

## ВСТУП

В межах національної проблеми із забезпечення економічної та екологічної безпеки шляхом регулювання енергозбереження суттєва увага приділяється впровадженню інноваційних технологій з підтримання санітарно-гігієнічних параметрів повітря в робочій зоні приміщень. Завдяки повітрообміну підтримуються оптимальні побутові, технологічні й мікрокліматичні умови в приміщеннях. Системи забезпечення мікроклімату також сприяють покращенню умов для технологічних процесів, особливо які впливають на якість продукції підприємств переробної та харчової промисловості.

Для забезпечення повітрообміну за допомогою систем вентиляції та аспірації необхідна відповідна сукупність устаткування й агрегатів для переміщення, розподілення й вилучення забрудненого повітря. Енергоощадність, тобто економічна ефективність, систем вентиляції та аспірації може бути забезпечена шляхом оптимального керування аеродинамічними потоками повітропроводів. Вирішень цієї проблеми потребує розроблення науково обґрунтованих механізмів інтелектуальної підтримки прийняття рішень при розробленні інноваційних проектів з підвищення енергоощадності систем повітрообміну, що створюють сприятливі умови для технологічних процесів. Вирішення цих проблем потребує розробки математичних моделей оцінки енергоємності прогнозованої надійності вентиляційних та аспіраційних систем, а також розроблення енергоощадних конструкцій регулювальних пристроїв й дослідження їх впливу на робочі параметри аеродинамічної мережі.

Однією із причин значної енергоємності та низької надійності систем забезпечення мікроклімату приміщень є відсутність комплексного інструментарію з оцінювання і прогнозування їх стану, який би врахував кількісні та якісні фактори впливу. Математичні моделі, при розробленні яких використовується теорія нечіткої логіки й лінгвістичних змінних та нейро-нечіткі мережі, дозволяють оптимізувати та налаштувати отриману модель згідно з експериментальними даними, що характеризують надійність систем вентиляції та аспірації.

За результатами порівняльного аналізу науково-технічних розробок та досліджень в галузі регулювання потоків аеродинамічних

систем визначено основні переваги та недоліки існуючих регулювальних пристроїв. Підтверджено, що використання в регулювальних пристроях аеродинамічних систем незручнообтічних твердих тіл у вигляді пластин призводить до утворення негативних аеродинамічних явищ, що збільшує енергоємність систем вентиляції та аспірації. Встановлено, що застосування вентиляційних систем з перемінною витратою повітря є ефективним технічним рішенням, так як призводить до загального зменшення витрати повітря. Обґрунтована доцільність використання регулювальних пристроїв аеродинамічних мереж з зручнообтічною формою, що сприяє оптимізації аеродинамічної структури потоку, а також більш точному й плавному регулюванню витрати робочого середовища.

Методом багатofакторного планування експерименту досліджено вплив конструктивно-технологічних параметрів регулювальних пристроїв та концентрації домішок транспортованого середовища на втрати тиску в аеродинамічній мережі. За результатами дослідження робочих параметрів аеродинамічних мереж на експериментальній установці виявлено енергоефективність регулювальних пристроїв запропонованої конструкції з зручнообтікаючими виконавчими елементами. Позитивний результат досягається за рахунок розширення спектру регулювання та зменшення втрати тиску на забезпечення робочих параметрів систем вентиляції та аспірації.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РЕГУЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОТОКІВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТА АСПІРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

## 1.1 Конструкції виконуючих механізмів та регулювальних органів вентиляційних та аспіраційних систем

При проектуванні вентиляційних та аспіраційних систем, в подальшому аеродинамічні системи, з високими швидкостями та збільшенням в зв'язку з цим втрат тиску в місцевих опорах, різко знижуються можливості регулювання системи для роботи в розрахунковому режимі. В результаті в розгалужених аеродинамічних системах витрати електроенергії та теплоти збільшуються через неможливість досягнення розрахункових витрат повітря в найбільш віддалених від вентилятора ділянках. В таких випадках збільшують частоту обертання робочого колеса вентилятора або замінюють його на більш продуктивний за витратою та тиском, в результаті чого збільшується витрата енергоресурсів [6, 13, 16, 59, 72, 95,].

Удосконалення регулювання вентиляційних та аспіраційних систем сприяє підвищенню їх енергетичної ефективності і виробництва в цілому. Найбільш істотний вплив на втрати енергії (напору) потоку аеродинамічного середовища мають місцеві опори. Складність розрахунку аеродинамічних параметрів в регулювальних пристроях обумовлена наявністю в них змін швидкості руху, відриву потоку, виникнення вихроутворень, що призводить до нестабільності турбулентності [6, 11, 13, 16, 17, 42, 59, 84, 103]. Основними причинами невідповідності фактичних витрат робочого середовища проектним на ділянках вентиляційних та аспіраційних систем є [11, 13]:

- неможливість досягнення точної ув'язки втрат тиску в вузлах сполучення (розділення) повітряних потоків через неточне виготовлення та монтаж повітропроводів;

- складність точного розрахунку їх опору: наближеними є коефіцієнти місцевих опорів, значення яких часто відрізняються від прийнятих величин через взаємний вплив близького розташування трійників, відводів та інших джерел місцевих опорів;

– нечіткість налагоджування системи при використанні наявних в теперішній час засобів регулювання (не враховується можливість похибки при осьових замірах швидкостей повітря через зміну цих швидкостей не на осі їх заміру); похибка замірів приладів часто досягає 15-20%;

– недостатньо точне регулювання налагоджувальниками витрати повітря по окремим ділянкам системи через велику трудоемність цієї роботи; при зміні положення заслінок (дросель-клапанів) на одному з відгалужень відбувається перерозподіл витрат повітря в усіх ділянках повітропроводу, тому налагоджувальні операції приходиться повторювати багато разів, поступово наближаючись до проектних рішень.

Класифікація пристроїв для регулювання повітряних потоків в аеродинамічних системах наведено на рис. 1.1 [12, 59, 96].

Регулювання аеродинамічної мережі полягає в штучному зменшенні продуктивності вентиляційної установки від початкової величини до заданої. При зменшенні продуктивності знижується потужність, що витрачається вентилятором, в залежності від способу регулювання [12, 13, 16, 17].



Рисунок 1.1 – Класифікація пристроїв для регулювання повітряних потоків

Регулюємою ділянкою, що має опір  $\Delta p$ , називається ділянка (або вся мережа в цілому), на межах якої тиск повітря залишається незмінним при будь-якому положенні стулок клапана. Коливання тиску на межах регулювальної ділянки допускається в межах  $\pm 15\%$  початкових. При необхідності створення ув'язки відгалужених ділянок мережі, втрати тиску повинні підтримуватись додатковими регуляторами [16].

Основна вимога до регулювальних пристроїв – це можливість плавної зміни продуктивності від максимального значення для даної вентиляційної установки до заданого значення. При цьому регулювальний пристрій повинен відповідати вимогам економічності, тобто бути таким, щоб зменшення витрати повітря відбувалось при найбільшому зниженні потужності вентиляційної установки, що ним споживається.

Осьові вентилятори регулюються, крім того, поворотом лопатей колеса та направляючого апарату, який являється елементом його конструкції. Тому повертання лопатей цього апарату, як і повертання лопатей колеса вентилятора фактично змінює аеродинамічну схему вентилятора, а отже, і його аеродинамічні характеристики. В каталогах аеродинамічні характеристики вказані для різних кутів повертання лопатей колеса і лопатей направляючого апарату, що зручно для вибору вентилятора за заданими умовами [13, 22, 90].

Регулювання аеродинамічних мереж може здійснюватись різними способами (рис. 1.2) [59, 72, 95, 96].

Для регулювання витрат робочого середовища аеродинамічних систем широко застосовують дросель-клапани, регулювальні пристрої, шиברי [13, 16, 17, 20]. Виконавчим елементом у наведених конструкціях є пластина або ряд пластин, перфоровані пластини, при зовнішньому впливі на яких відбувається процес регулювання витрати робочого середовища. Клапани з поворотними стулками найбільш поширені. Клапани шиберного типу служать головним чином для ручного налагоджування.

Багатостулкові клапани з поворотними стулками бувають двох видів: а) паралельно-стулкові (рис. 1.3,а), що мають стулки, площини яких паралельні між собою та обертаються в одному напрямку; б) непаралельно-стулкові (рис. 1.3,б), в яких сусідні стулки

обертаються в протилежних напрямках. Одноступкові (рис. 1.4) та непаралельно-ступкові клапани, в порівнянні з паралельно-ступковими, відрізняються більш плавним регулюванням [12, 96].



Рисунок 1.2 – Способи регулювання продуктивністю вентиляційних установок

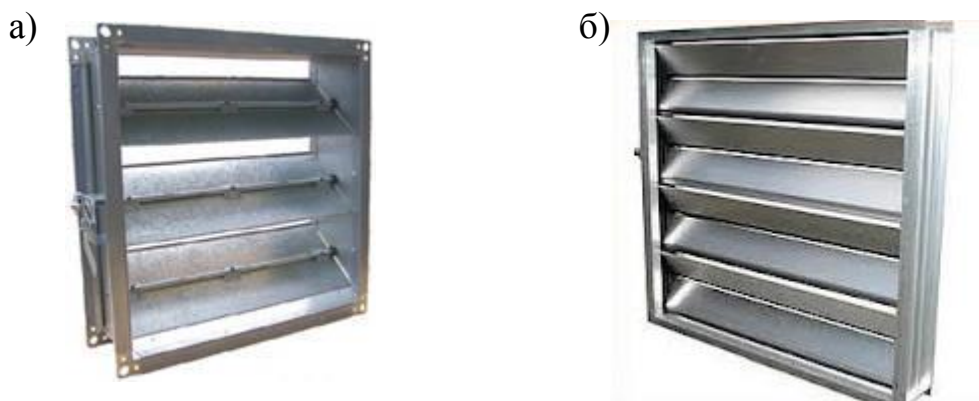


Рисунок 1.3 – Багатоступкові регулюючі клапани з поворотними ступками:

а) паралельно-ступкові; б) непаралельно-ступкові

Аеродинамічні характеристики багатостулкових регулювальних клапанів за даними Л.В. Павлухіна наведено на рис. 1.4 [96].

