічних струмин. При цьому складено баланс величин питомої кінетичної енергії E , яка вноситься струминою за одиницю часу, віднесеної до маси повітря в об'ємі приміщення. Вели-

чина питомої кінетичної енергії E , яка вноситься струминою за одиницю часу, віднесена до маси повітря в об'ємі приміщення:

$$E = \frac{Gv^2}{2V} \quad (1),$$

де G і v – відповідно масова витрата, кг/с, та швидкість повітря, м/с; V – об'єм приміщення, м³.

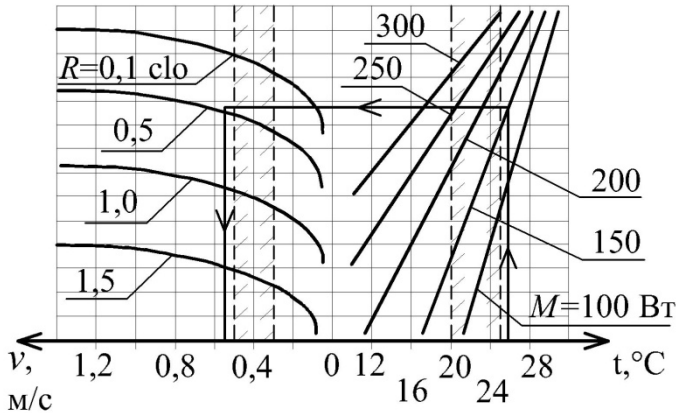


Рис.1. Універсальна діаграма комфорту $v = f(t, M, R)$

де t – температура приміщення, °С;
 M – метаболічна теплота, Вт;
 R – термічний опір одягу, clo.

Розглянемо витікання повітря із щілини (рис.2). У поперечному перерізі плоскої припливної струмини у повітропроводі значення питомої кінетичної енергії для різних точок є різними у зв'язку з нерівномірністю швидкостей виходу повітря. На початку щілини вектор швидкості потоку та повздовжня вісь каналу OZ майже паралельні, а в кінці каналу напрямок швидкості перпендикулярний до цієї осі. Рівномірний розподіл кінетичної енергії в приміщенні можливий, коли алгебраїчна сума питомої енергії $E_{n.c.}$ складових припливних струмин у РЗ буде постійною:

$$\sum E'_{n.c} = \sum E''_{n.c} = \dots = \sum E^{i-1}_{n.c} < \sum E^i_{n.c}. \quad (2).$$

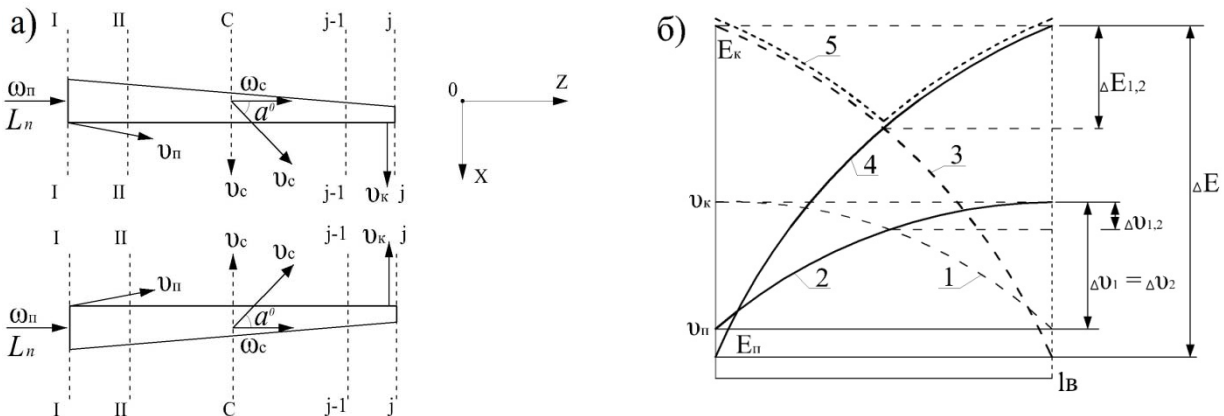


Рис. 2. Зміна швидкості та питомої кінетичної енергії по довжині щілин при витіканні зустрічних струмин, які взаємодіють.

Виділимо узагальнений характерний переріз $C-C$ (рис.2а). Швидкість виходу v_k (рис.2б) з обох розподільних повітропроводів, які виконані у вигляді повітропроводів рівномірної роздачі, є максимальною до площини зіткнення зустрічних плоских струмин. При зіткненні відбувається затухання параметрів струмин

і швидкість їх руху зменшується. Криві 3 та 4 енергії струмини (рис.2б) аналогічні кривим 1 та 2 зміни швидкостей, проте характеризуються значною стрімкістю. Можна припустити, що крива 5 питомої енергії результуючої потоку буде змінюватися більш плавно. Додаючи величини питомих енергій $E_{n.c}$ у відповідних перерізах, одержимо сумарну енергію потоку з близьким до рівномірного розподіленням (рис.2б):

$$(E_1 + E_2)'_{n.c} = (E_1 + E_2)''_{n.c} = \dots = (E_1 + E_2)^{i-1}_{n.c} = (E_1 + E_2)^i_{n.c} \quad (3).$$

При запропонованій схемі взаємодії струмин утворюється результуючий припливний потік з новими аеродинамічними характеристиками. Різний напрям швидкостей двох струмин, що взаємодіють, інтенсифікує переміщення повітря із взаємним погашенням їх початкової енергії (рис.2б).

Належна інтенсифікація затухання швидкості повітряного потоку досягається при використанні ефекту взаємодії струмин. Розглянемо їх зіткнення під деяким кутом α (рис.3). Для оцінки ефекту такої взаємодії потоків було прийнято такі припущення: течія усталена, струмини, що взаємодіють, є слабконеізотермічними, напрям результуючого потоку визначається діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах кількості руху $\overrightarrow{m_1 v_1}$ і $\overrightarrow{m_2 v_2}$.

За законом збереження імпульсу:

$$\overrightarrow{m_1 v_1} + \overrightarrow{m_2 v_2} = \overrightarrow{m_p v_p} \quad (4).$$

Переходимо від векторних до скалярних величин:

$$(L_p \cdot v_p)^2 = (L_1 \cdot v_1)^2 + (L_2 \cdot v_2)^2 - 2 \cdot (L_1 \cdot v_1) \cdot (L_2 \cdot v_2) \cdot \cos \alpha \quad (5).$$

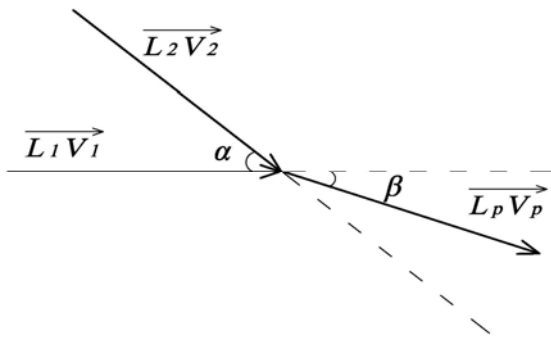


Рис.3. Схема зіткнення струмин під кутом α .

З урахуванням $L_p = L_1 + L_2$, знаходимо результуючу початкову швидкість v_p :

$$v_p = \frac{\sqrt{(L_1 \cdot v_1)^2 + (L_2 \cdot v_2)^2 + 2 \cdot (L_1 \cdot v_1) \cdot (L_2 \cdot v_2) \cos \alpha}}{L_1 + L_2} \quad (6),$$

де L_1 , L_2 , $\text{м}^3/\text{с}$ і v_1 , v_2 , $\text{м}/\text{с}$ – відповідно витрата і середня швидкість повітряних струмин, що витікають, до їх взаємодії, а v_p – швидкість результуючого повітряного потоку після зіткнення струмин, $\text{м}/\text{с}$.

При теоретичному дослідженні взаємодії струмин у змінному режимі (рис.4) розглянуто 3 розрахункових схеми, в яких $L_1 > L_2$, $L_1 = L_2$, $L_1 < L_2$, оскільки витрати L_i є змінними в часі. Для кожної з них записано рівняння закону збереження імпульсу, з якого визначено результуючу швидкість у сумарній струміні. Те, що осі струмин у вертикальній площині не співпадають, дозволяє мак-

симально використати ефект їхньої взаємодії. При цьому виникає пара обертань, яка спричинює закручування потоку та інтенсифікує затухання швидкості.

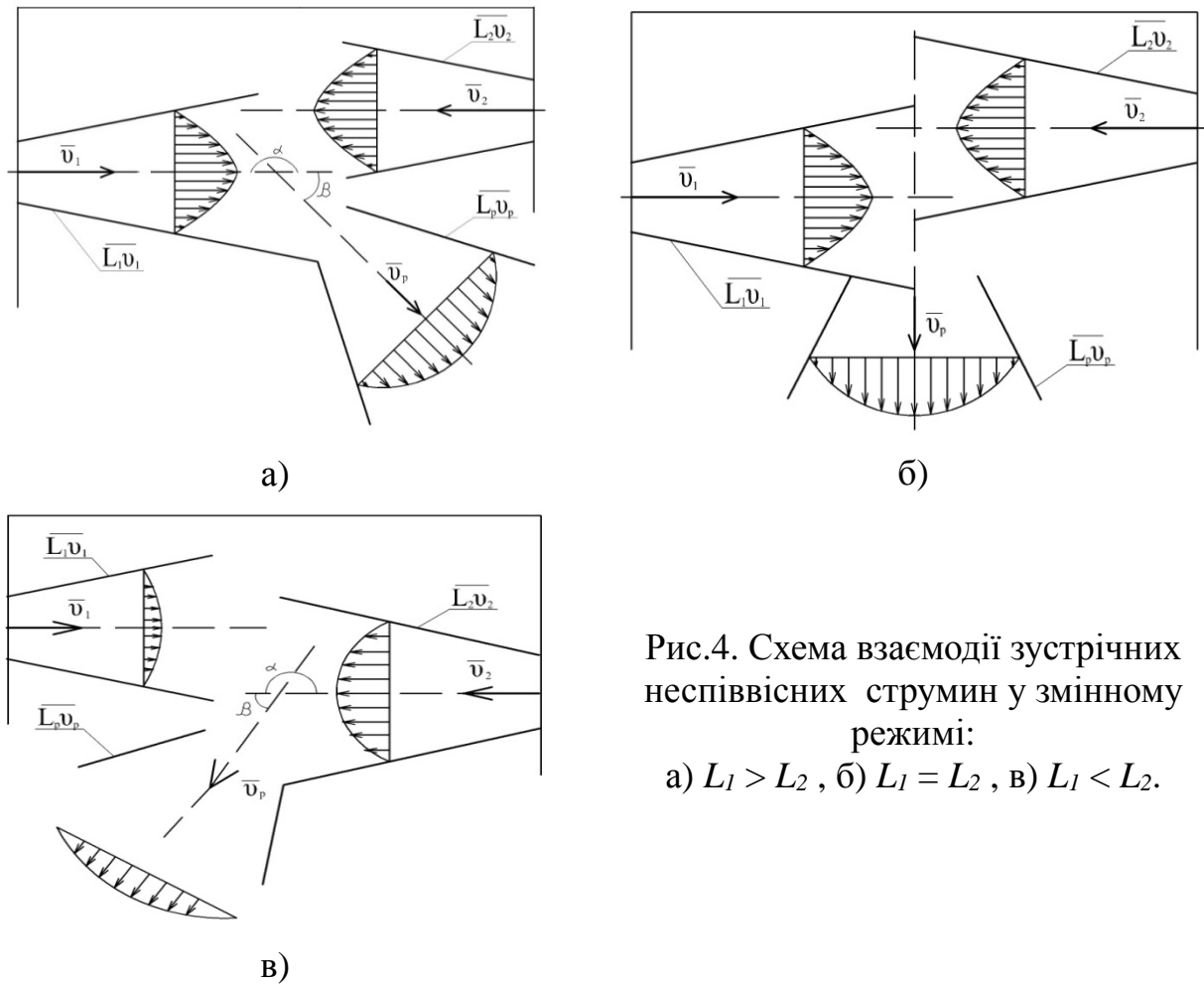


Рис.4. Схема взаємодії зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі:

а) $L_1 > L_2$, б) $L_1 = L_2$, в) $L_1 < L_2$.

Для отримання максимальної енергоефективності повітророзподілу у змінному режимі визначено оптимальні параметри струмин та повітророзподільників. Основними характерними факторами, які в найбільшій мірі впливають на параметри оптимізації, є такі: поточна відносна поперечна координата $\bar{h} = h/H$, відносна відстань між осями зустрічних плоских струмин $\bar{l} = l_o/b_o$, відносна відстань між зустрічними насадками $\bar{x} = x/X_n$ та відносна витрата потоків у повітропроводах $\bar{L} = L_1/L_2$. Критерієм оптимізації є мінімізація швидкості v та надлишкової температури повітря Δt в РЗ, а також коефіцієнтів затухання потоку m і n . Для цього складено систему 4 рівнянь у часткових похідних для перевірки необхідних умов, а для перевірки достатніх умов – визначник Якобіан, у якому на головній діагоналі знаходяться чисті часткові похідні 2-го порядку, а решта елементи – це змішані часткові похідні. Розв'язок засвідчив відсутність стаціонарної точки, а оптимальні параметри знаходяться на кінцях проміжків.

Розроблено фізичну модель вентиляційних потоків у стиснених умовах виробничого приміщення у змінному режимі та науково обґрунтовано закономірності формування закрученої та плоскої настільної повітряної струмини, а також вплив досліджуваних факторів на теплодинамічні характеристики повітряних потоків при забезпеченні інтенсифікації затухання їх параметрів.

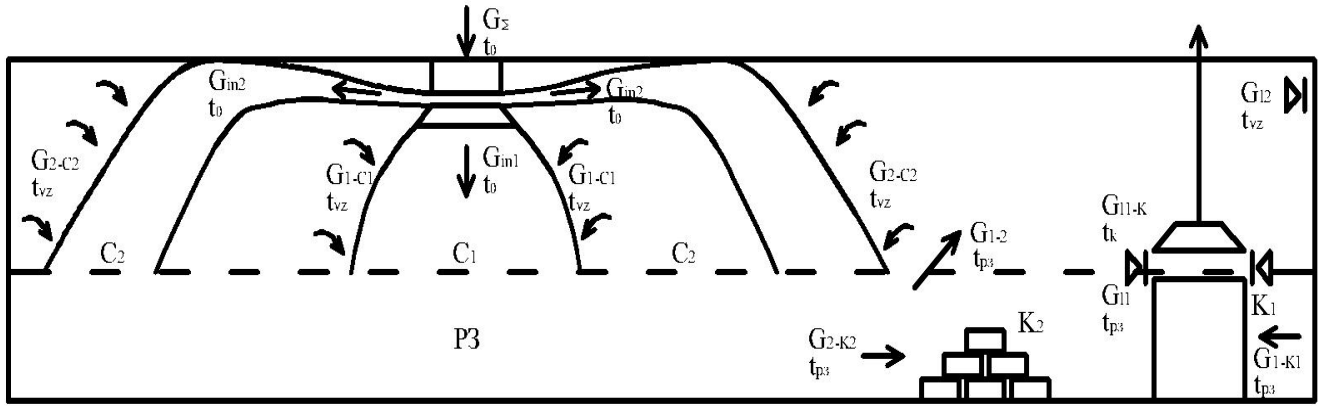


Рис. 5. Схема розвитку закрученої і плоскої настільної струмини у стиснених умовах малогабаритного виробничого приміщення у змінному режимі.