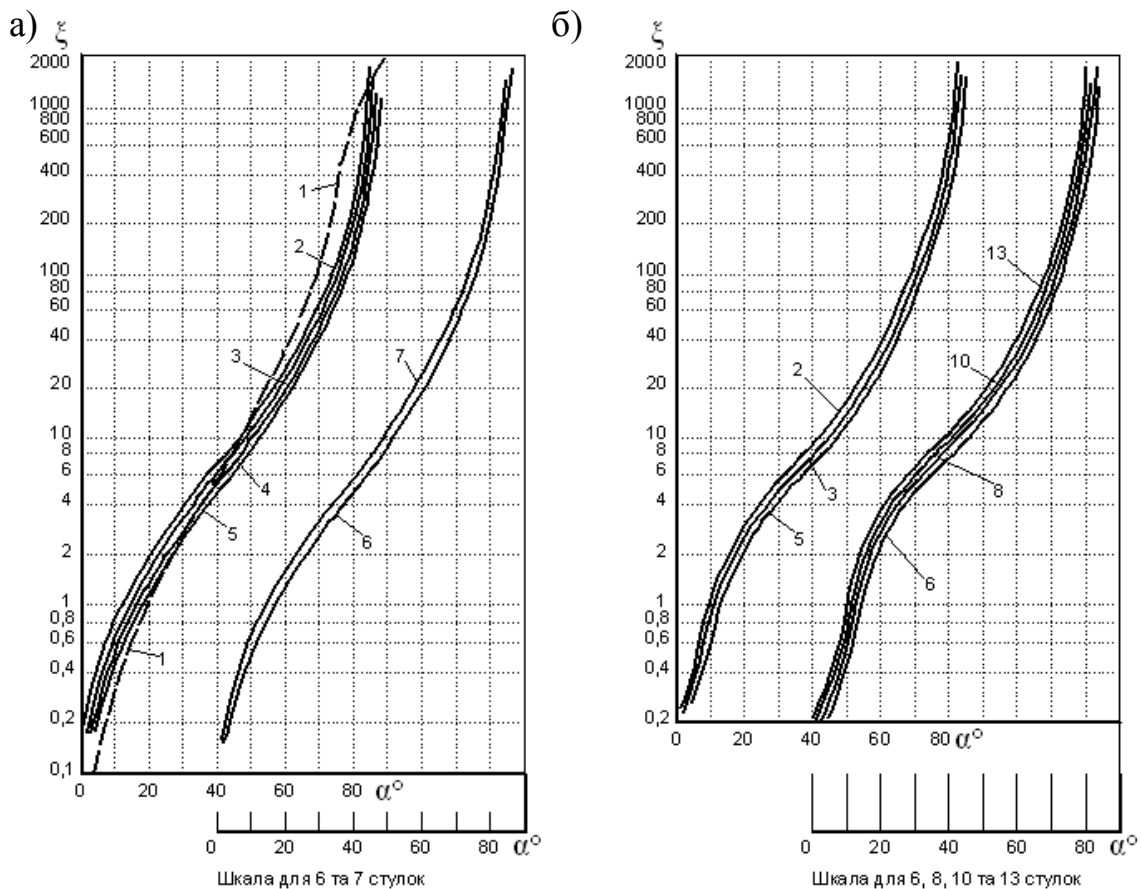


Рисунок 1.4 – Аеродинамічні характеристики багатостулкових регулювальних клапанів: а) неутеплені з 1...7 стулками (криві 1 - 7); б) утеплені з 2, 3, 5 стулками (криві 2, 3, 5) та 6, 8, 10, 13 стулками (криві 6, 8, 10, 13)

Аналіз аеродинамічних характеристик неутеплених багатостулкових клапанів свідчить, що плавність регулювання клапанів з різною кількістю стулок однакова. Але при цьому можлива невелика розбіжність величини коефіцієнта місцевого опору  $\xi$  (рис. 1.4, а).

Аналіз аеродинамічних характеристик утеплених багатостулкових клапанів свідчить про неоднакову плавність регулювання клапанів з різною кількістю стулок. Особливо значна розбіжність спостерігається при кількості стулок 6, 8, 10, 13 шт. в області регулювання при куті повороту стулок від  $10^\circ$  до  $40^\circ$ . Також наявна розбіжність величини коефіцієнта місцевого опору  $\xi$  клапана з

кількістю ступок 6, 8, 10, 13 в вищенаведеній області у порівнянні з кількістю ступок 2, 3, 5 в наведеній області регулювання (рис. 1.4, б).

Аеродинамічні характеристики шиберів в повітропроводах прямокутного та круглого перерізах за даними Вейсбаха наведено на рис. 1.5 [96].

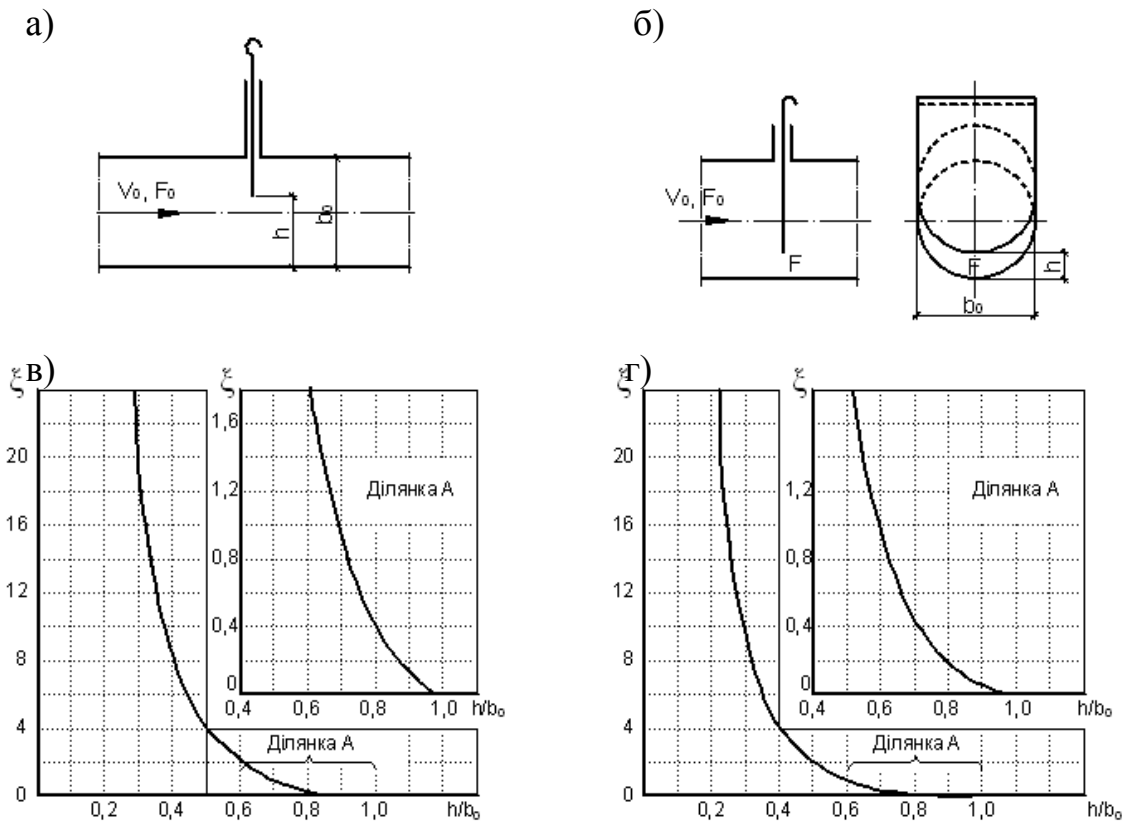


Рисунок 1.5 – Схема та аеродинамічна характеристика шибера:  
 а), в) повітропроводу прямокутного перерізу; б), г) повітропроводу круглого перерізу

Аналіз аеродинамічних характеристик шиберів в повітропроводі прямокутного та круглого перерізів (рис. 1.5 в, г) свідчить, що регулювальний пристрій, виконаний у вигляді шибера в повітропроводі круглого перерізу, має більший розширений спектр регулювання (рис. 1.5, г). Збільшення спектру регулювання в повітропроводах круглого перерізу пояснюється наявністю стабільної аеродинамічної структури течії по перерізу повітропроводу,



впорядкованого градієнта швидкостей, зменшення вихрових зон, у порівнянні з повітропроводом прямокутного перерізу.

Найбільш розповсюдженими є одноступкові дросель-клапани круглого та прямокутного перерізів з ручним і автоматичним управлінням (рис. 1.6).

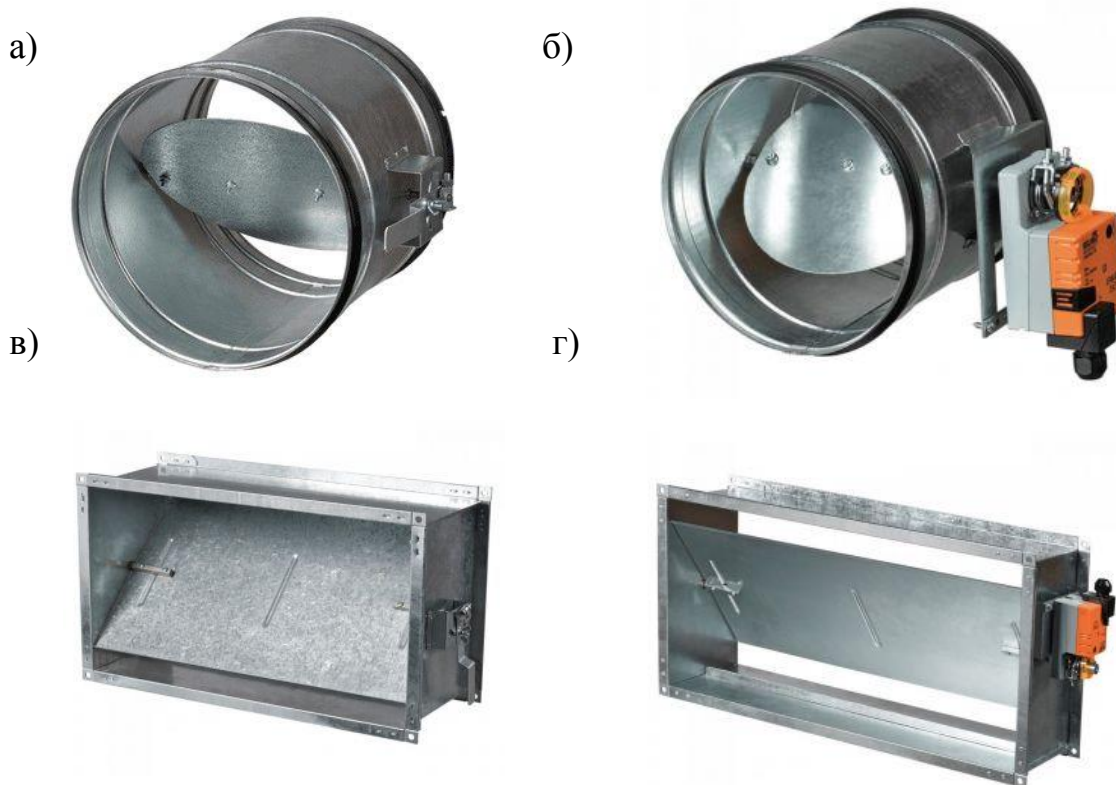


Рисунок 1.6 – Одноступкові регульовальні клапани з поворотними ступками: а), б) круглого перерізу, відповідно, з ручним та автоматичним управлінням; в), г) прямокутного перерізу, відповідно, з ручним та автоматичним управлінням

Для отримання постійної витрати повітря в межах перепаду тиску від 50 до 200 Па використовується регулятор постійної витрати повітря (рис. 1.7), який розміщується всередині повітропроводу [46]. Потік повітря, проходячи через заданий поперечний переріз, змінює свою витрату.