Розглянуто схему подачі припливного повітря у виробниче приміщення за умови забезпечення інтенсивного перемішування припливного повітря із оточуючим, а отже, швидкого затухання швидкості та температури припливних струмин (рис.5). У цьому приміщенні крім РЗ відмічено верхню зону (ВЗ), конвективні потоки K_1 і K_2 у РЗ. Повітря подається у приміщення в кількості G_{in1} закрученою струминою та G_{in2} – плоскою настільною струминою. Припливні повітряні потоки C_1 і C_2 надходять у РЗ. Кількість повітря на підживлення струмин G_{1-c1} і G_{2-c2} . Загальна витрата повітря струмин становить: $G_{C1} = G_{in1} + G_{1-c1}$ і $G_{C2} = G_{in2} + G_{2-c2}$. Відбувається перетікання повітря із РЗ у ВЗ у кількості G_{1-2} . У процесі виготовлення продукції формуються конвективні потоки K_1 і K_2 у незначній кількості. Видалення повітря здійснюється з РЗ витяжним зонтом, що встановлюється над технологічним обладнанням, та з нижньої зони відповідно у кількості G_{11} та G_{12} . Величина G_{11-K} – це конвективний потік, що забирається з РЗ витяжним зонтом, його температура t_k . Живлення конвективних потоків K_1 і K_2 здійснюється за рахунок повітря РЗ у кількості G_{1-K1} і G_{2-K2} . Теплонадлишки зон $\sum Q$ складаються з теплоти обладнання $Q_{обл}$, опалювальних приладів $Q_{o.n.}$, персоналу Q_n , освітлення $Q_{осв}$, продукції $Q_{пр}$, теплоти, що асимілюється місцевою витяжною системою $Q_{м.в.}$, тепловтрат через огороження $Q_{ог}$, тощо (ΔQ):

$$\sum Q = Q_{обл} + Q_{o.n.} + Q_n + Q_{осв} + Q_{пр} + \dots - Q_{м.в.} - Q_{ог} \pm \Delta Q, \quad (7).$$

Для визначення температури РЗ у змінному режимі складено баланс маси повітря (8) і теплоти (9) приміщення:

$$G_{in1} + G_{in2} - G_{11} - G_{12} - G_{11-K} = 0, \quad (8);$$

$$(G_{in1} + G_{in2}) \cdot t_0 - G_{11} \cdot t_{pz} - G_{12} \cdot t_{vz} - G_{11-K} \cdot t_K + \frac{\sum Q}{c_p} = 0, \quad (9).$$

Зміна t_{pz} відбувається за періодичним законом і зображена на рис.6 пунктирною лінією. Оскільки струмина досягає РЗ за час Δt , то початок зміни t_{pz}

настає саме через цей проміжок часу, чим і зумовлено фазове відставання гармоніки $t_{p.3.}$ (пунктирна лінія) від продуктивності вентиляції (суцільна лінія).

Температура в РЗ $t_{p.3.}$ урахуванням змінного режиму витікання струмینی:

$$t_{p.3.} = \frac{G_{11-K} \cdot t_K - \frac{\sum Q}{c_p}}{G_{in1} + A \sin(\omega\tau + \varphi) + G_{in2} + B \sin(\omega\tau + \varphi)} \quad (10).$$

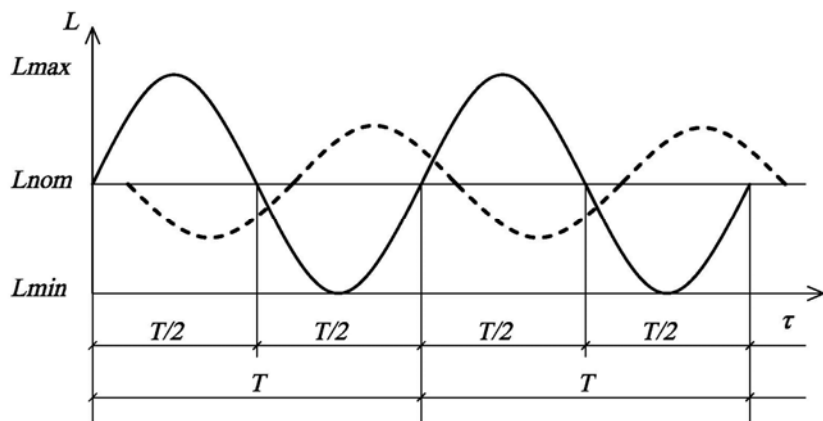


Рис. 6. Періодична зміна продуктивності вентиляції (суцільна лінія) та температури повітря в РЗ (пунктирна лінія).

Було проведено числове моделювання потоку повітря, яке виконувалось за допомогою вирішувача CFD FLUENT (Ansys FLUENT). При моделюванні у даній програмі було прийнято такі спрощення і припущення: внутрішнє повітря є нестискуваним, потік повітря усталений; припливне повітря подавалось дво-струминним повітророзподільником (ДСПР) із утворенням закрученої і плоскої настільної струмینی. Розглянуто розподіл лише повної швидкості у закрученій струміні без врахування її складових (радіальної, аксіальної і тангенціальної). Для виведення рівняння руху необхідно виконання законів збереження маси і енергії, а швидкість зміни трьох компонент імпульсу повинна дорівнювати відповідним компонентам прикладених сил. Розглянуто $k-\varepsilon$ модель турбулентності.

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0, \quad (11),$$

де X , Y та Z – напрями (U , V та W – імпульси) відповідно.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}), \end{aligned} \quad (12);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}) - g(\rho - \rho_0), \end{aligned} \quad (13);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w w) = & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}\right). \end{aligned} \quad (14).$$

Для порівняння розглянуто 2 моделі турбулентності: k - ε модель та однопараметричну модель Спаларта-Аллмараса. При цьому проведено розрахунок системи рівнянь Нав'є-Стокса, усередненої по Рейнольдсу. Для замикання турбулентності, визначено зв'язок між напруженнями за Рейнольдсом і параметрами усередненого потоку за допомогою вказаних моделей.

В пакеті Ansys FLUENT рівняння k - ε моделі відповідно мають вигляд k – рівняння (15) та ε – рівняння (16):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (15);$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (16).$$

Поряд з цим проведено аналогічний розрахунок за допомогою однопараметричної моделі турбулентності Спаларта-Аллмараса, яка в пакеті Ansys FLUENT має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{v} u_j) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}} \quad (17).$$

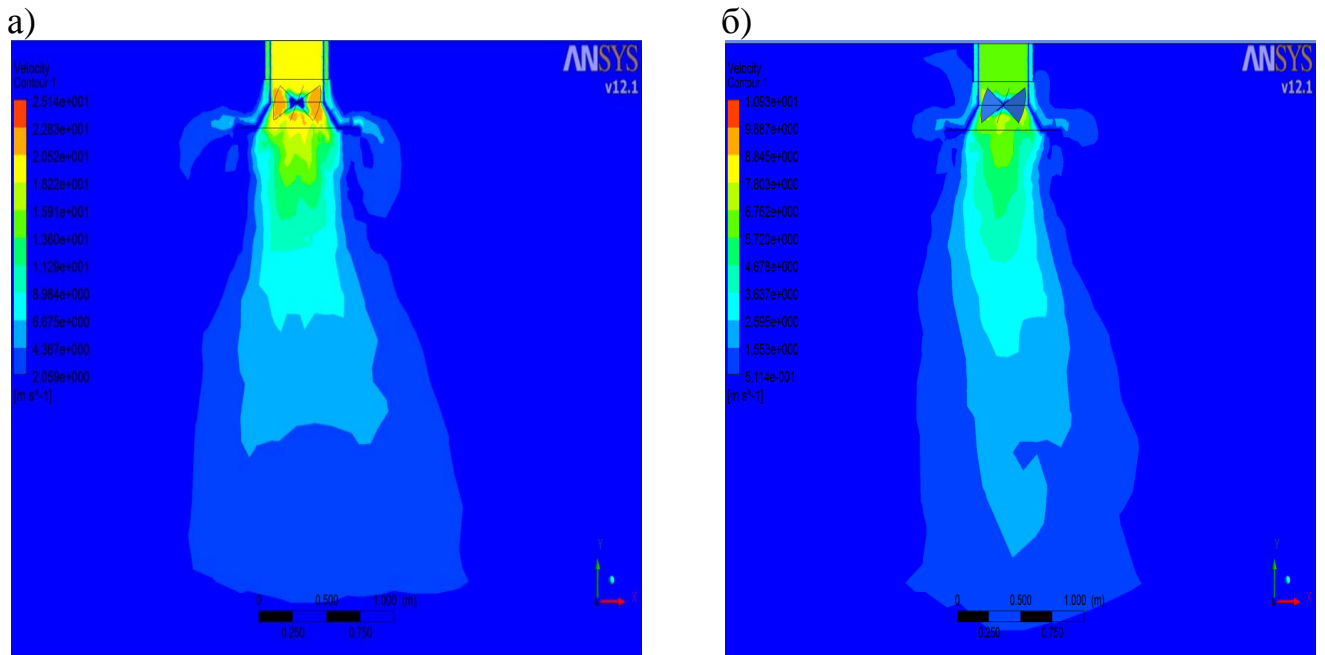


Рис.7. Результати моделювання розподілу швидкостей повітряного потоку по осі ДСПР при куті нахилу закручувальних пластин 60°
 а) – модель турбулентності Спаларта-Аллмараса; б) – k - ε модель.

Припливна закручена струмина за кута нахилу закручувальних пластин 90° близька за своїми характеристиками до прямотечійної. Настільна струмина розвивається незалежно від закрученої, тобто взаємодії струмин немає. При відносній відстані від повітророзподільника $\bar{x}=0,2$ відносна швидкість $\bar{v}=0,75$, а при $\bar{x}=0,4$ – $\bar{v}=0,5$. За кута нахилу закручувальних пластин 60° (рис.7) настільна струмина розвивається теж незалежно від закрученої, взаємодії струмин теж немає. При відносній відстані від повітророзподільника $\bar{x}=0,11$ відносна швидкість $\bar{v}=0,7$, при $\bar{x}=0,2$ – $\bar{v}=0,5$, а при $\bar{x}=0,4$ – $\bar{v}=0,3$. При куті нахилу закручувальних пластин 30° , взаємодія закрученої і настільної струмин відбувається. Інтенсивне падіння швидкості у припливному повітряному потоці відбувається вже у перерізі $\bar{x}=0,2$. Результати моделювання свідчать про суттєве збільшення швидкостей на закручувальних пластинах, а відтак – про турбулізацію повітряного потоку при потраплянні на них.

Числове моделювання було проведено для різних початкових умов: кут нахилу закручувальних пластин приймався 30° , 60° та 90° ; початкова швидкість припливної струмини була в межах $v_0 = 5 - 15$ м/с; моделі турбулентності: $k-\varepsilon$ модель та однопараметрична модель Спаларта-Аллмараса. Порівняння результатів за обома моделями при різних кутах закручувальних пластин та швидкостях виходу струмини засвідчило задовільну збіжність результатів.

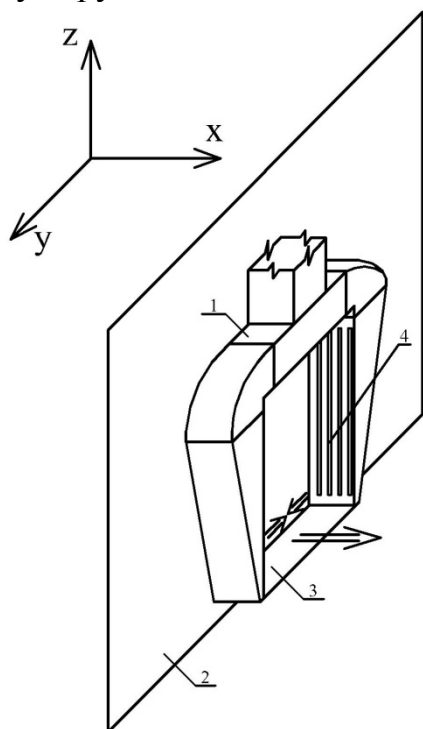


Рис.8. Повітророзподільник із взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин:

- 1 – повітропровід;
- 2 – основа;
- 3 – конструктивна частина пристрою;
- 4 – припливні щілини $b_o=20$ мм.

Запропоновано енергоефективні вентиляційні системи та повітророзподільники нового класу, які здатні утворювати припливні струмини з інтенсивним затуханням швидкості та температури, та мають можливість регулювання витрати повітряного потоку, створюючи динамічний мікроклімат у приміщенні. Це пристрої із взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин (ПВЗНПС) (рис.8) та двоструминний повітророзподільник ДСПР (рис.9) для вентилявання приміщення у змінному режимі, які захищені охоронними документами України.

ПВЗНПС (рис.8) складається з вертикального підвідного повітропроводу, двох розподільних повітропроводів та горизонтального з'єднувального повітропроводу, встановленого між двома вертикальними розподільними повітропроводами. На протилежній стороні розміщено з'єднувальну стінку між розподільними повітропроводами, ущільнювач з тильної сторони повітророзподільника по його периметру, елементи кріплення навісного повітророзподільника. Вертикальний підвідний повітропровід приєднано в центральній частині з'єднувального горизонтального повітропроводу. Розподільні повітропроводи виконані у вигляді повітропроводів рівномірної витрати із неспіввіднесеними опозитними плоскими щілинами при співвідношенні відстані між осями опозитних щілин до їх ширини $\geq 1,5$ (рис.8). Встановлення припливних зустрічних неспіввіднесених насадків у вигляді плоских щілин забезпечує інтенсивне затухання параметрів повітряного потоку, що витікає з цих насадків у робочий об'єм повітророзподільника.

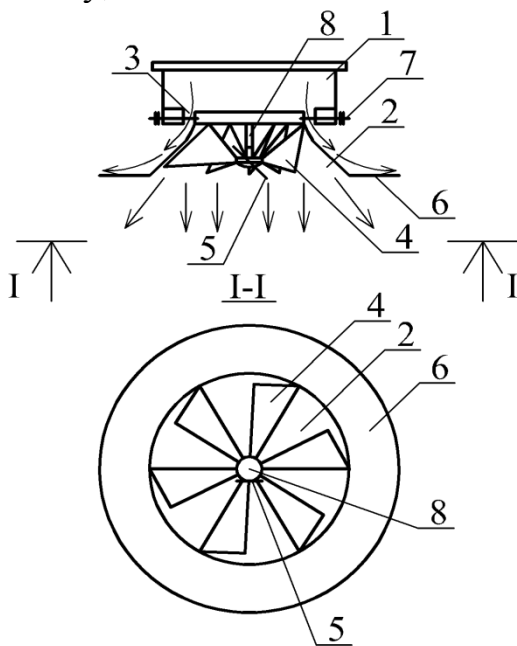


Рис.9. Двострумний повітророзподільник із утворенням закрученої і плоскої настільної струмини:

- 1 – припливний патрубок;
- 2 – дифузор;
- 3 – кільцева регульована щілина;
- 4 – пластини;
- 5 – ручка керування;
- 6 – відбійний козирок;
- 7 – гвинт регулювання щілини;
- 8 – стержень.

Розроблено конструкцію ДСПР (рис.9) з утворенням закрученої і плоскої настільної струмини. Він містить припливний патрубок, встановлений відносно вхідного перерізу дифузора з відбійним козирком з утворенням кільцевої регульованої щілини, додатково містить пластини, які стержнем з ручкою керування прикріплені до дифузора з можливістю зміни кута нахилу, припливний патрубок і дифузор з'єднані гвинтом регулювання щілини. Встановлення рухомих пластин у конструкцію дифузора дає можливість збільшувати кут розширення струмини і утворювати закручену струмину з великою інтенсивністю перемішування припливного повітря із оточуючим, а отже, зменшити кількість припливного повітря не погіршуючи комфортних умов у приміщенні, покращити аеродинамічні показники результуючого повітряного потоку за рахунок зменшення коефіцієнтів затухання m і n . Гвинт регулювання щілини дає можливість змінювати кількість припливного повітря, що проходить через кільцеву регульовану щілину. Розроблено натурну модель запропонованого повітророзподільника із вмонтованим електроприводом Velimo LM24A. Це дає можливість змінювати кут нахилу плас-

тин повітророзподільника, а отже і подавати припливне повітря в необхідному напрямку залежно від необхідних параметрів, забезпечуючи змінний режим у РЗ.

На основі розробленої конструкції повітророзподільника для забезпечення змінного режиму в РЗ запропоновано систему із трьох таких пристроїв (рис.10).

Приєднання електроприводу, який керується від блоку автоматики, дає можливість плавно розподіляти загальну витрату повітря у повітропроводі між трьома повітророзподільниками. Витрата припливного повітря через пристрої змінюється плавно, період задається блоком автоматики, створюючи таким чином змінний мікроклімат у РЗ приміщення.

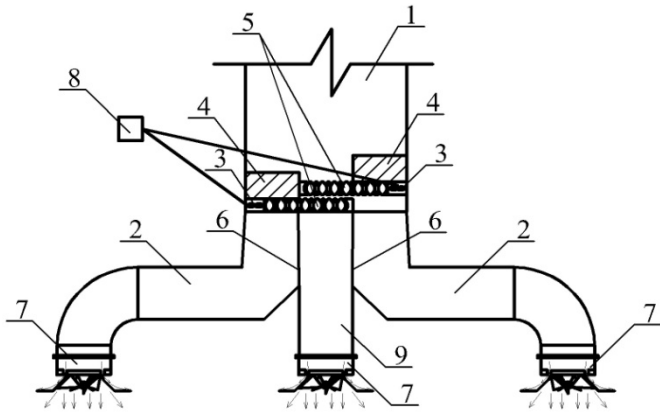


Рис.10. Пристрій для вентиляції приміщення у змінному режимі:
1 – повітропровід; 2 – горизонтальний розподільний повітропровід;
3 – електропривід; 4 – пластина;
5 – ходовий вал; 6 – вертикальна перегородка; 7 – повітророзподільник;
8 – блок автоматики; 9 – вертикальний розподільний повітропровід.

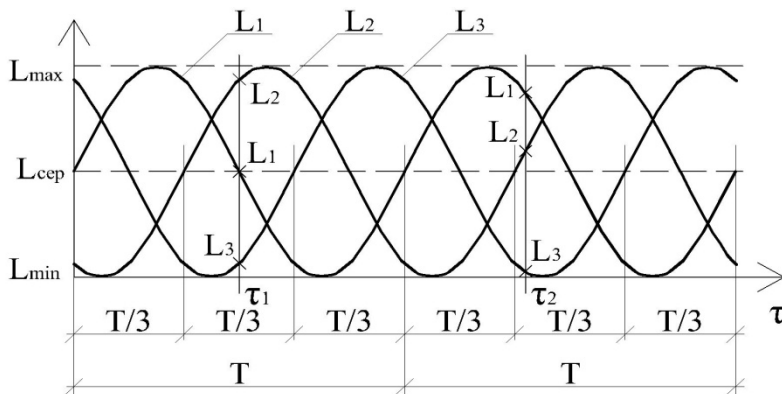


Рис.11. Графіки зміни витрати повітря при витіканні припливних струмін відповідно з кожного з трьох повітророзподільних пристроїв.

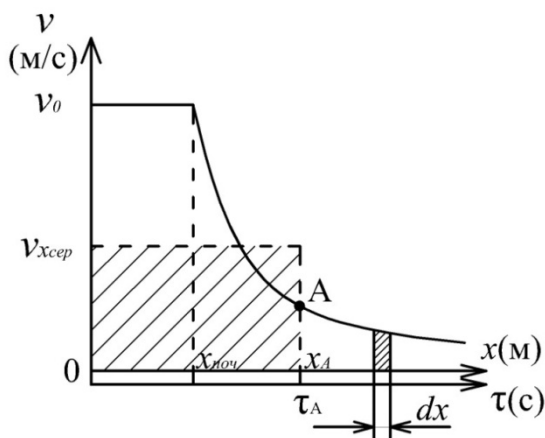


Рис.12. Залежність середньої осьової швидкості від поточної координати x та від часу руху τ .

Розглянуто витікання припливних струмін із запропонованого пристрою для вентиляції приміщення у змінному режимі. Цей фактор відображено на рис.11, де витрата повітря у кожному повітророзподільнику становить відповідно L_1 , L_2 , L_3 , а пристрій загалом забезпечує сумарну кількість повітря L .

Розроблено метод визначення параметрів, зокрема швидкості струмینی при її витіканні у змінному режимі. За змінного режиму параметри залежать від часу та координат одночасно, внаслідок чого не виконується вимога незалежності факторів один від одного, тому така задача не вирішується традиційними методами планування. Для її вирішення зображено залежність швидкості від координати та від часу на спільному графіку з двома осями абсцис: Ox – координата і Ot – час (рис.12). При цьому прийнято припущення і спрощення, що змінний режим підлягає гармонійному закону. Визначено середньо-інтегральну швидкість при гармонійному коливанні початкової та осової швидкості (18) – (19).

$$v_{xсер} + B \cdot \sin(\omega\tau - \varphi) = v_{0сер} \frac{m\sqrt{F_0}}{x} + A \frac{m\sqrt{F_0}}{x} \cdot \sin \omega\tau \quad (18);$$

$$v = \frac{v_{0сер} x_{ноч} + \int_{x_{ноч}}^{x_A} \frac{v_0 m \sqrt{F_0}}{x} \cdot dx}{x_A} \quad (19);$$

$$v = \frac{v_{0сер}}{x_A} (x_{ноч} + m\sqrt{F_0} \cdot \ln \frac{x_A}{x_{ноч}}) \quad (20); \quad \tau_A = \frac{x_A^2}{v_{0сер} (x_{ноч} + m\sqrt{F_0} \cdot \ln \frac{x_A}{x_{ноч}})} \quad (21).$$

У **третьому розділі** наведено планування експерименту, опис установок для проведення експериментальних досліджень повітророзподільника із взаємодією зустрічних неспіввісних компактних (ПВЗНКС) та плоских (ПВЗНПС) струмін, описано процес дослідження, математичне оброблення результатів та їх представлення у вигляді графіків, номограм та аналітичних залежностей. Дослідження проводилися для визначення оптимальних геометричних розмірів повітророзподільників та взаємозв'язку характеристик повітророзподільника та результуючого потоку при взаємодії струмін.

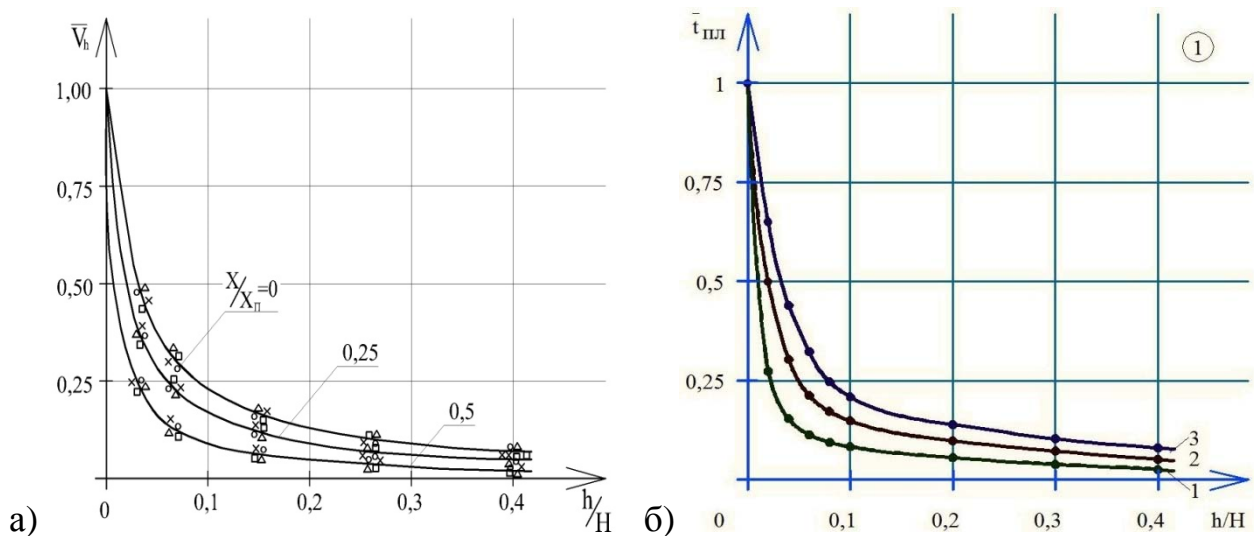


Рис.13. Графік залежності а) відносної швидкості \bar{v}_h та б) відносної надлишкової температури $\bar{\Delta t}_h$ від поточних координат h/H та x/X_n .

Для проведення експериментальних досліджень було складено матрицю планування дробового 4-факторного експерименту 2_{IV}^{4-1} з урахуванням ефекту взаємодії факторів. В якості вхідних факторів прийнято величини: $x_1 = h / H$ та $x_2 = x / X_n$ – відповідно відносні вертикальна та горизонтальна поточні координати; $x_3 = l_o / b_o$ – відносна відстань між осями щілин; $x_4 = L_1 / L_2$ – співвідношення витрат повітряних потоків у розподільних повітропроводах. Функціями відгуку служать відносна швидкість $\bar{v}_h = v_h / v_0$ та відносна надлишкова температура $\Delta \bar{t}_h = \Delta t_h / \Delta t_0$, де v_h та Δt_h – поточні значення швидкості та надлишкової температури результуючого потоку повітря, а v_0 та Δt_0 – відповідно їх початкові значення.

На рис.13а та рис.13б представлено деякі з результатів проведених експериментальних досліджень вимірювання осьової швидкості та надлишкової температури припливного потоку згідно матриці дробового факторного експерименту 2_{IV}^{4-1} . При цьому відносна відстань між осями щілин становила $x_3 = l_o / b_o = 2$, а співвідношення витрат $x_4 = L_1 / L_2 = 2$ (рис.14а) та $x_4 = L_1 / L_2 = 1$ (рис.14б).

Для узагальнення за результатами експериментальних досліджень складено відповідні об'єднані 4-факторні номограми (рис.14) та встановлено функціональні залежності $\bar{v} = f_1(x_1; x_2; x_3; x_4)$, $\Delta \bar{t}_h = f_2(x_1; x_2; x_3; x_4)$. Ці номограми показують графічну залежність п'яти величин, з яких одна є залежною, а інші – незалежні, що відображається різними ключами на рис.14а та рис.14б.

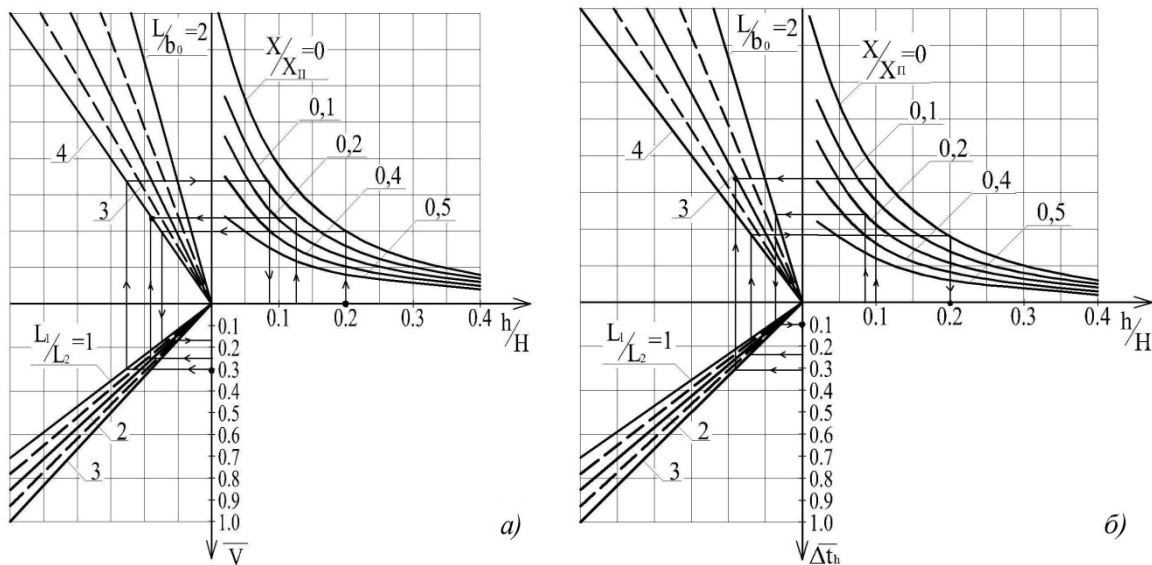


Рис.14. Номограми для визначення відносних параметрів струмини:
а) швидкості \bar{v} ; б) надлишкової температури $\Delta \bar{t}_h$.