Рисунок 1.7 – Регулятор постійної витрати повітря

Для регулювання витрати повітря на відгалуженнях аеродинамічної системи під час пусконаладжувальних робіт застосовується регулювальна діафрагма (рис. 1.8) [45, 46]. Основним елементом регулювальної діафрагми є диск з отвором перемінного перерізу, що працює за принципом діафрагми фотоапарата.

Для точного регулювання, з похибкою не більше 10%, витрати повітря діафрагма повинна бути влаштована на відстані не менше 1,5 діаметра до найближчого відводу та 2,5 діаметра до трійника або повітророзподільвача.



Рисунок 1.8 – Регулювальна діафрагма

Регулювання продуктивності вентилятора шляхом введення в мережі додаткового опору (дроселювання) на практиці знайшло широке застосування. При введенні в мережу додаткового опору (рис. 1.9) крива переміщується вліво на графіку  $Q - P_v$  [16]. Вліво переміщується і робоча точка вентилятора, відповідно цьому

понижується створювана ним продуктивність. Якщо до введення додаткового опору (дроселя) в мережу вентилятор продуктивністю  $Q_A$  при тиску  $P_{vA}$  споживав потужність

$$N = \frac{Q_A \cdot P_{vA}}{3600 \cdot \eta_A}. \quad (1.1)$$

Після введення дроселя продуктивність знизиться до величини  $Q_B$  при тиску  $P_{vB}$ , а споживана потужність, що витрачається на подолання опору мережі з дроселем, буде рівна

$$N_B \cong \frac{Q_B \cdot P_{vB}}{\eta_B} \cong \frac{Q_B \cdot P_{vB}}{\eta_B} \frac{P_{vB}}{P_{vB}} \cong N_B \frac{P_{vB}}{P_{vB}}. \quad (1.2)$$

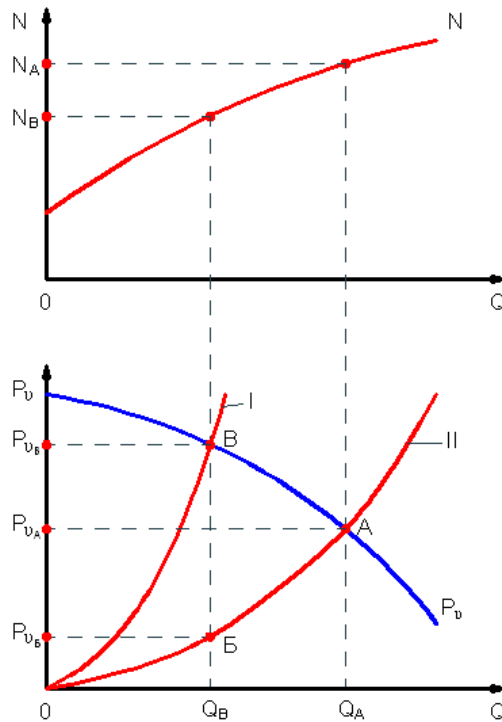


Рисунок 1.9 – Регулювання вентилятора шляхом введення в мережу додаткового опору (дроселя)

Аналіз формули (1.2) свідчить, що значна частина споживаної вентилятором потужності витрачається на подолання опору дроселя.

Згідно графіка (рис. 1.9) регулювання вентилятора шляхом введення в мережу додаткового опору призводить до зниження потужності, про що свідчить крива від точки А до В, яку називають дросельною кривою вентилятора. Отже, ефективність дроселювання в

значній степені залежить від типу вентилятора та конструктивних особливостей регулювальних пристроїв [4].

## **1.2 Аеродинамічні мережі з перемінною витратою та їх регулювальні пристрої**

Одним з складних ефективних технічних рішень є вентиляційні системи з перемінною витратою повітря (VAV – Variable Air Volume) [92]. Зміна теплового навантаження приміщення компенсується шляхом зміни об'ємів припливного та витяжного повітря при його постійній температурі, що поступає від центральної припливної системи. Вентиляційна мережа VAV реагує на зміну теплового навантаження окремих приміщень або зон будівлі та змінює фактичну витрату повітря, що подається в дане приміщення або зону [92]. Внаслідок цього вентиляційна система VAV працює при загальному значенню витрати повітря менше, ніж необхідно при сумарному тепловому навантаженню всіх окремих приміщень. Це забезпечує зниження споживання енергії при збереженні заданої якості повітря всередині приміщення, яке складає 25% та вище у порівнянні з вентиляційними системами з постійною витратою повітря.

Найбільш суттєвими перевагами вентиляційних систем VAV є:

- індивідуальне регулювання параметрів повітря в окремих приміщеннях;
- можливість використання сенсорів руху та кількості діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub>, реле часу та ручних регуляторів для зміни витрати повітря;
- можливість неперервного контролю кількості повітря в окремих відгалуженнях аеродинамічної мережі;
- можливість централізованого керування витратою повітря в пристрої;
- спрощення процесу введення в роботу та налагодження вентиляційної мережі;
- зниження споживання електроенергії.

Однією з основних переваг системи з перемінною витратою повітря VAV є можливість при необхідності зменшення кількості повітря у порівнянні з вентиляційними системами з постійною витратою повітря (CAV). Загальний об'єм витрати повітря в

вентиляційній системі САV обумовлений максимальним тепловим навантаженням, що визначається потребою в припливному повітрі. Але для всієї будівлі при різних режимах експлуатації приміщень, а також нерівномірних теплових навантажень, обумовлених орієнтацією будівлі за сторонами світу, кількості людей в приміщеннях, теплове навантаження в них різне. Коефіцієнт одночасності сучасних будівель в середньому складає 0,7 – 0,8. Внаслідок змінної потреби в максимальній витраті повітря у всіх частинах будівлі доцільно використовувати вентиляційні системи з перемінною витратою повітря VAV, регулятори яких змінюють кількість повітря в залежності від поточної потреби конкретного приміщення. В результаті цього в кожний певний момент часу основний потік повітря направляється в приміщення, в яких є найбільша потреба в вентиляванні. Внаслідок цього такі вентиляційні мережі можуть проектуватись на менші значення витрати повітря, що призводить до зменшення розмірів повітропроводів, необхідної потужності обладнання та, відповідно, зниження енергоспоживання. На етапі проектування виникає необхідність в детальному аналізі зміни поточної потреби в повітрі та оцінці максимальних значень витрати повітря, які в різні проміжки часу змінюються в окремих приміщеннях чи зонах будівлі.

Основним елементом вентиляційної системи VAV є регулятор (термінал) VAV (рис. 1.10), який підтримує задану температуру і витрату повітря в приміщенні. В залежності від сигналу, який передається від температурного регулятора, ручного регулятора, що розміщуються в зоні обслуговування будівлі або приміщенні, здійснюється керування роботою регулятора VAV.

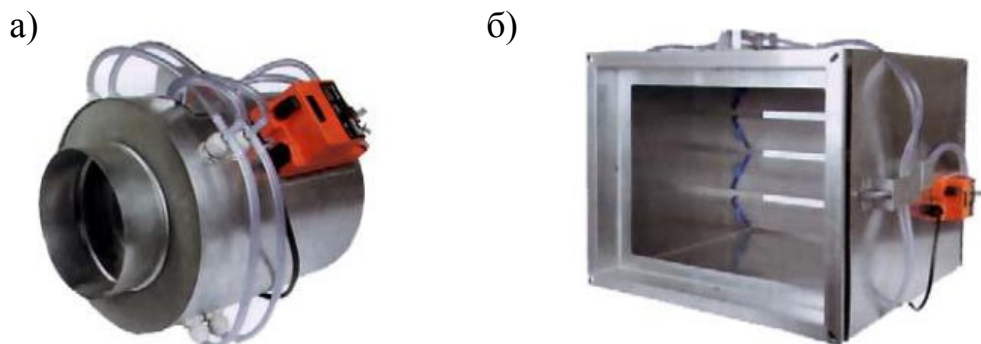


Рисунок 1.10 – Регулятори VAV вентиляційної мережі з перемінною витратою повітря: а) круглого перерізу; б) прямокутного перерізу

При незмінному положенні дросельної ступки витрата повітря змінюється в залежності від зміни тиску в подавальному повітропроводі. Контроль величини кількості повітря не виконується (рис. 1.11) [92].

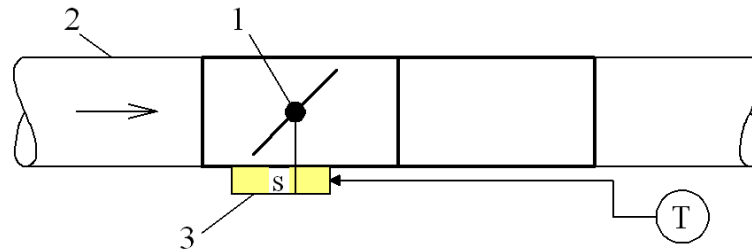


Рисунок 1.11 – Робота регулятора VAV, що залежить від тиску:  
 1 – дросельний засув регулятора; 2 – повітропровід;  
 3 – електропривід дросельного засуву.

Витрата повітря не залежить від тиску в подавальному повітропроводі, так як відбувається постійний контроль значення витрати та підтримання його в заданому діапазоні від  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$  (рис. 1.12).

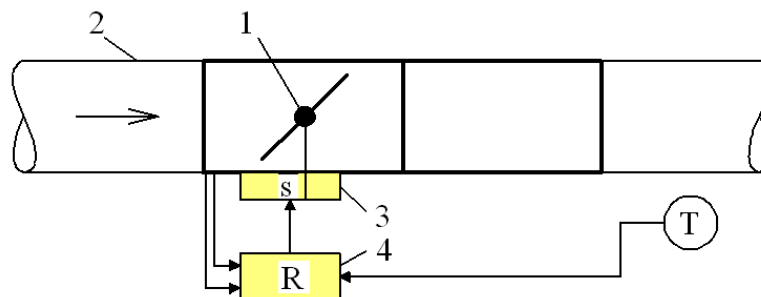


Рисунок 1.12 – Роботи регулятора VAV, що не залежить від тиску:  
 1 – дросельний засув регулятора; 2 – повітропровід;  
 3 – електропривід дросельного засуву; 4 – VAV регулятор.

### ***Принцип дії терміналу VAV.***

Основною задачею регулятора VAV є підтримання заданої кількості припливного та витяжного повітря в залежності від поточної потреби, необхідна величина якого визначається значенням зовнішнього керуючого сигналу. Даний сигнал поступає на регулятор від влаштованих в приміщеннях будівлі температурних регуляторів, сенсорів  $\text{CO}_2$  або інших елементів систем керування (рис. 1.13).

На вимірювальних елементах VAV-термінала, що влаштовані в вентиляційному каналі, виникає перепад тиску, величина якого залежить від швидкості повітря. Значення даного перепаду передається на вимірювальний перетворювач, в якому визначається фактична витрата повітря в залежності від площі поперечного перерізу термінала. Значення поточної витрати повітря зрівнюється з заданим. Виходячи з даного порівняння формується величина відхилення параметра системи регулювання, на основі якого генерується сигнал для зміни положення дросельної засувки.