Номограми (рис.14) апроксимовано залежностями (22) та (23):

$$\bar{v} = \frac{0,025 \frac{l}{b_0} - 0,05 \frac{x}{X_n} + 0,02 \frac{L_1}{L_2} - 0,01}{1,15 \frac{h}{H} - 0,01 + 0,025 \frac{l}{b_0} - 0,05 \frac{x}{X_n} + 0,02 \frac{L_1}{L_2}} \quad (22);$$

$$\overline{\Delta t_h} = \frac{0,02 \frac{l}{b_0} - 0,035 \frac{x}{X_n} + 0,015 \frac{L_1}{L_2} - 0,007}{1,15 \frac{h}{H} - 0,01 + 0,025 \frac{l}{b_0} - 0,05 \frac{x}{X_n} + 0,02 \frac{L_1}{L_2}} \quad (23).$$

З номограм (рис.14) та формул (22) і (23) видно, що збільшення величин x/X_n та h/H призводить до спадання відносної швидкості та надлишкової температури, а збільшення l/b_0 та L_1/L_2 призводить до їх зростання, що узгоджується з характером процесу.

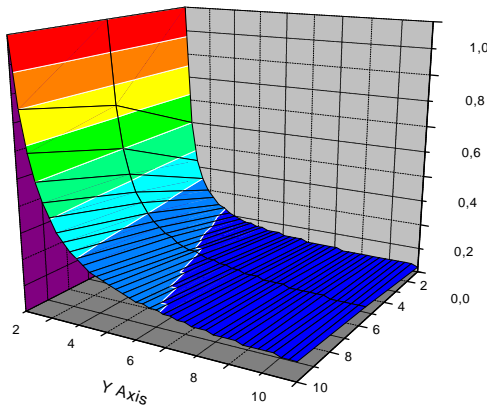


Рис.15. Поверхня розподілу швидкості v результуючого потоку повітря в робочій зоні залежно від x_1 та x_2 .

Доцільним є представити результати досліджень як наочно-геометричну інтерпретацію у 3D форматі (рис.15).

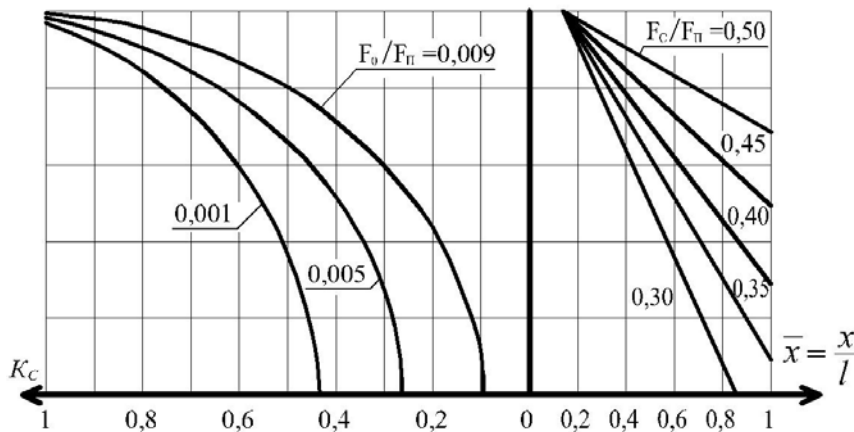


Рис. 16. Номограма для визначення коефіцієнта стиснення k_c плоских настільних струмин залежно від:
- поточної координати x ;
- ступеня стиснення струмини F_0/F ;
- ступеня заповнення приміщення обладнанням та персоналом F_c/F .

Виявлено, що на коефіцієнт стиснення впливають такі фактори: поточна координата x ; ступінь стиснення струмини F_0/F ; ступінь заповнення приміщення обладнанням та персоналом F_c/F , де F_0 , F_c і F – площі відповідно випускного отвору, поперечного перерізу струминного простору і поперечного перерізу приміщення. Визначено узагальнену залежність коефіцієнта стиснення $\overline{k_c}$ від усіх трьох факторів F_0/F , F_c/F та \overline{x} як безрозмірної поточної координати $\overline{x} = x/l$, де l – довжина приміщення (вздовж напрямку розвитку струмини). Побудовано номограму (рис.16.), яку апроксимовано виразом (24).

$$k_c = 0,4 - 52 \frac{F_0}{F} + 0,8 \left(1 - \left(2,87 - 5 \frac{F_c}{F} \right) \frac{x}{l} \right)^2 \quad (24).$$

Визначено коефіцієнти затухання, які знаходяться в межах $m = 0,05 - 0,35$, $n = 0,03 - 0,3$ залежно від початкових умов змінного режиму. При цьому коефіцієнт турбулентного переносу Прандтля $\sigma = 0,65$. Збільшення величини x/X_n призводить до спадання коефіцієнтів затухання швидкості m та температури n для повітророзподільників із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин, що є позитивним, а збільшення l_o / b_o та L_1/L_2 призводить до їх зростання.

У **четвертому розділі** наведено планування експерименту, опис установки для проведення досліджень ДСПР, описано процес дослідження, вказано припущення і спрощення, представлено результати досліджень повітророзподілу закрученою і плоскою настільною струминою та їх математичне оброблення. В ході досліджень встановлено взаємозв'язок характеристик ДСПР та потоків.

При експериментальних дослідженнях закрученої струмини повітря з допомогою вентилятора поступало у камеру статичного тиску, де відбувалося вирівнювання потоку, після цього нагніталось у повітронагрівник, а потім через гнучкий повітропровід в досліджуваній повітророзподільник. Заміри швидкості повітря v здійснювалися термоелектроанемометром testo-405 та координатником із сіткою точок 10 x 10 см.

Для проведення експериментальних досліджень було складено матрицю планування експерименту з врахуванням ефекту взаємодії факторів. В якості вхідних факторів прийнято такі величини: $x_1 = \bar{x} = x/l$, $x_2 = \bar{y} = y/b$ – відносні вертикальна та горизонтальна поточні координати відповідно; x та y – відстань по вертикалі та по горизонталі відповідно від ДСПР та від його осі до розрахункової точки; l та b – відстані по вертикалі та по горизонталі відповідно від повітророзподільника до РЗ; $x_3 = \alpha$ – кут нахилу закручувальних пластин.

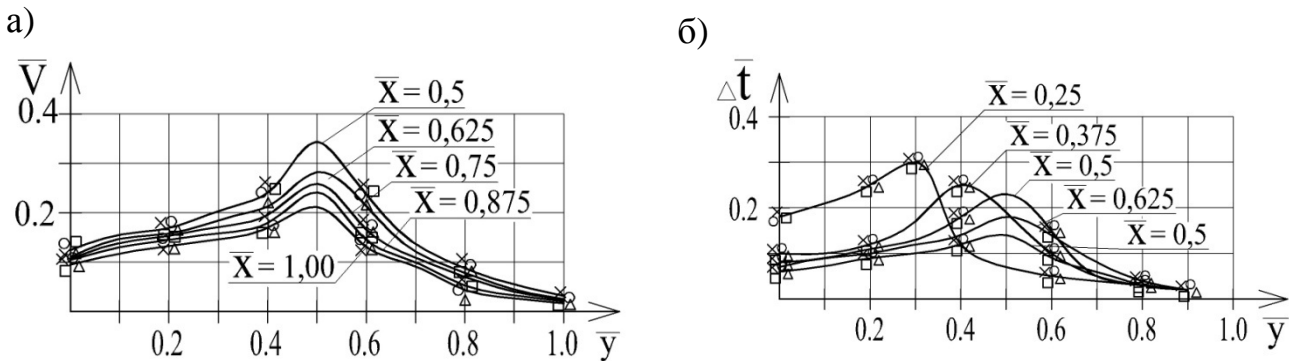


Рис.17. Графічні залежності відносних а) –швидкостей і б) –надлишкових температур закрученої струмини від відносних відстаней від повітророзподільника при куті нахилу закручувальних пластин 30° .

Експериментальні дослідження закрученої струмини проводились при таких умовах та спрощеннях: струмини неізотермічні; лінійні розміри ДСПР не змінювались; кут нахилу закручувальних пластин становив 30° , 60° і 90° ; кількість закручувальних пластин 6 штук; кільцева щілина була закритою.

Рівняння регресії:

$$\bar{v} = 0,699 - 0,331x_1 + 0,091x_2 - 0,014x_3 + 0,091x_1x_2 - 0,014x_1x_3, \quad (25);$$

$$\Delta\bar{t} = 0,643 - 0,323x_1 + 0,1x_2 - 0,025x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,02x_1x_3. \quad (26).$$

Досліджено розподіл швидкостей і надлишкових температур у припливній закрученій струмині на різних відстанях від повітророзподільника і при різних кутах нахилу закручувальних пластин (рис.17). На підставі методів математичної обробки результатів отримано узагальнену номограму для визначення відносних швидкостей залежно від відстані від повітророзподільного пристрою по горизонталі і вертикалі та кута нахилу закручувальних пластин (рис.18).

На основі побудованих графічних залежностей (рис.17) відносних швидкості і надлишкової температури при різних кутах нахилу закручувальних пластин слід констатувати: при куті нахилу пластин 30° у перерізі від $\bar{x}=0,125$ до $\bar{x}=0,250$ вісь закрученої струмини проходить під кутом 18° до горизонталі, а у перерізі від $\bar{x}=0,250$ до $\bar{x}=0,50$ – під кутом 45° . Починаючи від перерізу $\bar{x}=0,50$ вісь струмини є паралельною до осі ДСПР на відстані $\bar{y}=0,50$ від його осі. При куті нахилу пластин 60° у перерізі від $\bar{x}=0,125$ до $\bar{x}=0,375$ вісь закрученої струмини проходить по осі ДСПР. У перерізі від $\bar{x}=0,375$ до $\bar{x}=0,625$ вісь проходить під кутом 45° до горизонталі. Починаючи від перерізу $\bar{x}=0,625$ вісь є паралельною до осі ДСПР на відстані $\bar{y}=0,20$ від його осі. При куті нахилу пластин 90° вісь струмини співпадає з віссю ДСПР, а струмина за своїми характеристиками близька до проточної. При куті нахилу пластин 30° струмина проходить найбільшу відстань від місця виходу з ДСПР до входу в РЗ, внаслідок чого відбувається найбільш ефективно перемішування припливного повітря з оточуючим і з'являється можливість подачі повітря з більшою швидкістю та різницею температур на виході з ДСПР.

За допомогою номограми (рис.18) вирішується обернена задача. При заданій необхідній швидкості у відповідному перерізі ДСПР і на заданій відстані від нього визначається необхідний кут нахилу α закручувальних пластин.

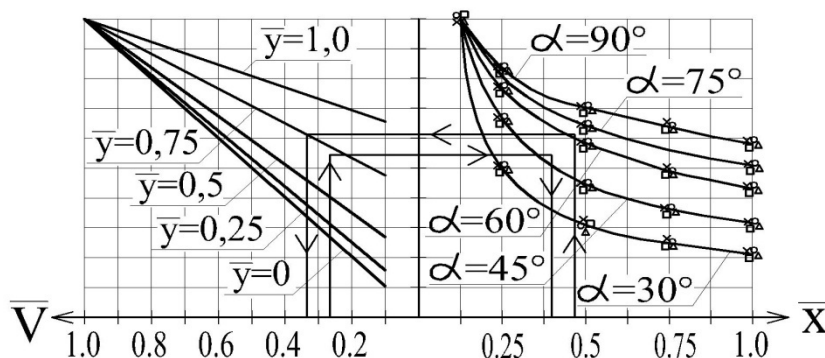


Рис.18. Номограма для визначення відносних швидкостей залежно від відстані від ДСПР по горизонталі і вертикалі та кута нахилу закручувальних пластин.

Таким чином, за допомогою автоматики є можливість задати цей кут і змінювати його залежно від необхідних параметрів на вході у РЗ. Представлену номограму (рис.18) апроксимовано залежністю (27), а аналогічну залежність для визначення відносної надлишкової температури описано виразом (28):

$$\bar{v} = -0,28\bar{y} + (1 + 2,24\bar{y}) \cdot (1,22 - 0,13\bar{\alpha} + (-3,35 + 2,28\bar{\alpha})\bar{x} + (2,09 - 1,51\bar{\alpha})\bar{x}^2) \quad (27),$$

$$\Delta \bar{t} = -0,28\bar{y} + (1 + 2,21\bar{y}) \cdot (1,22 - 0,13\bar{\alpha} + (-3,38 + 2,25\bar{\alpha})\bar{x} + (2,08 - 1,56\bar{\alpha})\bar{x}^2) \quad (28).$$

Експериментальні дослідження закрученої і плоскої настильної струмини проводились за аналогічних умов, як і при дослідженні закрученої струмини окремо, проте в цьому випадку кільцева щілина була відкрита в межах 0 – 80 мм.

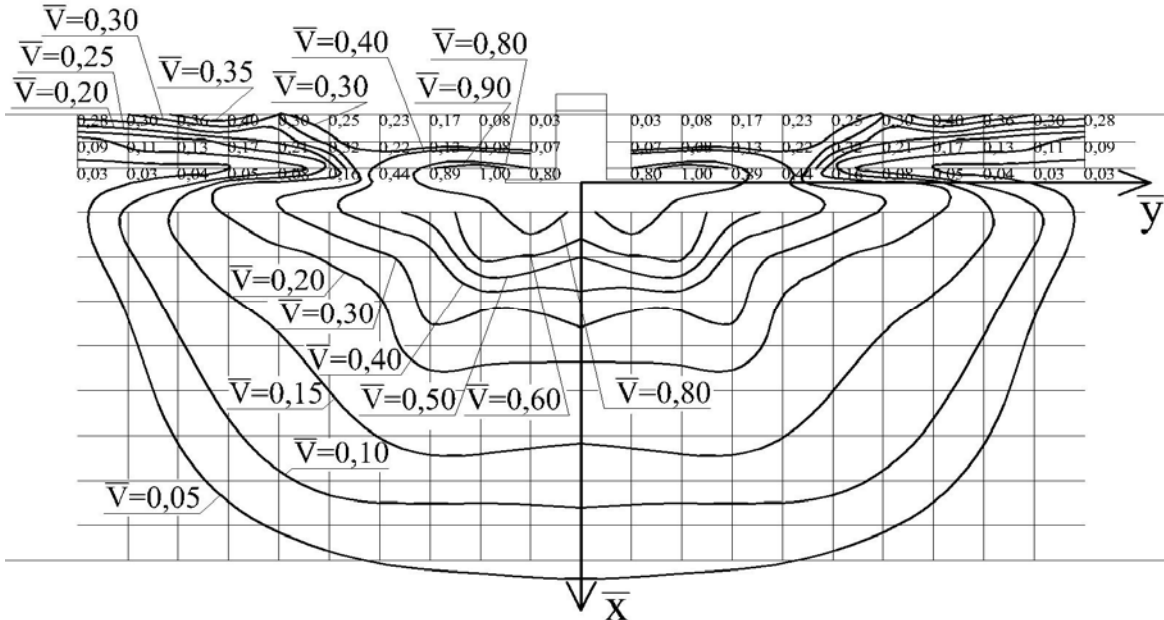


Рис.19. Поля відносних швидкостей при подачі повітря закрученою і плоскою настильною струминою із кутом нахилу пластин 30° .

Побудовано поля відносних швидкостей при подачі повітря закрученою і плоскою настильною струминою (рис.19) та графіки розподілу швидкостей і надлишкових температур у закрученій і плоскій настильній струмині на різних відстанях від ДСПР і при різних кутах нахилу закручувальних пластин (рис.20).

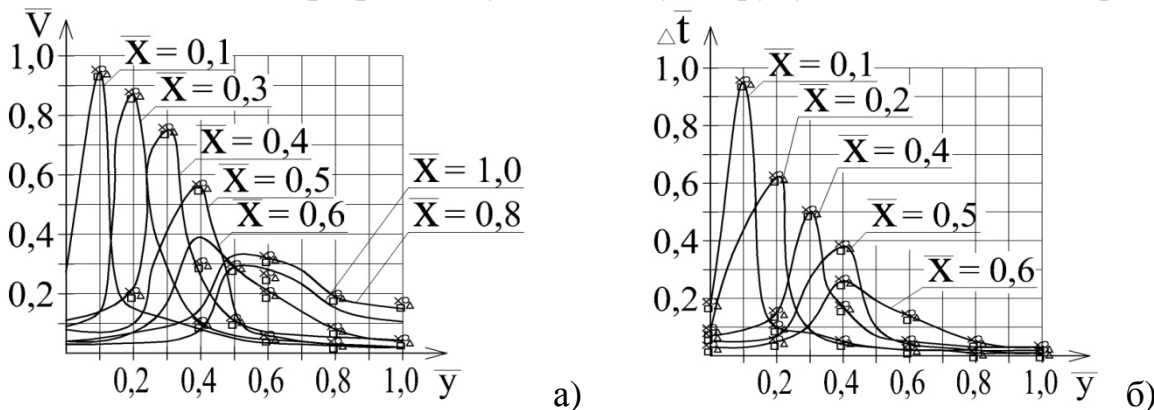


Рис.20. Графічні залежності відносних а) – швидкостей і б) – надлишкових температур повітряного потоку при виході з повітророзподільника закрученою і плоскою настильною струминою при куті нахилу пластин 60° .

Досліджено взаємодію закрученої і настильної струмин (рис.20) при подачі повітря ДСПР. Встановлено поправні коефіцієнти, що враховують взаємодію закрученої та плоскої настильної струмин. З отриманих результатів констатуємо,

що при куті нахилу пластин 30° частина плоскої струмини настилається на сте-лю, а частина взаємодіє із закрученою струминою.

Встановлено чисельні значення коефіцієнтів затухання ДСПР $m = 0,36 - 1,56$ і $n = 0,27 - 1,04$. Збільшення кута закручування α призводить до їх зростання.

На основі експериментальних досліджень визначено аеродинамічний опір запропонованих пристроїв: для ПВЗНПС $\zeta = 2,44$, а для ДСПР $\zeta = 2,9$, причому збільшення кута закручування α призводить до спадання коефіцієнта ζ .

Отже, ефективним, з точки зору затухання швидкості і температури, є використання ДСПР при менших кутах нахилу закручувальних пластин. Проте, з точки зору аеродинамічного опору, ситуація є протилежною. Тому цілком закономірно постає оптимізаційна задача визначення оптимального кута нахилу закручувальних пластин, який задовольняв би відповідним вимогам, як затухання швидкості m і температури n струмини (матеріалоемність системи), так і аеродинамічного опору ζ (її енергоемність).

Для вирішення поставленої задачі введено додаткову функцію ψ , яка об'єднує ці величини і являє собою їх суму. Таке представлення є коректним, оскільки всі ці величини є безрозмірними, залежать від того самого аргументу (кута нахилу закручувальних пластин α) та представлені відповідними аналітичними виразами, тобто $\psi(\alpha) = m(\alpha) + n(\alpha) + \zeta(\alpha)$. Задачу було вирішено графічним та аналітичним способами. Графічно це представляється на рис.21, а в аналітичному вигляді – виразом (29):

$$\psi = 0,02\alpha - 0,24 + 0,5 \left(2,9 - 0,25\sqrt{\alpha - 30} + \frac{90}{\alpha} \right) + 0,013\alpha - 0,115 \quad (29).$$

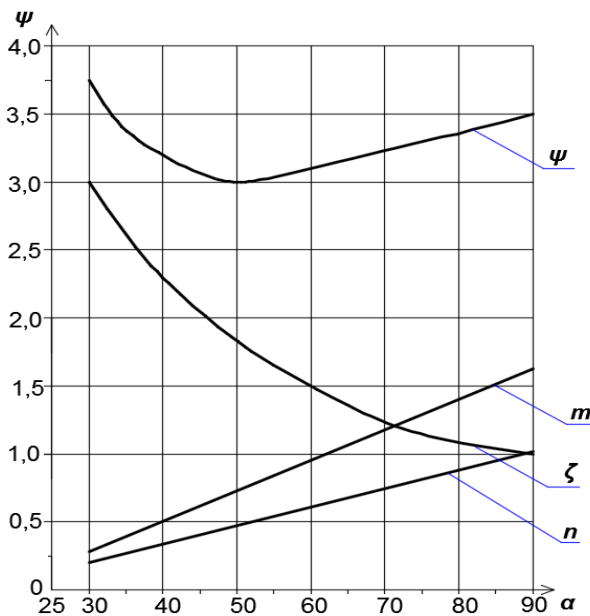


Рис.21. Графік для визначення оптимального кута нахилу α закручувальних пластин.

В ході аналітичного розв'язку отримуємо рівняння 5-го степеня (30), яке було розв'язано методом ітерацій, та отримано результат $\alpha_0 = 52^\circ$.

$$0,1 \cdot \alpha^5 - 4 \cdot \alpha^4 - 46,08 \cdot \alpha^3 - 13824 \cdot \alpha^2 + 51840 \cdot \alpha - 1,55 \cdot 10^6 = 0 \quad (30).$$

Отже, графічним способом отримуємо оптимальний кут $\alpha_0 = 50^\circ$, а аналітичним – з допомогою рівнянь (29) та (30) – збіжний результат $\alpha_0 = 52^\circ$.

Крім досліджень у лабораторних умовах було проведено експерименти в натурних стиснених умовах виробничого приміщення. В результаті визначено поправні коефіцієнти, які враховують стиснення по швидкості та температурі, а також ефект взаємодії закрученої та плоскої настільної струмини, що витікають із ДСПР. Отримано підтвердження адекватності теорії експерименту.

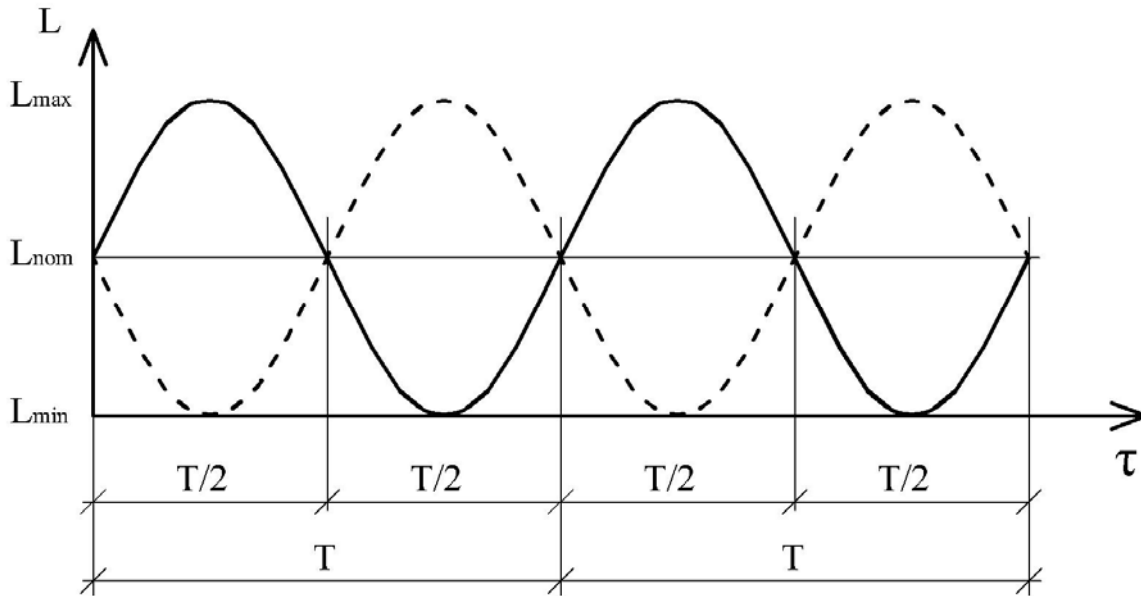


Рис.22. Періодична зміна продуктивності вентиляції (суцільна лінія) та концентрації CO_2 (пунктирна лінія).

Для випадку застосування рециркуляції повітря у системах вентиляції та кондиціонування повітря визначено концентрацію CO_2 в приміщенні у змінному режимі (рис.22), яка представляється формулою (31):

$$C_e = C_{np} + \frac{q_m}{q_v} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-q_v}{V_M} \cdot \tau\right) \right) \quad (\text{мг/м}^3) \quad (31),$$

де: C_e та C_{np} – концентрація CO_2 [мг/м³] у повітрі в приміщенні та у припливному потоці за час τ ; q_m – масова витрата CO_2 , що надходить від джерела забруднення [мг/с]; q_v – повітряний потік, необхідний для вентиляції при усталеному режимі [м³/с]; V_M – об'єм приміщення [м³]; τ – час [с].

Концентрація CO_2 [мг/м³] у припливному повітрі та у приміщенні за час τ у змінному режимі відповідно:

$$C_{np} = \bar{C} + A_2 \sin \omega \tau \quad (32),$$

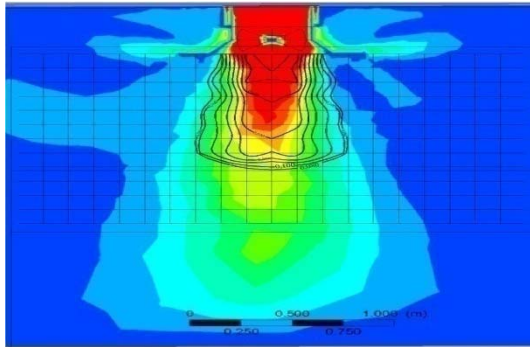
$$C_e = \bar{C} + A_2 \sin \omega \tau + \frac{q_{ms}}{q + A_1 \sin \omega \tau} \left(1 - \exp\left(\frac{\bar{q} + A_1 \sin \omega \tau}{V_M}\right) \right) \quad (33).$$

Вихідними даними для визначення концентрації CO_2 у змінному режимі були результати її експериментальних вимірювань у стаціонарному режимі.

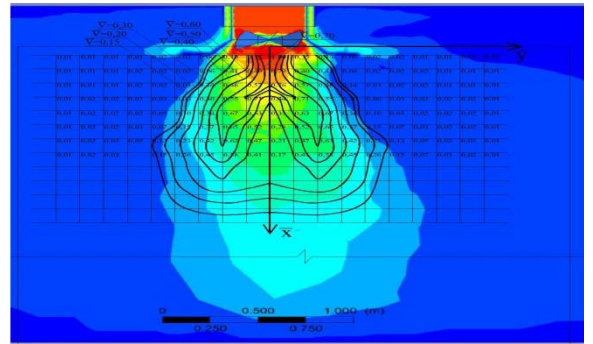
Достовірність результатів експериментальних досліджень було обґрунтовано перевіркою адекватності математичної моделі за критеріями Стюдента, Фішера та Кохрена при границі довірчого інтервалу $\alpha = 0,95$.

У п'ятому розділі виконано комплексне 4D числове моделювання потоку повітря в приміщенні як у стаціонарному, так і у змінному режимі. Моделювання проводилось за допомогою k - ϵ моделі турбулентності та моделі Спаларта-Аллмараса за таких умов: режим руху стаціонарний та змінний; початкова швидкість струмини $v_0 = 5 - 15$ м/с; кути закручувальних пластин 30° , 60° та 90° .

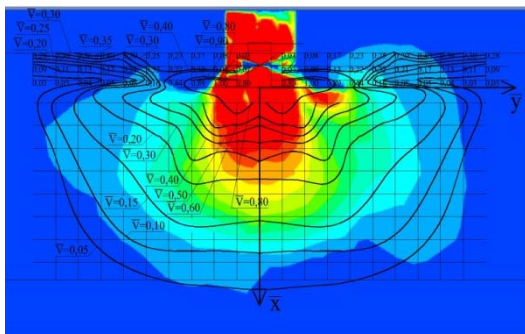
Проведено порівняння результатів, отриманих експериментально та за допомогою обох моделей турбулентності у стаціонарному режимі. Воно засвідчило, що експериментально отримані результати та при моделюванні за допомогою обох моделей турбулентності (k - ϵ та Спаларта-Аллмараса), співпадають (рис.23).