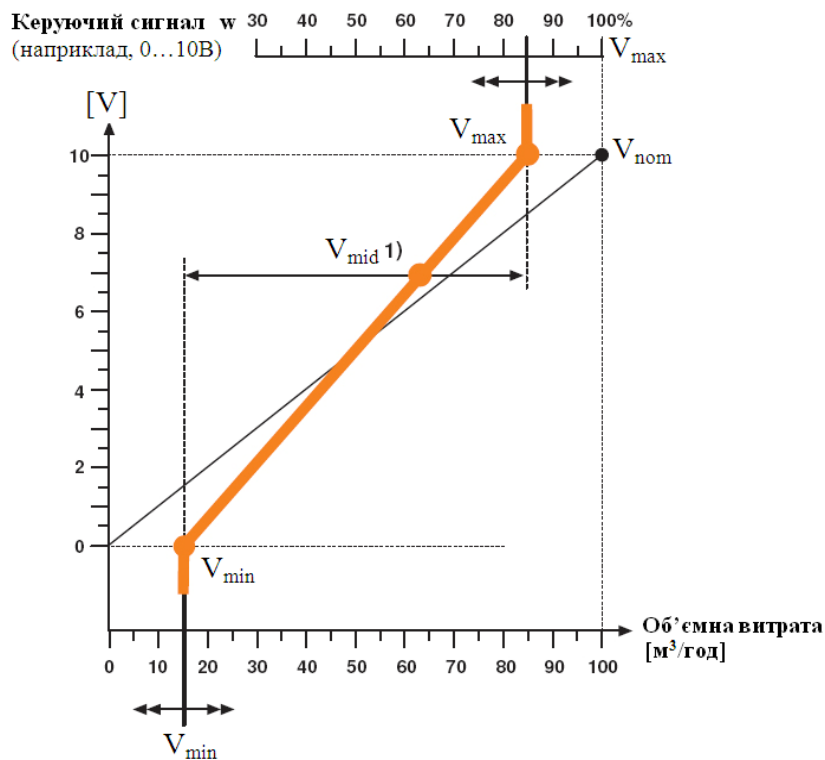


Рисунок 1.13 – Залежність об'ємної витрати повітря від величини сигналу керування, що надходить на регулятор VAV

Основні елементи термінала VAV та взаємозв'язки між ними наведено на рис. 1.14.

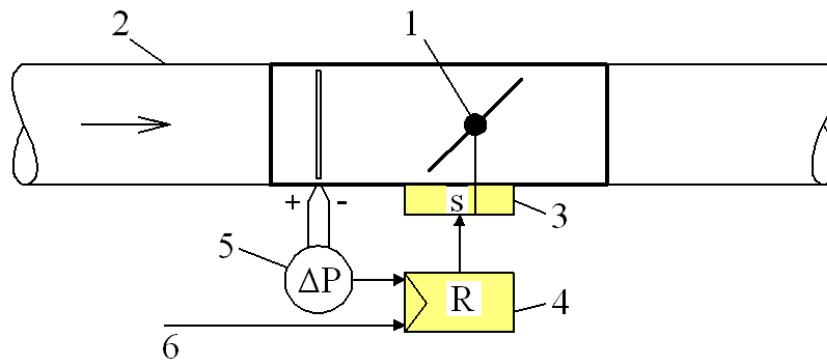


Рисунок 1.14 – Основні елементи терміналу VAV:

- 1 – дросельний засув регулятора; 2 – повітропровід;  
 3 – електропривід дросельного засуву; 4 – VAV регулятор; 5 – перетворювач перепаду тиску; 6 – зовнішній керуючий сигнал.

Однією з основних переваг вентиляційної системи з перемінною витратою повітря є можливість зменшення кількості повітря при необхідності в порівнянні з вентиляційними системами з постійною витратою повітря. Це обумовлюється тим, що в будівлі, при різних режимах експлуатації приміщень, нерівномірності теплових навантажень приміщень будівлі так і окремих зон, теплове навантаження та шкідливі виділення різні. Тому виникає необхідність у застосуванні вентиляційних систем з перемінною витратою повітря, регулятори яких змінюють кількість повітря в залежності від поточної потреби витрати повітря окремого приміщення чи зони будівлі. В визначений момент часу основний потік повітря направляється в приміщення з найбільшою потребою в вентиляванні. Отже, різні потреби у вентиляванні приміщень або окремих зон будівлі вимагають зменшення витрат повітря, розмірів вентиляційних каналів та потужності вентиляційного агрегату.

До недоліків наведеної системи можна віднести традиційну конструкцію регулювального пристрою з влаштованим регулювальним елементом всередині конструкції, при набіганні потоку повітря на останнього спостерігається інтенсивність вихроутворення та нестабільності турбулентності потоку. Це призводить до невідповідності роботи між електроприводом дросельної засувки та регулятором температури й перетворювача перепаду тиску.



### 1.3 Особливості аеродинамічного процесу регулювання витрати багатозафазного середовища

Внаслідок відсутності регулювання (штулка паралельна течії робочого середовища), розміщення виконавчого елемента всередині традиційних регулюючих елементів призводить до утворення місцевого опору при перетіканні через останній. Це призводить до утворення місцевих втрат тиску та збільшення енергозатрат.

Для прикладу проаналізовано графічну залежність втрат тиску на регуляторі RVP-R системи VAV [92, 98] при повністю відкритому регулювальному елементу – металева штулка (рис. 1.15).

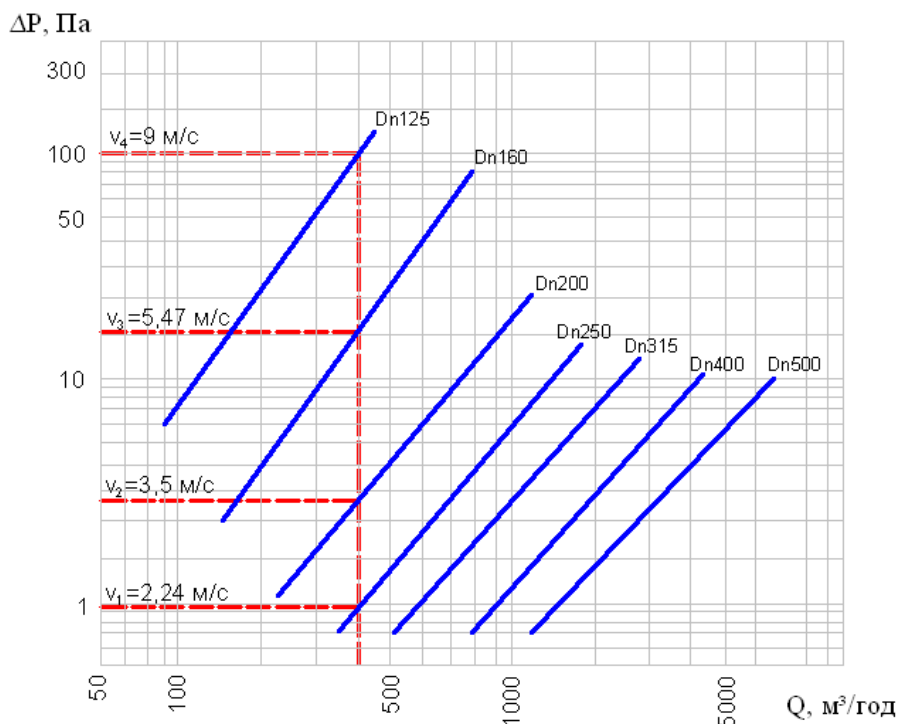


Рисунок 1.15 – Втрати тиску на регуляторі RVP-R системи VAV при повністю відкритому регулювальному елементі

Аналіз графіка (рис. 1.15) свідчить, що при однаковій витраті повітря та різних діаметрах повітропроводу на регуляторі виникають різні втрати тиску. Так, наприклад, при витраті повітря  $Q=400$  м³/год та діаметрі  $Dn=250$  мм при повністю відкритому регулювальному елементі втрати тиску складають  $\Delta P \approx 1$  Па, а при  $Dn=125$  мм втрати тиску складають  $\Delta P \approx 100$  Па. Тобто, при відсутності процесу регулювання (регулювальний елемент знаходиться паралельно

течії повітря), виникають втрати тиску внаслідок наявності регулювального органу, які впливають на інші ділянки аеродинамічної мережі. Це створює негативні умови при налагодженні системи на оптимальні робочі режими та при подальшій експлуатації системи.

Широке використання знайшли регулювальні діафрагми (рис. 1.8) на вертикальних ділянках системи аспірації [48, 69]. Негативний вплив їх роботи обумовлюється забрудненням, зціпленням різного роду транспортуємих домішок з регулюючим елементом. В якості транспортуємих домішок є пи́л, аерозолі різного походження, що виділяються внаслідок технологічного процесу виробництва продукції в харчовій, переробній промисловостях, тютюнових компаніях та на підприємствах, що використовують сипучі матеріали [18, 32, 33, 48, 69, 96, 104, 105].

Конструктивне виконання регулювального пристрою з всередині розташованим регулювальним елементом (поворотні стулки), які в аеродинаміці називаються кутовими або незручнообтічними тілами, призводить до появи негативної аеродинамічної структури течії проходження робочого середовища. Запобігти цим недолікам можливо шляхом переміщення регулювального елемента з середини регулювального пристрою назовні та його заміною на некутовий, зручнообтічний регулювальний елемент.

Проаналізуємо динаміку обтікання повітрям кутових (паралелепіпед) та некутових (куля) твердих тіл (рис. 1.16) [100].

Розподілення аеродинамічних коефіцієнтів (надлишковий статичний тиск, виражений в частці швидкісного тиску набігаючої течії [31, 100] по поверхні паралелепіпеда здійснюється наступним чином. Надлишковий тиск спостерігається на грані, на яку надходить безпосередньо течія, так як останні грані знаходяться під розрідженням (рис. 1.16, а). Нерівномірне, хаотичне розташування епюр аеродинамічних коефіцієнтів, швидка зміна знаку аеродинамічних коефіцієнтів на поверхні паралелепіпеду, який є кутовим тілом, призводить до інтенсивності утворення завихрених ділянок та втрат тиску набігаючого потоку [31, 100].