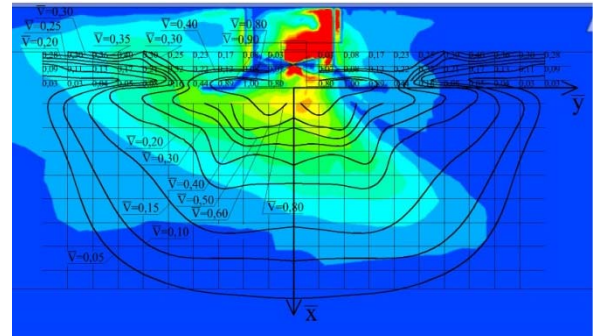
а)



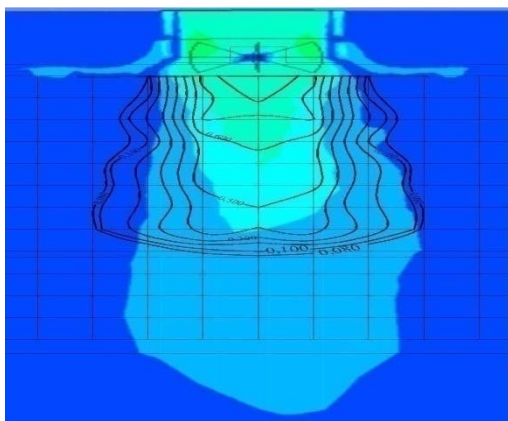
б)



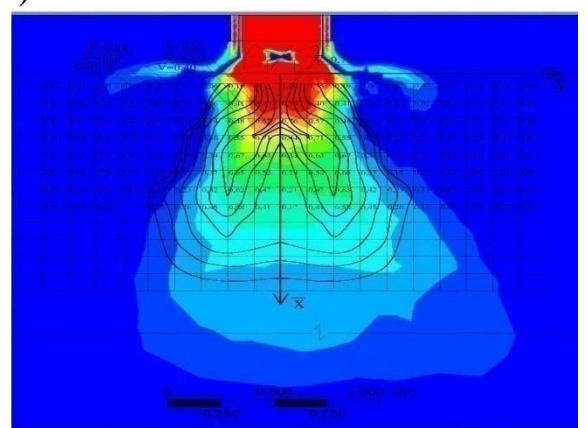
в)



г)



д)



е)

Рис.23. Графіки порівняння експериментальних значень відносних швидкостей із отриманими аналітично за початкової швидкості $v_0 = 5,9$ м/с при моделюванні за допомогою k - ϵ моделі турбулентності та кутах нахилу закручувальних пластин: а – 90° ; б – 60° ; в – 30° та моделі турбулентності Спаларта-Аллмараса та кутах нахилу закручувальних пластин: г – 30° ; д – 90° ; е – 60° .

Так, при куті нахилу закручувальних пластин 60° на відносній відстані від ДСПР $\bar{x} = 0,5$ відносна швидкість на осі струмини $\bar{v} = 0,45$ при лабораторних дослідженнях, $\bar{v} = 0,4$ – при аналітичних (модель Спаларта-Аллмараса) та $\bar{v} = 0,42$ ($k-\varepsilon$ модель); при куті нахилу 30° на цій же відстані швидкість $\bar{v} = 0,13$ при лабораторних дослідженнях, $\bar{v} = 0,1$ та $\bar{v} = 0,15$ при аналітичних розрахунках за допомогою моделі Спаларта-Аллмараса та $k-\varepsilon$ моделі відповідно; при куті нахилу 90° – $\bar{v} = 0,65$ за лабораторними даними, $\bar{v} = 0,61$ та $\bar{v} = 0,63$ при аналітичних розрахунках за допомогою моделі Спаларта-Аллмараса та $k-\varepsilon$ моделі. При куті нахилу закручувальних пластин 90° за своїми характеристиками закручена струмина є близькою до проточної.

Як видно з рис.23, краща збіжність результатів за обома моделями турбулентності спостерігається при більших кутах закручувальних пластин. Стосовно початкової швидкості виходу струмини v_0 , то краща збіжність результатів за обома моделями турбулентності спостерігається при менших початкових швидкостях. Слід відмітити, що взаємодія закрученої і настільної струмин відбувається лише при куті нахилу пластин 30° . При інших кутах нахилу ці струмини розвиваються незалежно одна від одної.

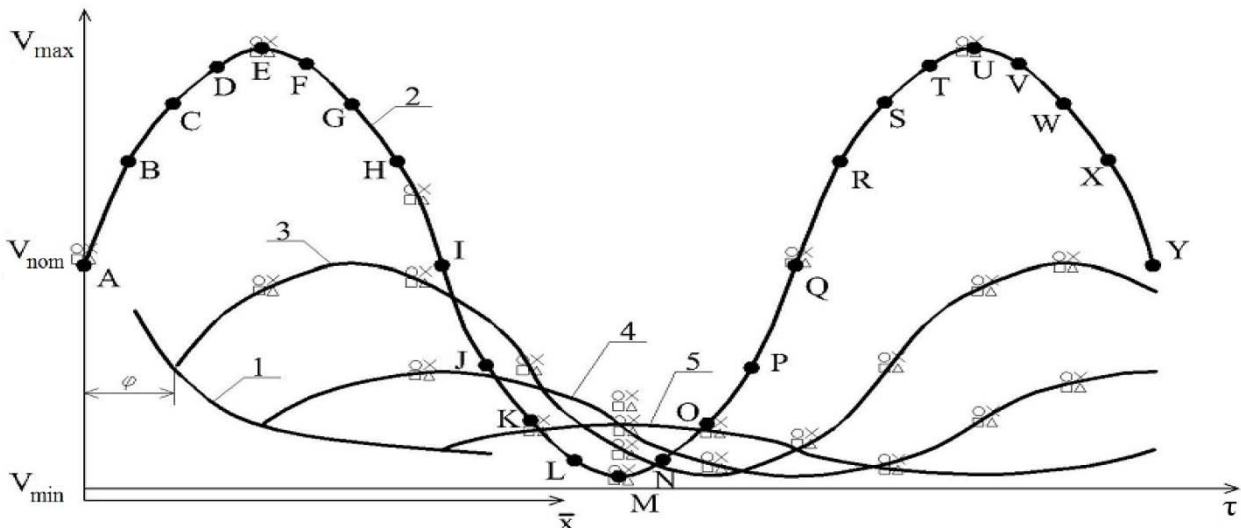


Рис.24. Результати досліджень: 1 – залежність швидкості від координати; 2, 3, 4, 5 – залежності швидкості від часу при різних координатах.

Вперше проведено комплексне 4D числове моделювання потоку повітря в приміщенні у змінному режимі. Розроблено метод визначення динамічної зміни розподілу швидкостей струмини залежно від часу та координат одночасно, в комплексі. Тому для вирішення цієї комплексної задачі запропоновано зобразити графік залежності початкової та осьової швидкості від координати та від часу спільно з двома осями абсцис: Ox – координата і Ot – час (рис.24). Епюри швидкостей залежно від часу фіксувати з певним його кроком, починаючи з т.А, і завершуючи т.Q (початок та закінчення періоду коливань швидкості). На рис.24 ці точки А, В, С і т.д. позначено з кроком часу в $1/16$ періоду T . Їм відповідає кінематичний ряд динамічної зміни розподілу швидкостей тривалістю у півперіоду – від т.А до т.І (рис.25 – 28). Осьові швидкості при різних координатах

залежно від часу (рис.24, лінії 3 – 5) показано на «стоп-кадрах» кінематичного ряду.

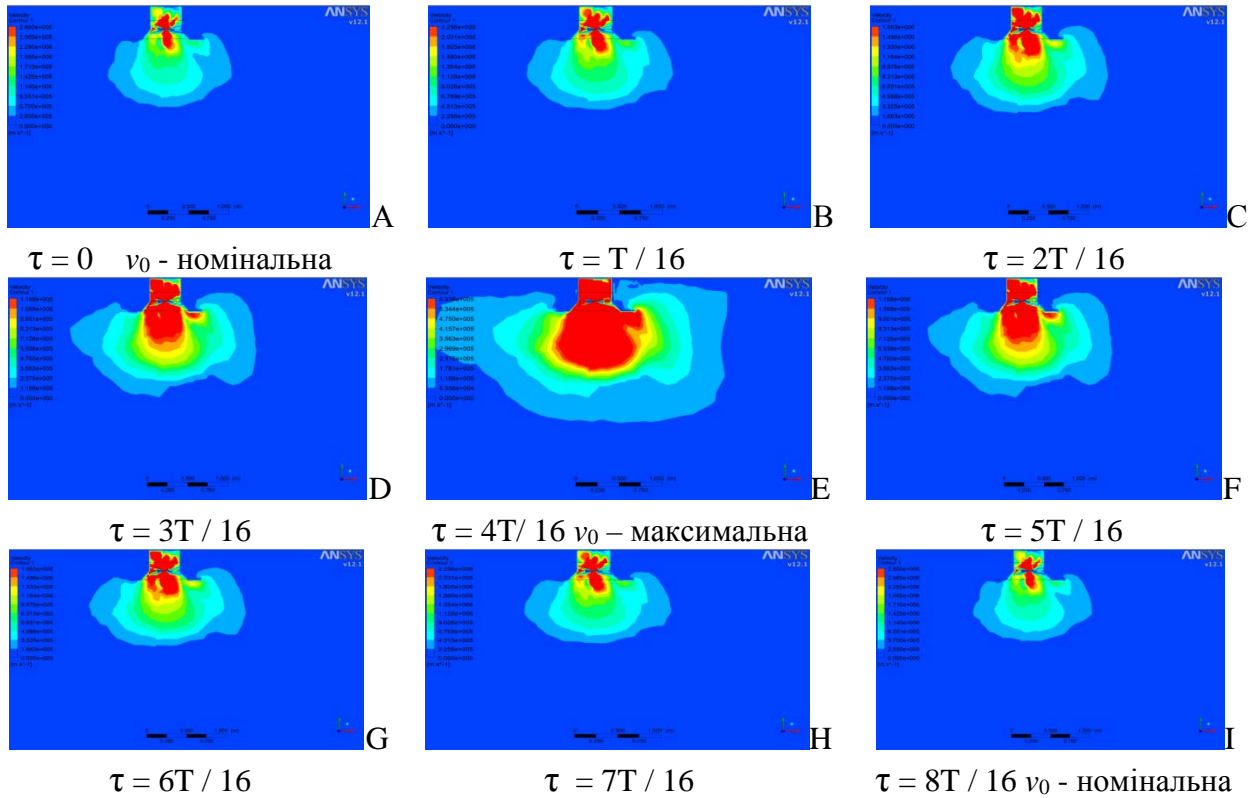


Рис.25. Розподіл швидкостей при куті нахилу пластин 30° (k - ε модель).

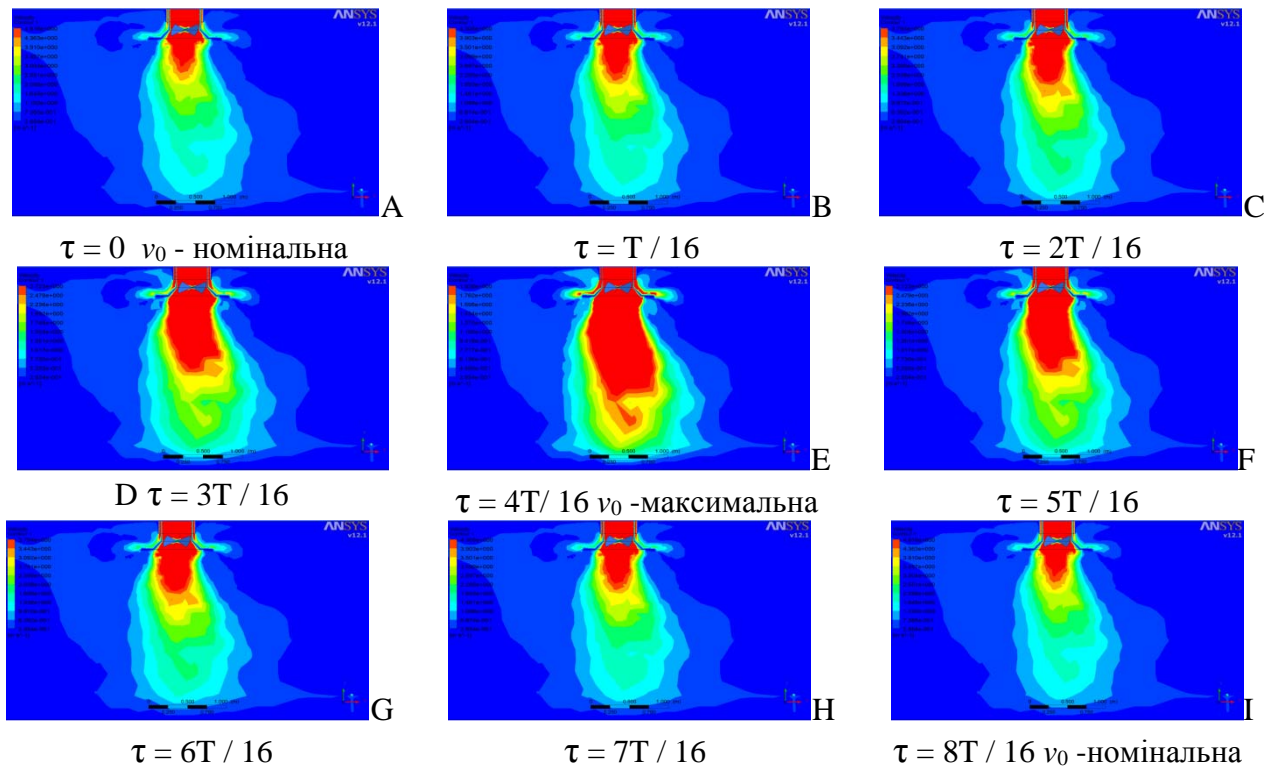


Рис.26. Розподіл швидкостей при куті нахилу пластин 60° (k - ε модель).

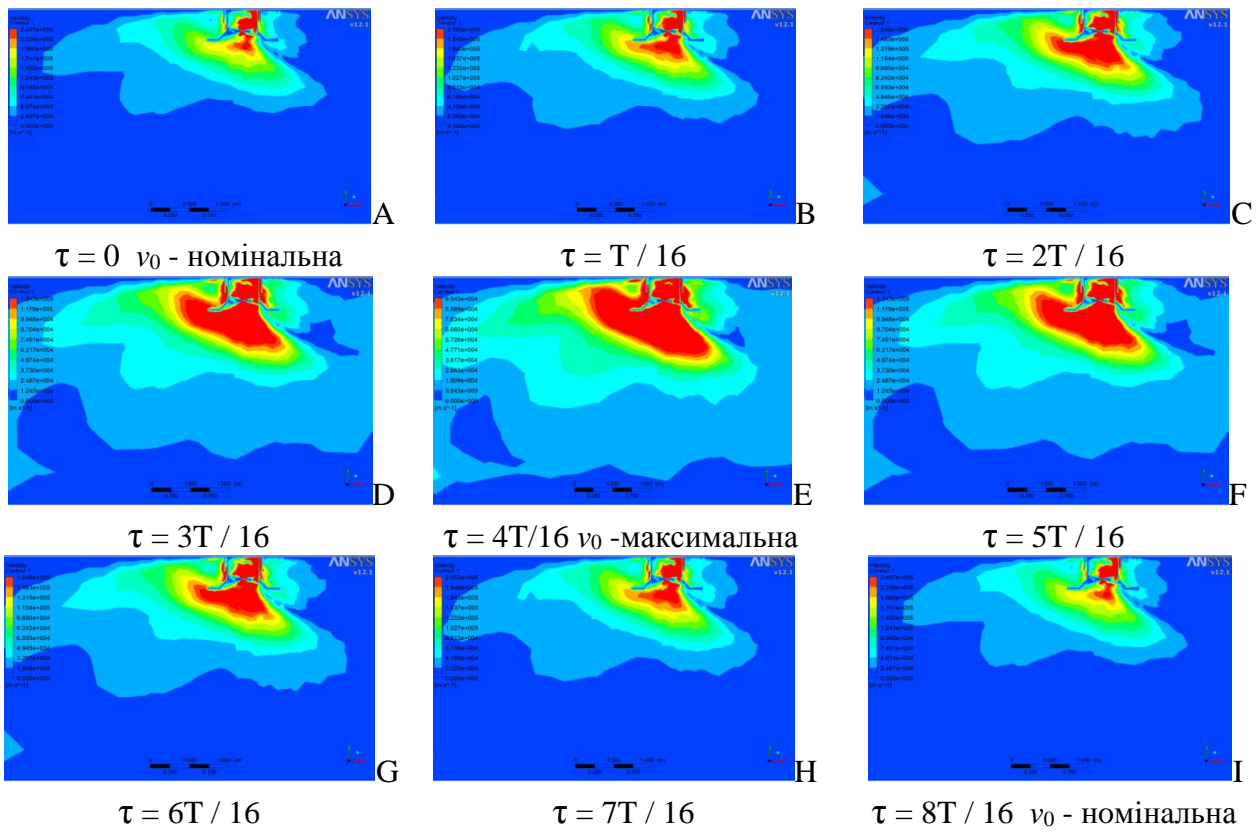


Рис.27. Розподіл швидкостей при куті нахилу 30° (модель Спаларта-Аллмараса).

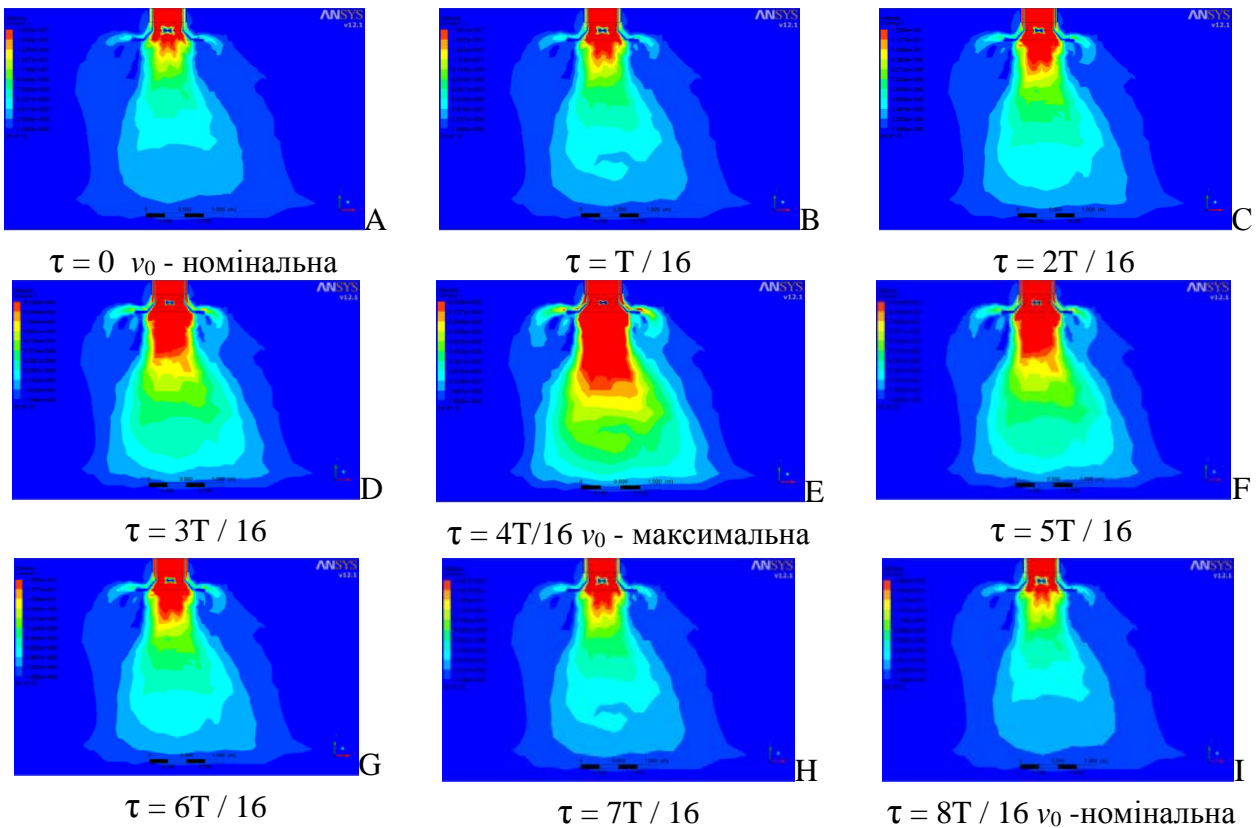


Рис.28. Розподіл швидкостей при куті нахилу 60° (модель Спаларта-Аллмараса).

Комплексне 4D числове моделювання у змінному режимі проводилось за допомогою k - ϵ моделі (рис.25 – 26) та моделі Спаларта-Аллмараса (рис.27 – 28).

На рис.25 – 28 зображено характерні точки *A, B, C* і т.д. згідно з рис.24 та динамічну зміну розподілу швидкостей потоку повітря у перерізі ДСПР за змінного режиму з кроком часу $\tau = T/16$ (1 хв.) при подачі повітря закрученою і настильною струминами за різних кутів нахилу закручувальних пластин та моделей турбулентності Спаларта-Аллмараса і *k-ε* моделі. Порівнюючи динамічні зміни епюр швидкостей за кута нахилу закручувальних пластин 60° при числовому моделюванні за допомогою обох моделей турбулентності, бачимо задовільну збіжність результатів як по закрученій, так і по плоскій настильній струмині.

У шостому розділі на підставі виконаних досліджень розроблено типоряд пристроїв ПВЗНКС, ПВЗНПС та ДСПР (табл.1). Створено метод їх підбору і розрахунку та представлено техніко-економічну ефективність систем повітророзподілу у виробничих приміщеннях при застосуванні пристроїв ПВЗНКС, ПВЗНПС та ДСПР у СВ та СКП у змінному режимі (табл.2).

Таблиця 1

Типоряд повітророзподільників ПВЗНКС, ПВЗНПС та ДСПР.

№ п/п	Тип та довжина, м	Повітропродуктивність, м ³ /год	№ п/п	Тип та діаметр, мм	Повітропродуктивність, м ³ /год
1	ПВЗНКС-1	254 – 678	9	ДСПР-125	135 – 840
2	ПВЗНКС-1,2	254 – 848	10	ДСПР-160	220 – 1245
3	ПВЗНКС-1,5	339 – 1017	11	ДСПР-200	350 – 1825
4	ПВЗНКС-2	424 – 1187	12	ДСПР-250	540 – 2675
5	ПВЗНПС-1	828 – 3318	13	ДСПР-315	855 – 4060
6	ПВЗНПС-1,2	1002 – 4009	14	ДСПР-355	1085 – 5155
7	ПВЗНПС-1,5	1261 – 5046	15	ДСПР-400	1380 – 6540
8	ПВЗНПС-2	1693 – 6774	16	ДСПР-450	1745 – 8275

Таблиця 2

Техніко-економічні показники повітророзподільників.

Параметри	ДПУ-М <i>d</i> 250	4АПР 600x600	1ВПТ 900x595	ДСПР <i>d</i> 250	ПП (1шт)	ПВЗНКС (1 шт)	ПВЗНПС (1 шт)
Капітальні затрати, грн.	3804	3902	4031	2943	3970	3630	2830
Експлуатаційні затрати, грн./рік	483	468	458	446	403	377	377
Річні приведені затрати, грн./рік	1054	1053	1063	888	998	922	802
Питомий економічний ефект, грн./(рік тис.м ³ /год)	166*	165*	175*	–	–	76	196

*Примітка – у відношенні на 1 приміщення.

Розглянувши 5 визначальних енергоощадних заходів (табл.3), проведено енергоаудит енергозатрат на потреби холодопостачання кондиціонування повітря, які значно зменшено в результаті термомодернізації приміщень у дільницях

Львівського ювелірного заводу та виробництва паливних брикетів. Для досягнення максимального ефекту визначено економічно доцільний рівень теплозахисту системи кондиціонування повітря, який є оптимальним як в теплотехнічному, так і в економічному відношенні (табл.4).

Таблиця 3

Характеристики енергоощадних заходів.

№ п/п	Заходи	Енергозатрати до зміни Q_o , [МДж/рік]	Після зміни Q_i , [МДж/рік]	Енергоощадність ΔQ_i $\Delta Q_i = Q_o - Q_i$ [МДж/рік]	Ощадність коштів K_i $K_i = \Delta Q_i P_x^*$ [грн/рік]
1.	Заміна режиму роботи СКП.	9233	6122	3111	622,2
2.	Встановлення ДСПР.	9233	6487	2746	549,2
3.	Встановлення ПВЗНПС.	9233	6750	2483	496,6
4.	Встановлення автоматики.	9233	6122	3111	622,2
5.	Ефект настилання.	9233	8771	462	92,4

*Примітка. P_x - вартість енергозатрат на потреби холодопостачання, грн/МДж.

Таблиця 4

Оптимізація варіантів.

№ п/п	Заходи	Варіанти			
		I	II	III	IV
1.	Заміна режиму роботи СКП.	+	+	+	+
2.	Встановлення ДСПР.		+	+	+
3.	Ефект настилання.			+	+
4.	Встановлення автоматики.				+
	Показники				
1.	Інвестиційні видатки – I (грн.)	2200	5143	5743	11743
2.	Річна економія – K (грн.)	622,2	1171,4	1263,8	1886,0
3.	Простий час повернення – $SPBT$ (рік)	3,54	4,39	4,54	6,23
4.	Коефіцієнт змінної вартості нетто – $NPVR$ (грн.)	+7133	+12428	+13214	+16547
5.	Внутрішній процент повернення – IRR (%)	+10,2	+8,58	+8,33	+6,07

Питомий прибуток від впровадження енергоощадних технологій на час їх експлуатації складає 15 – 16,5 тис.грн. Враховуючи промислові потужності галузевих підприємств м.Львова та Львівської обл., очікуваний прибуток по галузі з урахуванням інфляції прогнозовано складе 20 – 25 млн.грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу існуючих схем повітророзподілу у виробничих приміщеннях, конструкцій пристроїв, їх ефективності та методів розрахунку обґрунтовано необхідність розробки енергоощадних схем повітророзподілу для зменшення матеріалоемності систем завдяки інтенсивному затуханню швидкості і температури результуючого повітряного потоку внаслідок взаємодії зустрічних неспіввісних струмин, а також при подачі повітря двострумним пристроєм закрученою та плоскою настильною струминою у змінному режимі.

2. Узагальнено і поглиблено теорію аеродинамічних і тепломасообмінних процесів при взаємодії зустрічних неспіввісних компактних та плоских струмин, а також закрученої та плоскої настильної струмини у стаціонарному та змінному режимах у малогабаритних виробничих приміщеннях і одержано відповідні теоретичні залежності.

3. Удосконалено методику фізичного моделювання руху повітря і теплообміну у малогабаритних виробничих приміщеннях у стаціонарному та змінному режимах, в результаті якого визначено динамічні та теплові характеристики вентиляційних потоків у виробничому приміщенні при повітророзподілі закрученою і плоскою настильною струминою; удосконалено математичну модель подачі повітря ДСПР при різних кутах нахилу закручувальних пластин за допомогою k - ε моделі турбулентності та Спаларта-Аллмараса.

4. На підставі експериментальних досліджень коефіцієнти затухання для ПВНЗКС та ПВНЗПС становлять $m = 0,05 - 0,35$ та $n = 0,03 - 0,3$ залежно від різних початкових умов, для ДСПР аналогічно $m = 0,36 - 1,56$ і $n = 0,27 - 1,04$, що свідчить про швидке перемішування припливного повітря з оточуючим, а отже, про високу ефективність цих пристроїв. Оптимальним є застосування ДСПР при кутах нахилу закручувальних пластин $50^\circ - 52^\circ$, де задовільняються відповідні вимоги щодо затухання швидкості m і температури n струмини (матеріалоемність), а також і аеродинамічного опору ζ (енергоемність).

5. Виведено теоретичні залежності для розрахунку повітророзподілу запропонованими схемами у стаціонарному та змінному режимі, представлено вплив визначальних факторів на параметри мікроклімату, проведено співставлення відомих теоретичних залежностей із отриманими експериментально і визначено відповідні поправні коефіцієнти.

6. Розроблено метод комплексного 4D числового моделювання повітряних потоків у малогабаритних виробничих приміщеннях у змінному режимі та визначення динамічної зміни епюри швидкостей залежно від часу та координат одночасно, в комплексі.

7. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень пристроїв ПВНЗКС, ПВНЗПС та ДСПР розроблено методику і рекомендації з використання, конструювання, розрахунку і підбору енергоефективних систем повітровозподілу у малогабаритних виробничих приміщеннях у стаціонарному та змінному режимах. Цю методику, основні результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень, а також концепцію проектування впроваджено в проектну практику на ряді підприємств, а також представлено рекомендації з їх ре-

лізації для виробничих приміщень різних галузей виробництва. Розроблено та впроваджено у виробництво енергоощадні технології з використанням повітродозподільників нового класу в малогабаритних виробничих приміщеннях у стаціонарному та змінному режимах.

8. Розроблено та захищено двома охоронними документами України конструкції повітродозподільників нового класу з поліпшеними аеродинамічними характеристиками (ПВЗНКС, ПВЗНПС, ДСПР), які можуть подавати повітря в малогабаритних виробничих приміщеннях у стаціонарному та змінному режимах, інтенсифікуючи затухання швидкості і температури струмини та забезпечуючи енергоощадність повітродозподілу.

9. Виконано економічне оцінювання застосування енергоощадних технологій. Використання ПВЗНКС та ПВЗНПС дає змогу одержати питомий річний економічний ефект відповідно 76 грн./(рік тис.м³/год) та 196 грн./(рік тис.м³/год) порівняно з перфорованою панеллю; застосування ДСПР порівняно з альтернативними варіантами – 165 – 175 грн./(рік тис.м³/год); ефект по галузі складає 2,5 – 3,0 млн.грн / рік, а прибуток із врахуванням інфляції за час експлуатації 20 – 25 млн. грн. Наукова робота має і соціальні наслідки, оскільки призводить до покращення умов праці на робочих місцях і зменшення профзахворювань.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Возняк О.Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у вентиляційній техніці: Монографія / О.Т.Возняк. – Львів: НУ"ЛП", 2010.– 220 с.