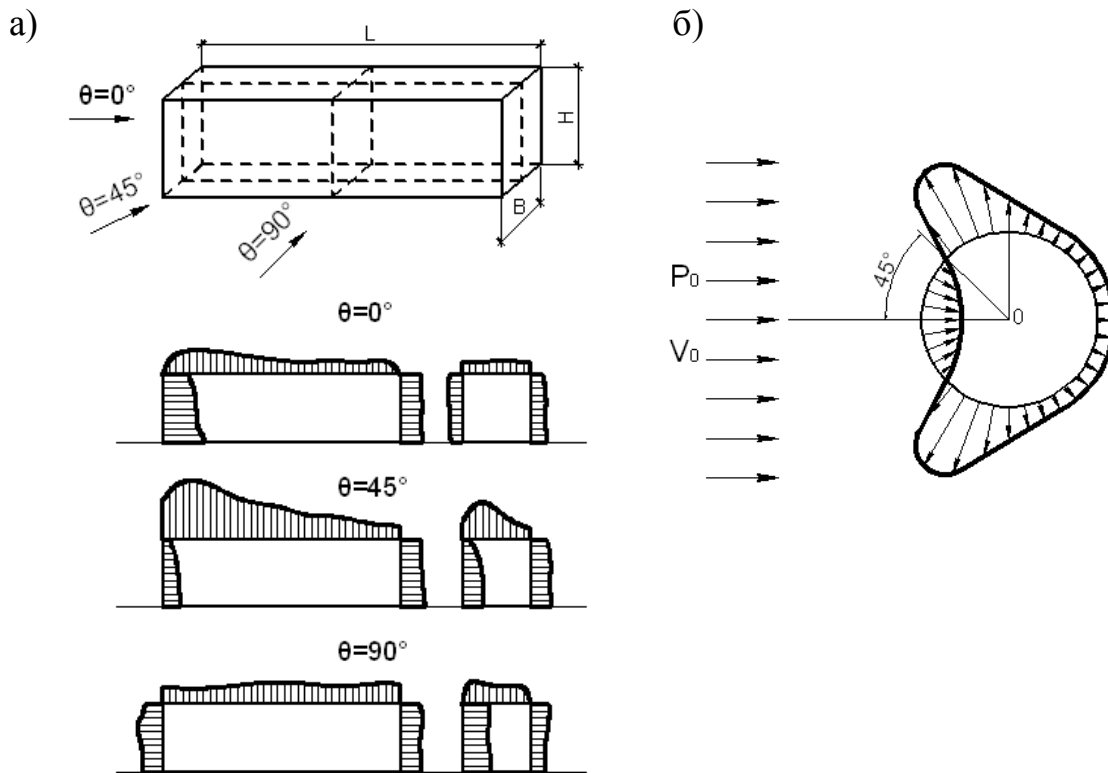


Рисунок 1.16 – Епюри аеродинамічних коефіцієнтів на поверхні:  
а) паралелепіпеда; б) кулі

При обтіканні кулеподібного тіла надлишковий тиск розташовується на передній частині кулі в межах  $0 \leq \pm 45^\circ$ , а на іншій частині спостерігається розрідження. Поступовий, плавний перехід від надлишкового тиску до розрідження свідчить про зменшення інтенсивності вихроутворення, впорядкованості та стабільності аеродинамічної структури потоку [31, 100].

Багаторазове перелаштування швидкостей та підтримання обертання вихорів потребує затрат енергії при обтіканні кутових тіл, що супроводжується великими втратами тиску, ніж при обтіканні некутових (кулеподібних) тіл [25, 27, 40, 41, 49, 51, 52, 99, 111].

Прикладом застосування регульовального пристрою з зручнообтічним регулюючим елементом в аеродинамічній мережі є система аспірації з влаштуванням удосконаленої конструкції регульовального пристрою на вертикальній ділянці відгалуження [62]. Системи аспірації знайшли широке застосування в технологічних

процесах на підприємствах харчової (цукрові, насіннєві заводи) та переробної промисловості.

На рис. 1.17 наведено механізм проходження транспортуючих компонентів у вертикальному відгалуженні системи аспірації через регульовальну діафрагму [48, 98].

При здійсненні процесу регулювання вертикальна складова траєкторії руху транспортуючих компонентів та проходження останніх через поперечний переріз піддаються негативній дії внаслідок наявності в діафрагмі регульовального елемента, форма якого є незручно обтічна. Це викликає ряд недоліків:

- перпендикулярне зіткнення частинки з регулюючим диском;
- зіткнення з іншими частинками, траєкторія руху яких направлена вниз;
- внаслідок інтенсивного вихроутворення збільшується хаотичний рух частинок в завихрених зонах.

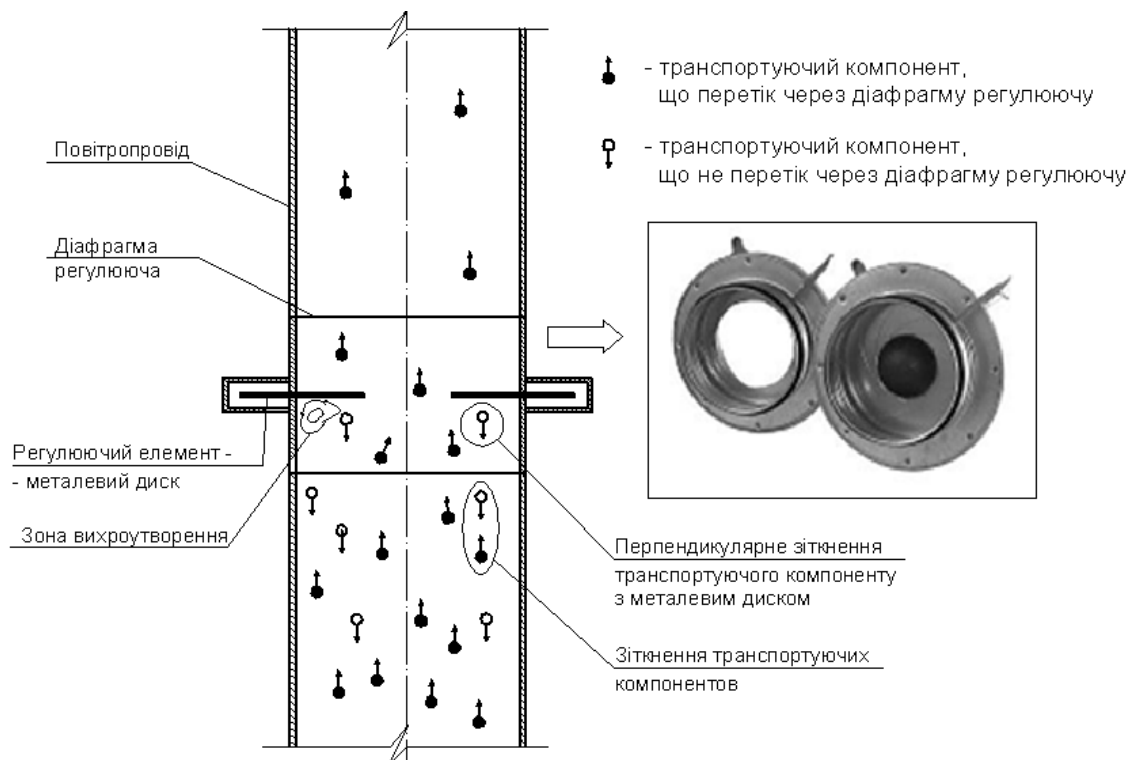


Рисунок 1.17 – Механізм проходження транспортуючих компонентів системи аспірації через регульовальну діафрагму

З метою уникнення вказаних недоліків запропонована конструкція регульовального пристрою для системи аспірації з зручнообтічними регульовальними елементами, яка захищена

патентом України на корисну модель [62]. Механізм проходження транспортуючих компонентів системи аспірації через регулювальний пристрій вдосконаленої конструкції ілюстровано на рис. 1.18.

В запропонованій конструкції регулювального пристрою відсутні перпендикулярні перешкоди траєкторії руху транспортуючих компонентів. Наявність зручнообтічної форми регулюючого елемента дозволяє при зіткненні частинки з ним по дотичній сприяти проходженню через поперечний переріз та транспортуванню її далі по повітропроводу. В результаті суттєво зменшується ряд недоліків при роботі діафрагми регулюючої [38, 39, 48].

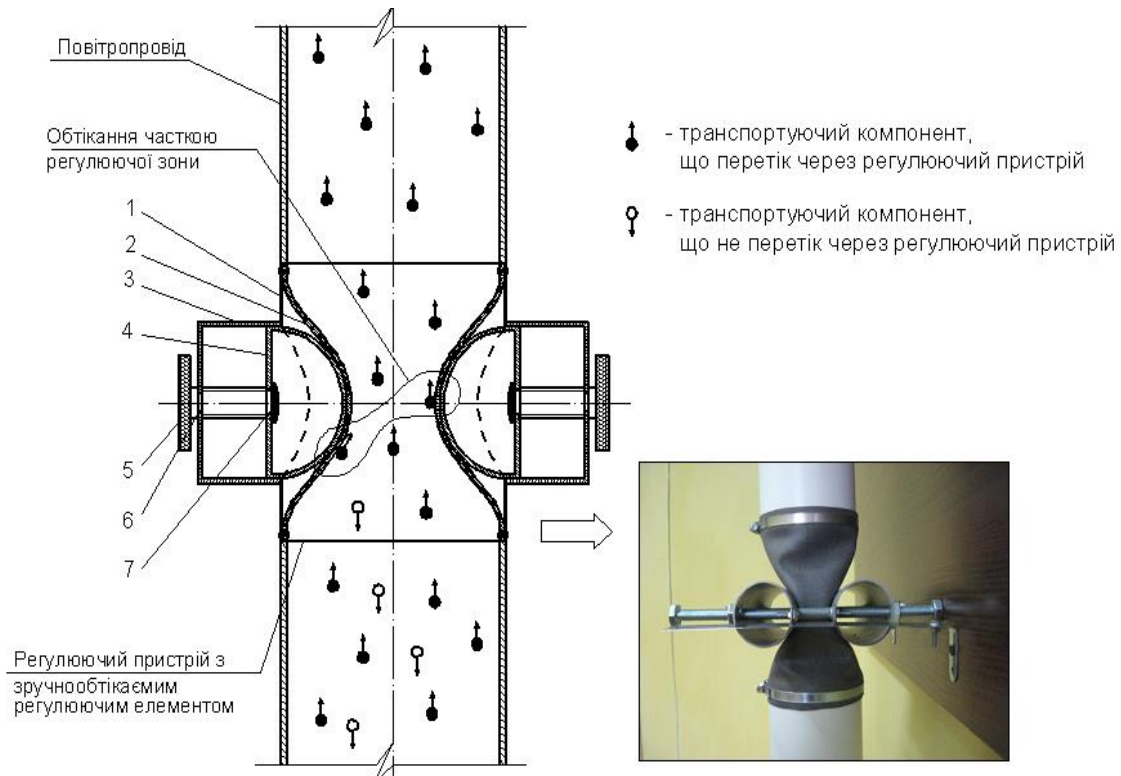


Рисунок 1.18 – Механізм проходження транспортуючих компонентів системи аспірації через регулювальний пристрій з зручнообтічними регулювальними елементами

1 - корпус; 2 – еластична розтягувальна вставка; 3 - направляючий елемент; 4 - регулювальний елемент, виконаний у вигляді пустотілих півкуль; 5 – регулювальні рукоятки; 6 - канавка для фіксації регулювальної рукоятки в направляючому елементі; 7 - заглушка для фіксації (зупинки руху) регулювальних елементів

Робота аеродинамічної мережі, наприклад, системи аспірації, можна оцінити показником – *енергоємністю*, що визначається відношенням енергії, споживаної системою, до кількості транспортувальних компонентів

$$E = \frac{E'}{G}, \quad (1.3)$$

де  $E$  – енергоємність системи аспірації кВт.ч/кг;

$E'$  - енергія, споживана системою аспірації, кВт.год;

$G$  – масова витрата транспортувальних компонентів, кг.