2. Kh.Myroniuk. Air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets: Монографія / Kh.Myroniuk, O.Voznyak, I.Sukholova. – LAP Lambert Academic Publishing, 2017. – 42 с.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні концепції створення динамічного мікроклімату взаємодією зустрічних неспіввісних струмин.

3. P.Kapalo. Using experimental measurements the concentrations of carbon dioxide for determining the intensity of ventilation in the rooms. / P.Kapalo, S.Vilceková, O.Voznyak // Chemical Engineering Transactions, impact factor. Vol.39, 2014. ISBN 978-88-95608-30-3; ISSN 2283-9216,– p.1789 – 1794, у виданні, що індексується міжнародною НМБД SCOPUS.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні концентрації диоксиду вуглецю залежно від продуктивності вентиляції у приміщенні.

4. P.Kapalo. Determine a methodology for calculating the needed fresh air / P.Kapalo, S.Vilceková, F.Domnita, O.Voznyak // The 9th International Conference "Environmental Engineering" 22 – 23 May 2014, Vilnius, Lithuania, SELECTED PAPERS, eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9 Section: Energy for Buildings, у виданні, що індексується міжнародною НМБД Web of Science.

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні теоретичного аналізу динамічної зміни якості внутрішнього повітря в приміщенні.

5. Возняк О.Т. Research of device for air distribution with swirl and spread air jets at variable mode. / O.Voznyak, I.Sukholova, K.Myroniuk. // Eastern European

Journal of Enterprise Technologies. – 6/7 (78) 2015. – pp.15 – 23, у виданні, що індексується міжнародною НМБД SCOPUS.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні концепції створення динамічного мікроклімату при повітророзподіленні закрученими струминами.

6. Kapalo P., Voznyak O.T. Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode. // Czasopismo Inzynierii Ladowej, Srodowiska i Architektury, tom XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015). – p.201–210. у виданні, що індексується міжнародною НМБД Copernicus.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні теоретичних досліджень стану динамічного мікроклімату в приміщенні.

7. Корбут В.П. Examining a device for air distribution by the interaction of counter non-coaxial jets under alternating mode. / V.Korbut, O.Voznyak, K.Myroniuk, I.Sukholova, P.Kapalo. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – Vol 2, № 8 (86) 2017. – pp.30 – 38, ISSN 1729-3774 у виданні, що індексується міжнародною НМБД SCOPUS.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі.

8. Возняк О.Т. Вплив взаємодії струмин на повітророзподіл у приміщенні. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 432 “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”, 2001. – с. 27 – 31.

9. Возняк О.Т. Динамічний мікроклімат і енергоощадність. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 460 “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”, 2002. – с.150 – 153.

10. Возняк О.Т. Подача повітря в приміщення настільними охолодженими струминами. / Возняк О.Т. // Наук-техн. збірник КНУБА. Випуск 7 “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”, 2004. – с.12 – 19.

11. Возняк О.Т. Повітророзподільник із взаємодією зустрічних компактних струмин. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 617 “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація.”, 2008. – с. 26 – 30.

12. Возняк О.Т. Повітророзподільник із взаємодією зустрічних неспіввісних плоских струмин в приміщеннях ювелірного заводу./ Возняк О.Т., Миронюк Х.В., Сухолова І.Є. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник. Випуск 12. – К.: КНУБА, 2008 р. – с.3 – 10.

Особистий внесок здобувача полягає в апробації математичної моделі для виробничих приміщень.

13. Возняк О.Т. Інтенсифікація затухання швидкості повітряного потоку взаємодією зустрічних неспіввісних струмин. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “Львівська політехніка” № 677 “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація.”, 2010. – с. 57 – 60.

14. Возняк О.Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “ЛП” “Теорія і практика будівництва”. – 2010. – № 662. – с.84 – 88.

15. Возняк О.Т. Аналіз економічних ефектів при термомодернізації будівель. / Возняк О.Т., Юркевич Ю.С., Желих В.М. // Науково-технічний збірник

“Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”, КНУБА, випуск 14, 2010 р. – с.79 – 89.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні оптимізації енергоощадності в енергоаудиті.

16. Возняк О.Т. Повітророзподіл у пульсуючому режимі./ Возняк О.Т. // Наук-техн. збірник КНУБА. Випуск 15 “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”, 2011, – с.105 – 109.

17. Возняк О.Т. Повітророзподілення у змінному за періодичним законом режимі. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “ЛП” “Теорія і практика будівництва”.– 2012. – № 737. – с.26 – 29.

18. Orest Voznyak. Air distribution by interaction of counter non coaxial air jets at pulsing mode. / Возняк О.Т. // Вісник НУ “ЛП” “Теорія і практика будівництва”.–2013. № 756.– с.310 – 314.

19. Возняк О.Т. Енергоощадність при повітророзподіленні настільними струминами / О.Т.Возняк, І.Є.Сухолова, Х.В.Миронюк // Вісник НУ “ЛП” “Теорія і практика будівництва”. – 2013. № 755. – с.44 – 47.

Особистий внесок здобувача полягає у теоретичному дослідженні економічної ефективності явища настилення струмин.

20. Возняк О.Т. Моделювання повітророзподілення у виробничих приміщеннях комбінованими струминами. / Возняк О.Т., Миронюк Х.В., Сухолова І.Є., Довбуш О.М. // Вісник НУ Водного господарства та природокористування. – Рівне 2015. Вип. 1 (69). – с.180 – 185.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні концепції взаємодії закрученої та настільної струмини.

21. Возняк О.Т. Моделювання повітророзподілу в приміщенні у змінному режимі за допомогою моделі турбулентності Спаларта – Алмараса / Возняк О.Т., Сухолова І.Є. // Вісник НУ “ЛП” “Теорія і практика будівництва”.–2016. № 844. – с.26 – 33.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні методу визначення динамічної зміни епюри швидкостей.

22. Возняк О.Т. Термореновація системи кондиціонування повітря виробничих приміщень. / Возняк О.Т., Сухолова І.Є., Савченко О.О., Довбуш О.М. // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури, випуск № 68, 2017 р. – с.114 – 120.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні економічної ефективності при використанні різних пристроїв.

23. O.Voznyak. Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate. / O.Voznyak, K.Myroniuk, O.Dovbush // 36. “Selected scientific Papers” 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference 2005 Supplementary Issue. Technical University of Kosice. – p. 148 – 152.

Особистий внесок здобувача полягає у встановленні взаємозв'язку між параметрами теплообміну людини та внутрішнього повітря в приміщенні.

24. O.Voznyak. The characteristics of air swirl supply device. / O.Voznyak, I.Sukholova, K.Myroniuk. // SSP – Journal of Civil Engineering. Selected Scientific

Papers. Technical University of Kosice. Vol.7, Issue 1, 2012. ISSN 1336 – 9024, e-ISSN 1338 7278. – p. 95 – 102.

Особистий внесок здобувача полягає у реалізації аналізу стану та перспектив підвищення ефективності двострумінного повітророзподільника.

25. O.Voznyak. Rozvadzanie vzduchu v procese vzajomneho posobenia protismernych nesuosovych prudov vzduhu v pulzujucem rezime. / O.Voznyak, P.Kapalo. // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2012. – № 3. – s. 22 – 23.

Особистий внесок здобувача полягає у теоретичних дослідженнях повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин у змінному режимі.

26. O.Voznyak. Air distribution by swirl air jets at variable regime. / O.Voznyak, I.Sukholova, K.Myroniuk. // In Proceedings: MOTROL “Commission of Motorization and Energetics in Agriculture”, Vol. 14, No 5, – Lublin – Rzeszow, 2012. – с.143 – 146.

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні способів покращення повітророзподілу в приміщенні закрученими струминами у змінному режимі.

27. Orest Voznyak. Vzajomne posobenie protilahlych vzduchovych trysiek pri pulzujucem rezime. / Orest Voznyak // V sb.:Structura stavebni trendy 2013. No III, Ostrava.ISBN 978-80-248-3235-7. – s.243 – 248.

28. O.Voznyak. Rozvadzanie vzduchu v pulzujucem rezime a dynamicka mikroklima v miestnosti. / O.Voznyak, P.Kapalo. // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2013. – № 6. – s. 32 – 34.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні параметрів динамічного мікроклімату при повітророзподілі у змінному режимі.

29. V.Korbut. Energeticka uspora pri rozvadzani vzduchu pomocou prestieranych prudov vzduchu. / V.Korbut, O.Voznyak, P.Kapalo. // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2014. – № 1. – s. 30 – 31.

Особистий внесок здобувача полягає у встановленні впливу ефекту настилання на енергоощадні характеристики системи

30. V.Korbut. Simulation of air flow in a room. / V.Korbut, O.Voznyak // Technicka univerzita v Kosiciach. Stavebna fakulta. Nekonferencny zbornik vedec-kych prac – VEGA 1/0748/11. – 2014. ISBN: 978-80-553-1873-8. – p.323 – 330.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні методики числового моделювання повітророзподілу в приміщенні у змінному режимі.

31. Orest Voznyak. Influence of initial turbulence on characteristics of air jets./ Orest Voznyak // Zeszyty Naukowe Politechniki Czestochowskiej 170. Budownictwo 20, 2014, ISSN 0526-5916, – p.284 – 292.

32. Orest Voznyak. Air distribution in a room at pulsing mode and dynamic indoor climate creation. / Orest Voznyak // Technical University of Kosice. Civil Engineering fakulty. Non-Conference Proceedings of Scientific Papers – KEGA 052TUKE-4/2013. – 2015. ISBN: 978-80-553-2438-8. – p.31 – 36. Cassootherm 2015.

33. V.Korbut. Modelovanie prudov vzduchu v miestnosti v pulzujucem rezime a jeho kvalita. / V.Korbut, O.Voznyak, P.Kapalo, I.Sukholova // Plynár-vodár-kúrenár. – Košice, 2016. – № 1. – s. 19 – 21.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні математичної моделі повітророзподілу в приміщенні у змінному режимі.

34. V.Korbut. Modeling of supply air flow in a room at variable regime by using both k-e and Spalart-Allmaras turbulent model. / V.Korbut, O.Voznyak, I.Sukholova, K.Myroniuk // SSP Journal of Civil Engineering. The Journal of TU of Kosice, vol.12, Issue2, 2017, – p.15 – 22.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні методики числового моделювання повітророзподілу в приміщенні у змінному режимі.

35. Возняк О.Т. Повітророзподільник. / Возняк О.Т., Сухолова І.Є. // Патент на корисну модель № 40185. Бюл. № 6, 25.03.2009. (51) МПК (2009) F24F 13/06.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні конструкції повітророзподільника.

36. Возняк О.Т. Пристрій для вентиляювання приміщення у пульсуючому режимі. / Возняк О.Т., Сухолова І.Є., Миронюк Х.В., Юркевич Ю.С. // Патент на корисну модель № 67530. Бюл. № 4, 27.02.2012. (51) МПК (2012.01) F24F 7/00.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні конструкції пристрою.

АНОТАЦІЯ

Возняк О.Т. Енергоощадні технології формування динамічного мікроклімату у стиснених умовах виробничих приміщень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – Національний університет “Львівська політехніка”, м.Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності повітророзподілу взаємодією зустрічних неспіввісних струмин, а також закрученою та плоскою настильною струминою для забезпечення нормативних параметрів повітря з можливістю створення динамічного мікроклімату в малогабаритних виробничих приміщеннях. Удосконалено математичну модель процесу взаємодії зустрічних неспіввісних струмин та подачі повітря закрученою і плоскою настильною струминою в цих приміщеннях. Показано, що для досягнення максимальної ефективності повітророзподілу необхідно подавати повітря у змінному режимі струминами, що інтенсивно затухають ще до входу в РЗ. Розроблено і досліджено конструкції пристроїв із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин (ПВЗНС) та двострумного повітророзподільника (ДСПР), який утворює закручену та плоску настильну струмину, що забезпечують інтенсивне затухання швидкості і температури результуючого повітряного потоку.

Побудовано графічні та виведено теоретичні залежності на основі проведених експериментальних досліджень, які можуть бути використані у подальших інженерних розрахунках. Розроблено та захищено охоронними документами України конструкції ДСПР для подачі припливних струмин у змінному режимі. Створено методику розрахунку систем припливної вентиляції з використанням цих повітророзподільників, яку впроваджено у виробництво.

Показано економічну ефективність використання розроблених пристроїв порівняно з альтернативними варіантами, наведено питомі показники ефективності повітророзподілу.

Ключові слова: повітророзподіл, повітряні струмини, взаємодія струмин, зустрічні неспіввісні повітряні струмини, закручена струмина, плоска настільна струмина, швидкість, надлишкова температура, динамічний мікроклімат, змінний режим.

ABSTRACT

Voznyak O.T. Energysaving technologies of dynamic climate creation at limited conditions of industrial rooms. – Manuscript.

Dissertation for Degree of doctor of Technical Science on 05.23.03 specialty – Ventilation, lighting and heat and gas supply. – National university “Lviv polytechnic”, Lviv, 2018.

Dissertation is devoted to decision of actual task of air distribution efficiency increasing with interaction of opposed non-coaxial air jets and by swirl and flat spread air jets for providing of normative parameters of air in the industrial rooms. The mathematical model of air distribution efficiency in these rooms is created and air supply with swirl and spread air jets in that type of apartments is improved. It is shown that for reach of air distribution maximal efficiency it is necessary to supply air by air jets, that intensively extinct before entrance in a working area. It is created and explored constructions of air distribution device with interaction of opposed non-coaxial air jets and two-jets air distribution device (TJADD) with swirl and flat spread air jets, that provide the intensive fading of velocity and temperature of resulting air flow.

The construction of TJADD that provide intensively extinct of velocity and temperature of resulting air flow is developed and investigated. The graphical and analytical dependences on the basis of conducted experimental researches, which can be used in subsequent engineering calculations, are shown out. The construction of TJADD for creating dynamic indoor climate is developed and protected with patents of Ukraine.

Method of air distribution calculation with using these air distribution devices is created and is inculcated in project practice on several manufactures of Ukraine. Economical efficiency of designed devices in comparing to the alternative variants, is shown, the specific indexes of efficiency of air supply are presented.

Keywords: air distribution, air jets, interaction of air jets, opposed non-coaxial air jets, swirl air jet, spread air jet, air velocity, exceed temperature, dynamic indoor climate, variable regime.

Підписано до друку 27.08.2018 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 2,2. Обл.-видав. арк. 1,7.
Тираж 100 прим. Зам. 181137.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.