Аналіз механізму проходження транспортувальних компонентів системи аспірації через регулювальну діафрагму та регулювальний пристрій з зручнообтічними регулюючими елементами констатує нерівність

$$E_{др} > E_{дк}, \quad (1.4)$$

де  $E_{др}$  - енергоємність системи аспірації з використанням регулювальної діафрагми;

$E_{дк}$  - енергоємність системи аспірації з використанням регулювального пристрою з зручнообтічними регулювальними елементами;

Виходячи з (1) та нерівності (2), конструкція регулювального пристрою з переміщеним регулювальним елементом з середини пристрою назовні з його заміною на зручнообтічний (некутовий) регулювальний елемент є енергоощадною.

#### **1.4 Основні тенденції моделювання турбулентних потоків в аеродинамічних системах**

Математичне моделювання руху суцільного середовища загальними диференціальними рівняннями, що враховують всі фізичні властивості середовища, є складною задачею [4, 9]. Застосування чисельних методів інтегрування таких рівнянь на базі ЕОМ також пов'язано з значними труднощами. Тому при розрахунку аеродинамічних мереж використовуються різні спрощені моделі середовища. Під моделлю суцільного середовища розуміють таке

середовище, в якій враховані тільки деякі її фізичні властивості, які є суттєвими при розрахунку конкретної задачі. Інші малосуттєві властивості середовища для даної задачі в моделі не розглядаються [1, 10, 23, 26, 38, 101, 102].

Математичне моделювання найбільш повно відображається в блоці “модель-алгоритм-програма”, в якому етап розроблення математичних моделей повністю базується на дослідженнях та є ключовим в даній тріаді.

Повна система рівнянь моделі середовища потоків в елементах аеродинамічних систем містить:

- універсальні рівняння, що відображають закони збереження маси, зміна кількості руху та моменту кількості руху, збереження енергії та ентропії;
- визначальні відношення параметрів, що відображають властивості конкретного середовища. Це можуть бути зв'язки між рівноважними параметрами стану, які називають рівняння стану та відношення параметрів, що описують процес – кінетичні відношення;
- умови однозначності рішення: серед початкових та граничних (крайових) умов, необхідних для виділення єдиного з множини рішень рівнянь, що складають математичну модель досліджуваного процесу.

Універсальні закони збереження для довільного об'єму суцільного середовища записуються у наступному вигляді [1, 10, 23, 26, 38, 101, 102]:

1) закон збереження маси: маса індивідуального об'єму постійна (зміна маси в часі рівна нулю):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0, \quad (1.5)$$

2) закон зміни кількості руху: швидкість зміни кількості руху індивідуального об'єму рівна сумі діючих на нього зовнішніх сил:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{v} dV = \int_V \rho \vec{F} dV + \int_S \vec{P}_n dS, \quad (1.6)$$

3) закон зміни моменту кількості руху: швидкість зміни моменту кількості руху індивідуального об'єму рівна сумі моментів діючих на нього сил:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho (\vec{r} + \vec{v}) dV = \int_V (\vec{r} + \rho \vec{F}) dV + \int_S (\vec{r} + \vec{P}_n) dS, \quad (1.7)$$

4) закон збереження енергії: швидкість зміни повної енергії індивідуального об'єму рівна притоку в одиницю часу енергії зовні (в формі роботи зовнішніх сил, тепла та ін.):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( \frac{v^2}{2} + u \right) dV = \int_V (\rho \vec{F} \cdot \vec{v}) dV + \int_S (\vec{P}_n \cdot \vec{v}) dS + \int_V \rho \frac{dq}{dt} dV, \quad (1.8)$$

5) закон збереження ентропії: швидкість зміни ентропії індивідуального об'єму рівна сумі припливу ентропії зовні та виробництва ентропії всередині об'єму за одиницю часу (для незворотних процесів):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho s dV = \frac{dS_1}{dt} + \frac{dS_2}{dt}; \quad \frac{dS_2}{dt} \geq 0, \quad (1.9)$$

де  $V$  – індивідуальний об'єм;

$S$  – зовнішня поверхня (границя) об'єму  $V$ ;

$\vec{F}$  – масова щільність зовнішніх по відношенню до об'єму  $V$  масових сил;

$\vec{P}_n$  – поверхнева щільність поверхневих сил, що діє на границі  $S$ ;

$\vec{r}$  – радіус-вектор точки;

$u$  – масова щільність внутрішньої енергії;

$s$  – масова щільність ентропії;

$q$  – масова щільність припливу енергії тепла;

$S_1$  – приплив ентропії до об'єму  $V$  зовні;

$S_2$  – виробництво ентропії в об'ємі  $V$ ;

$\rho$  – щільність середовища;

$\vec{v}$  – швидкість середовища.

Внаслідок руху робочого середовища в елементах аеродинамічної мережі відбувається вплив останнього на тіла різної форми, одним з яких є тіла виконавчих елементів регулювальних пристроїв, що виконані у вигляді суцільних, перфорованих металевих пластин, різного роду вставок тощо. При математичному моделюванні такої задачі необхідно врахувати всі три рівняння законів збереження маси, енергії та зміни кількості руху [4, 38].



1) Рівняння нерозривності (закон збереження маси) є скалярним, оскільки  $div \vec{v}$  - скаляр, відповідно має одне рівняння:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div \vec{v} = 0, \quad (1.10)$$

2) Рівняння руху (закон зміни кількості руху):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - grad(p + \frac{2}{3} \mu div \vec{v}) + div(2\mu S), \quad (1.11)$$

де  $S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  - тензор швидкостей деформації.

Рівняння руху є векторним, тому в проекціях на декартові осі координат отримано три рівняння.

3) Рівняння енергії:

$$\rho \frac{dh}{dt} = P \cdot (\nabla \vec{v}) + p \cdot div \vec{v} + \frac{dp}{dt} + \rho \frac{dq}{dt}, \quad (1.12)$$

де  $h$  - ентальпія.

Рівняння енергії є скалярним, тобто має одне рівняння.

Таким чином отримано систему з п'яти диференціальних рівнянь з шістьма невідомими величинами:  $p$ ,  $\rho$ ,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ,  $T$ .

Скалярне рівняння стану буде мати вигляд:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{k-1}{k} h; \left[ \frac{p}{\rho} = RT = \frac{R}{c_p} c_p T = \frac{c_p - c_v}{c_p} h = \frac{k-1}{k} h \right]. \quad (1.13)$$

де  $k = \frac{c_p}{c_v}$ ;  $c_p$ ,  $c_v$  - теплоємність, відповідно, при сталому тиску та об'ємі;

$R$  - універсальна газова стала;

$h = c_p T$ ;

$R = c_p - c_v$ .

Отримано замкнуту систему з шістьма невідомими. Дані рівняння нелінійні, так як вирази  $(\vec{v} \nabla) \vec{v}$  та  $(\vec{v} \nabla) h$  є нелінійні.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} + (\vec{v} \nabla) \vec{v}; \quad (1.14)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dt} + (\vec{v} \nabla) h, \quad (1.15)$$

Для коректного відображення задачі до наведених рівнянь додано умову однозначності, а саме:

- геометрична характеристика обтікаємого тіла;

- теплофізичні властивості потоку;
- початкові та граничні умови задачі.

Створення математичної моделі досліджуваного аеродинамічного процесу потребує виявлення коректності поставленої задачі. Розв'язок вищенаведених рівнянь для досліджуваного процесу в елементах аеродинамічної мережі можливо за допомогою моделей турбулентності, класифікацію яких наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Моделі турбулентності

Моделі турбулентності	1. Моделі, що використовують гіпотезу Буссінеска (лінійні моделі). Класифікуються по кількості диференціальних рівнянь переносу	Алгебраїчні моделі
		Моделі з одним диференційним рівнянням
		Моделі з двома диференційними рівняннями
		Моделі з $n$ - диференційними рівняннями
	2. Моделі Рейнольдсових напруг (нелінійні моделі)	Диференційні моделі Рейнольдсових напруг
		Алгебраїчні моделі Рейнольдсових напруг
Явні алгебраїчні моделі Рейнольдсових напруг		

Алгебраїчні моделі відносяться до найпростіших видів моделей турбулентності, в яких зв'язок між турбулентною в'язкістю та параметрами осередненої течії задається алгебраїчним співвідношенням. Вузьке застосування таких моделей опирається на апіорну (емпіричну) інформацію про структуру досліджуваної течії.

Поширеними моделями турбулентності є моделі з двома диференційними рівняннями: модель типу  $k - \varepsilon$  та модель типу  $k - \omega$ . Перша модель була запропонована в роботі Колмогорова, що включає рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності  $k$  та швидкість дисипації енергії  $\omega$ , та віднесена до моделей типу  $k - \omega$ . Швидкість дисипації енергії в деяких випадках визначається як осереднений квадрат пульсацій завихреності  $\omega^2$ , що утворює зв'язок між  $k$  та  $\varepsilon$  відношенням  $\omega = \varepsilon / (c_D k)$ , де  $\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}$ . Моделі з двома рівняннями

використовують в якості одного – рівняння переносу  $k$ . Причиною чому є те, що останнє витікає з рівняння Нав'є-Стокса, а також для його замикання необхідно промодельовати тільки два члена: дифузійний та дисипативний. Вибір другого рівняння в моделі з двома диференціальними рівняннями обумовлюється необхідністю визначення додаткової до  $k$  характеристики турбулентності для розрахунку турбулентної в'язкості з алгебраїчних співвідношень. До недоліків  $k-\varepsilon$  можна віднести низьку точність при моделюванні течії з відривом від гладких поверхонь та проведення спеціальних операцій внаслідок розрахунку течії поблизу стінок.

Серед задач CAE (Computer-aided engineering – автоматизованого конструювання) обчислювальна аеро- та гідродинаміка (CFD - англ. Computational fluid dynamics) є найскладнішою. Динаміка розвитку моделювання гідрогазодинамічних процесів сприяла виникненню системи автоматизованого проектування САПР із застосуванням різноманітних програмних продуктів, одним з яких є COSMOSFloWorks інтегрований в SolidWorks. В COSMOSFloWorks моделювання потоків виконується за допомогою розв'язання рівнянь Нав'є – Стокса, що описують закони збереження маси, імпульса та енергії середовища. Для моделювання турбулентних течій система рівнянь Нав'є – Стокса усереднюється по Рейнольдсу, тобто використовується усереднене значення за малим масштабом часу впливу турбулентності на параметри течії. В той же час великомасштабні часові зміни усереднені за малим масштабом часу складових газодинамічних параметрів течії (тиску, швидкостей, температури) враховується введенням відповідних похідних за часом. Рівняння доповнюються додатковими членами – напруг по Рейнольдсу. Для замикання системи рівнянь використовується рівняння перенесення кінетичної енергії турбулентності, її дисипації в рамках  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності.

Система рівнянь Нав'є – Стокса в декартовій системі координат  $(x_i, i=1, 2, 3)$ , що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  навколо осі, яка проходить через її початок:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = S_i, \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_n, \quad (1.18)$$

де  $\rho$  - щільність робочого середовища;

$u$  - швидкість робочого середовища;

$t$  - час;

$P$  - тиск робочого середовища;

$S_i$  - зовнішні масові сили, що діють на одиницю масу робочого середовища;

$E$  - повна енергія одиниці маси робочого середовища;

$Q_n$  - тепло, що виділяється джерелом в одиничному об'ємі робочого середовища;

$\tau_{ik}$  - тензор в'язких зсувних напруг;

$q_k$  - дифузійний тепловий потік.

Проведення експериментальних досліджень супроводжується великими капітальними затратами. Тому застосування різних математичних апаратів з використанням методів обчислювальної гідродинаміки CFD (англ. - Computational Fluid Dynamics) дозволяє суттєво знизити вартість робіт, створити інформаційну базу для моделювання аеродинамічних течій, які важко відтворити в експерименті. Математичне моделювання аеродинамічних потоків дозволяє більш чітко відобразити проблему та знайти необхідні шляхи для її вирішення, вивчити параметри течії та розробити заходи та засоби для покращення її характеристик. Використання методів чисельного моделювання завдяки САД технології (Computer Aided Engineering) знайшло своє застосування при моделюванні проходження потоку через різні тверді перешкоди в трубопроводі, в тому числі через регулюючі пристрої.

Порівняльний аналіз науково-технічних розробок та досліджень в галузі регулювання потоків аеродинамічних систем дозволяє зробити наступні висновки:

- визначено основні переваги та недоліки регулюючих пристроїв аеродинамічних мереж констатують, а саме що плавність регулювання

аеродинамічних потоків досягається при застосуванні регулювальних пристроїв з декількома регулювальними пластинами;

- удосконалення регулювання аеродинамічних систем визначає їх енергетичну ефективність і технологічного процесу в цілому. Основними регулювальними елементами в регулювальних пристроях аеродинамічних систем є незручнообтічні тверді тіла – пластина або ряд пластин, внаслідок обтікання яких потоком робочого середовища утворюється негативна аеродинамічна структура. Складність розрахунку аеродинамічних параметрів в регулювальних пристроях обумовлена наявністю в них змін швидкості руху, відривання потоку, виникнення вихроутворень, що призводить до нестабільності турбулентності [64, 65];

- встановлено, що застосування вентиляційних систем з перемінною витратою повітря (VAV) є ефективним [92], так як дана система реагує на зміну навантаження окремих приміщень або зон будівлі. Це призводить до загального зменшення витрати повітря, ніж необхідно при сумарному навантаженні всіх окремих приміщень або зон будівлі;

- регулювальний пристрій аеродинамічної мережі, конструкція якого здійснює вплив регулювального елемента на робоче середовище з зовнішньої сторони з заміною останнього на зручнообтічну форму забезпечує систему стійких вихроутворень, стабільність аеродинамічної структури потоку та сприяє більш точному, плавному регулюванню витрати робочого середовища. Регулювальний пристрій вдосконаленої конструкції дає можливість застосовувати його системах аспірації, що виключає зачеплення, забруднення різного роду транспортувальних компонентів з регулювальним елементом;

- встановлено, що одним з ефективних напрямків дослідження газодинаміки в елементах аеродинамічної мережі є розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності, які інтегровані в сучасні математичні моделі турбулентних потоків з застосуванням методів обчислювальної газодинаміки (CFD).

## **РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ УДОСКОНАЛЕННЯ РЕГУЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОТОКІВ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТА АСПІРАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

### **2.1 Аналіз впливу конструкцій регулювальних пристроїв аеродинамічних потоків на величини місцевих опорів**

Енергоефективність та надійність аеродинамічних мереж, особливо в системах аспірації переробних та харчових підприємств, визначаються коефіцієнтами опору запірних та регулювальних пристроїв (їх виконавчих органів), величини яких залежать від їх конструкції, що впливає на прямолінійність лінії течії потоку. Існуючі конструкції регулювальних пристроїв з дисковим затвором не є енергоощадним, так як внаслідок раптового звуження та розширення течії відбувається різка зміна швидкостей, що сприяє вихроутворенню, які є причиною значного опору [108, 110]. Крім того, одностороннє розташування в дисковому затворі регулювального елемента підвищує пульсацію тиску та вібрацію трубопроводу, що суттєво погіршує налагодження на оптимальні режими роботи аеродинамічної мережі [47].

Для покращення аеродинамічних умов протікання струмини робочого середовища в системах вентиляції та аспірації та плавного регулювання витрати робочого середовища запропонована конструкція дросельного пристрою з зручнообтічними регулювальними елементами [60]. Завдяки поступовому плавному переходу до звужуючих (регулюючих) зон покращуються аеродинамічні умови протікання струмини робочого середовища та підвищується експлуатаційна надійність аеродинамічної мережі в цілому.

Проектування та експлуатація аеродинамічних мереж з використанням дросельних пристроїв з зручнообтічними регулювальними елементами вимагає обґрунтування їх конструктивних та енергоощадних переваг над існуючими дисковими регулювальними пристроями. Розроблення методики інженерного розрахунку налаштування дроселюючих елементів на прогнозовані робочі режими потребує оцінки впливу конструкцій виконавчих

органів регулювальних пристроїв аеродинамічних мереж на їх коефіцієнти опору, що характеризують енергоощадність систем вентиляції та аспірації.

Для найбільш поширеного в аеродинамічних мережах регулювання витрат робочого середовища за допомогою пристроїв з одним дисковим затвором коефіцієнт опору в повітропроводах круглого перерізу для всього діапазону критеріїв Рейнольдса обчислюється за формулою [80, 107]

$$\xi_1 \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} = \frac{A}{\text{Re}} + \left(1 - \frac{50}{\text{Re}}\right) \xi_{\text{кв}}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } A \approx 120 \left[ \frac{1 + 0,5 \bar{D}_d (1 + \sin \delta)}{(1 - \bar{D}_d^2 \sin^2 \delta)^2} \right], \quad (2.2)$$

$\delta$  - кут відкриття клапана, град.;

$D_d$  - діаметр диска, м;

$D_0$  - діаметр трубопроводу, м;

$\bar{D}_d = D_d / D_0 = 0,98$ ;

$\text{Re} = w_0 D_0 / \nu$  - критерій Рейнольдса: при  $\text{Re} \leq 50$  величина

$(1 - 50/\text{Re})$  приймається рівною нулю;

$w_0$  - швидкість робочого середовища, м/с;

$\nu$  - кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с;

$\xi_{\text{кв}}$  - коефіцієнт опору в квадратичній області.

При куті відкриття клапана  $\delta > 25^\circ$  коефіцієнт опору в квадратичній області визначається за формулою

$$\xi_{\text{кв}} = \left( \frac{1,56}{1 - \bar{D}_d^2 \sin^2 \delta} - 1 \right)^2. \quad (2.3)$$

Залежність коефіцієнта місцевого опору  $\xi_1$  регулювального пристрою від кута відкриття дискового затвору  $\delta$  за результатами моделювання [43, 44] згідно формул (2.1) – (2.3) зображено на рис.2.1.

Аналіз отриманих результатів (рис.2.1) свідчить, що при зміні відкриття клапана  $\delta = 0 \dots 30^\circ$  відбувається повільне зростання коефіцієнта місцевого опору, що відповідає значенням  $\xi_1 = 0,32 \dots 4,0$ . При зміні кута відкриття клапана  $\delta$  від  $0$  до  $30^\circ$  на коефіцієнт опору

дискового затвору впливає його форма та розміри [43, 44, 80]. В даних межах кута відкриття клапана  $\delta$  також порушується стабільність характеристик приводів затворів. При зміні відкриття клапана від  $\delta = 30^\circ$  і більше спостерігається швидке зростання коефіцієнта місцевого опору за параболічним законом. Це виключає можливість якісного, стабільного регулювання, так як зміна положення кута дискового затвору лише на  $\delta = 1^\circ$  обумовлює суттєве збільшення коефіцієнта опору  $\xi_1$ . Робочий діапазон застосування дискових затворів, що використовуються в схемах автоматичного регулювання, рекомендується обмежувати межами зміни  $\delta$  від  $30^\circ$  до  $90^\circ$ , при якому практично пропускна спроможність не залежить від конструкції затвору [43, 44, 80].

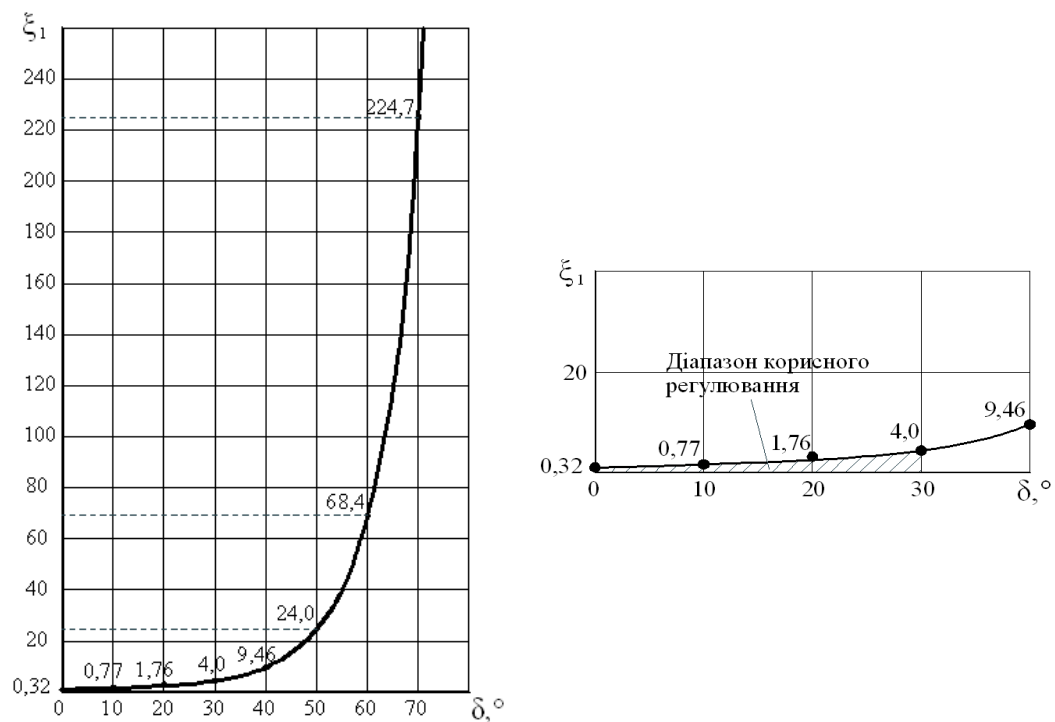


Рисунок 2.1. – Залежність коефіцієнта місцевого опору регулювального пристрою від кута положення дискового затвору  $\xi_1 = f(\delta)$

Отже, застосування регулювального пристрою, виконавчим елементом якого є дисковий затвор, обмежується малим діапазоном регулювання  $\delta = 0 \dots 30^\circ$ , що виключає можливість широкого варіювання зміни робочих параметрів аеродинамічної мережі.



Вдосконалення аеродинамічних властивостей регулювального пристрою потребує дослідження протікання робочого середовища через його виконавчий елемент. Основним виконавчим елементом регулювального пристрою є тверде тіло, яке змінює поперечний переріз та з яким зіштовхується робоче середовище. Результати дослідження з визначення опору тіл різної форми внаслідок обтікання течією свідчать, що найменші коефіцієнти сили лобового опору  $c_x$  мають зручнообтічні тіла, такі як циліндр, куля, каплеподібне тіло тощо [80, 100, 107].

Для підвищення енергоощадності аеродинамічних мереж за рахунок покращення умов протікання струмини робочого середовища запропоновано вдосконалену конструкцію регулювального пристрою з двома симетрично розташованими виконавчими елементами, виконаними у вигляді півсфер, які дозволяють змінити площу поперечного перерізу повітропроводу [60]. Налаштування дросельного пристрою запропонованої конструкції на прогнозовані робочі режими можливо при наявності відповідної методики інженерного розрахунку.

Для регулювальних елементів, виконаних у вигляді двох півсфер, в повітропроводі при обтіканні потоком повітря коефіцієнт місцевого опору може бути визначений за формулою [80, 107]

$$\xi_2 \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} = c_x \frac{S_m / F_0}{(1 - 0,5 S_m / F_0)^3} \left(1 - \frac{2y}{D_0}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.4)$$

де  $c_x$  - коефіцієнт лобового опору регулювальних елементів;

$S_m$  - міделева площа регулювальних елементів,  $m^2$ , яка рівна

$$S_m = \frac{\pi d_m^2}{4}, \quad (2.5)$$

$d_m$  - діаметр міделевого перетину регулювальних елементів, м;

$D_0$  - діаметр повітропроводу, м;

$F_0$  - поперечний переріз повітропроводу,  $m^2$ ;

$y$  - відстань між осями повітропроводу та регулювальними елементами, м.

Коефіцієнт лобового опору регулювальних елементів  $c_x$  залежить від величини турбулентності, що характеризується критерієм

Рейнольдса. Визначення коефіцієнта лобового опору в залежності від різної величини турбулентності та різних значень критерію Рейнольдса наведено нижче.

Так при значеннях турбулентності  $\varepsilon_T = \sqrt{w'^2} / w_0 \approx 0$  і діапазоні величин критерію Рейнольдса  $0 < Re' < 5 \cdot 10^3$  при всіх режимах обтікання Вахрушев І.А. рекомендує узагальнену формулу [44]

$$c_x \approx \left( \frac{28,47}{Re' \lg(15,38/\varphi)} + \frac{4,565\varphi}{\sqrt[3]{Re'}} - \frac{0,491\varphi}{\sqrt{Re'}} \right) \cdot [1 - th(0,01282 Re'(\varphi - 0,9805))] + \\ + 2,86(\varphi - 0,8531) th[0,01282 Re'(\varphi - 0,9805)] + \\ + (7,76 - 2,86\varphi - 4,88/\varphi) th[0,00104 Re'(\varphi - 0,9038)], \quad (2.6)$$

де  $w'$  - подовжня пульсаційна швидкість потоку, м/с;

$\varphi$  - коефіцієнт несферичності частинок, що дорівнює відношенню площі поверхні частинки до площі поверхні кулі, рівноцінній їй по об'єму.

В якості визначального розміру частинки, що входить в критерій Рейнольдса, приймається діаметр рівновеликої кулі  $d_e = Re' \cdot \nu / w_0$ ;

$d_e$  - еквівалентний діаметр частинки;

$th(\varphi)$  - функція - гіперболічний тангенс.

Для кулі коефіцієнт несферичності  $\varphi = 1$ , тоді формула (2.6) буде мати вигляд [44]

$$c_x \approx \left( \frac{24}{Re'} + \frac{4,565}{\sqrt[3]{Re'}} - \frac{0,491}{\sqrt{Re'}} \right) \cdot [1 - th(0,00025 Re')] + 0,42 th(0,00025 Re') + 0,02 th(0,0001 Re'). \quad (2.7)$$

Отже, коефіцієнт місцевого опору регулювального пристрою з виконавчими елементами у вигляді двох півсфер визначається силою лобового опору струмини повітря та ступеню перекриття поперечного перерізу повітропроводу.

Схема до визначення коефіцієнта місцевого опору  $\xi_2$  вдосконаленої конструкції регулювального пристрою від величини його закриття  $S_M/F_0$  наведено на рис. 2.2.

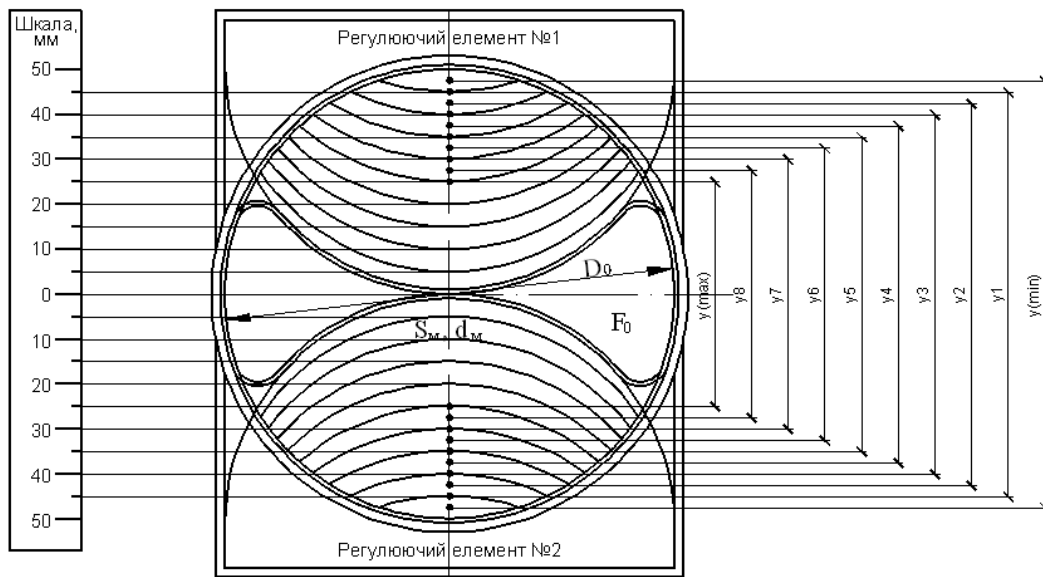


Рисунок 2.2. – Схема до визначення коефіцієнта місцевого опору  $\xi_2$  вдосконаленої конструкції регулювального пристрою від величини його закриття  $S_M/F_0$

При моделюванні режиму аеродинамічного процесу визначення коефіцієнта місцевого опору  $\xi_2$  регулювального пристрою виконувалось за умови одночасного зближення кожного регулювального елемента через  $1/10$  відстані до осі регулюючого пристрою  $y_{\min} \rightarrow y_{\max}$ . Для чисельного експерименту визначення коефіцієнту опору розглянуто регулювальний пристрій з внутрішнім діаметром  $D_0 = 100\text{мм}$ . Діаметр регулювальних елементів рівний діаметру регулювального пристрою. Величина закриття  $S_M/F_0$  при різних діаметрах регулювальних пристроїв є величина стала, так наприклад, при  $D_1=125$  і  $D_2 = 160\text{мм}$ , при  $y_{\max}$  відношення  $S_M/F_{0(\max)} = 0,76$ .

Залежність коефіцієнта сили лобового опору регулювальних елементів, виконаних у вигляді двох півсфер, від критерію Рейнольдса згідно проведеного чисельного моделювання змінюється в межах  $Re' = 10^3 \dots 10^5$  (рис.2.3) [80, 107].

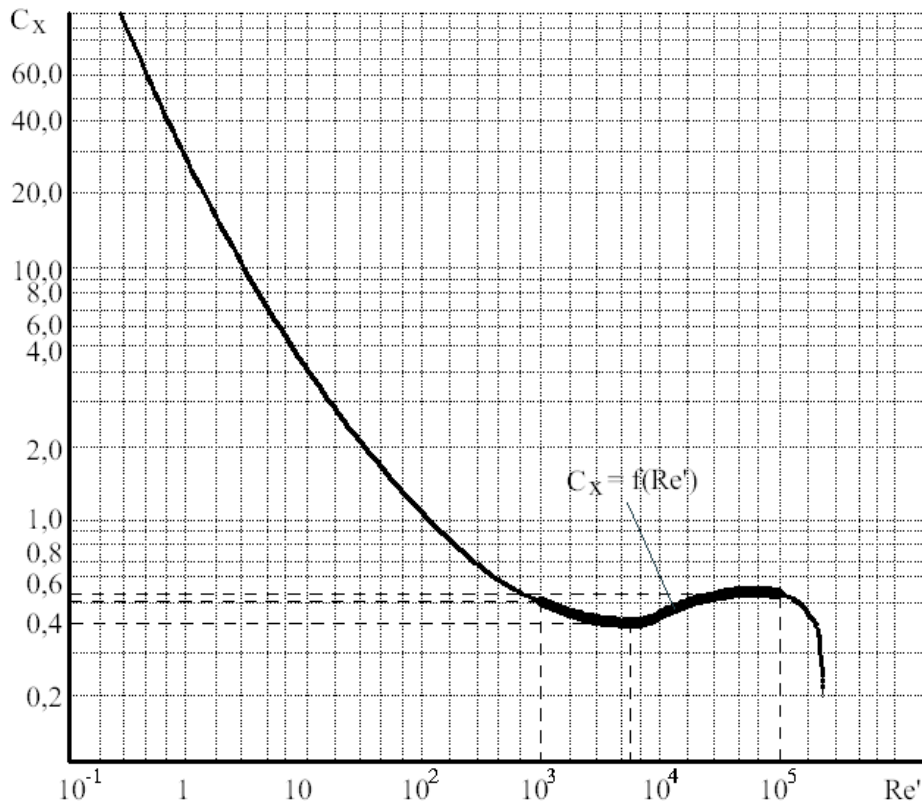


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта сили лобового опору регулювальних елементів від критерію Рейнольдса  $c_x = f(Re')$

На графіку залежності коефіцієнта сили лобового опору регулювальних елементів від критерію Рейнольдса (рис.2.3) виділяється діапазон значень  $Re' = 10^3 \dots 10^5$ , в якому коефіцієнт сили лобового опору коливається в межах  $c_x = 0,38 \dots 0,48$ . Підставляючи отримані величини  $c_x$  в формулу (2.4), отримуємо значення коефіцієнтів місцевих опорів  $\xi_2$  регулювального пристрою при різних положеннях виконавчих елементів у.

Залежність значень коефіцієнта місцевого опору  $\xi_2$  вдосконаленої конструкції регулювального пристрою від величини прохідного перерізу  $S_M/F_0$  наведено на рис. 2.4.

З графіка (рис.2.4) видно, що значення коефіцієнта місцевого опору змінюється в межах  $\xi_2 = 0 \dots 1,12$  залежно від величини закриття регулювальних елементів прохідного перерізу  $S_M/F_0 = 0 \dots 0,76$ . Параболічні залежності, що характеризують закриття регулювального пристрою більше ніж на  $2/3$  прохідного перерізу і незначна зміна  $\xi_2 = 0 \dots 1,12$ , свідчить про плавне, поступове й

впорядковане регулювання аеродинамічної мережі, на відміну від регулювального пристрою з дисковим затвором (рис.2.1).

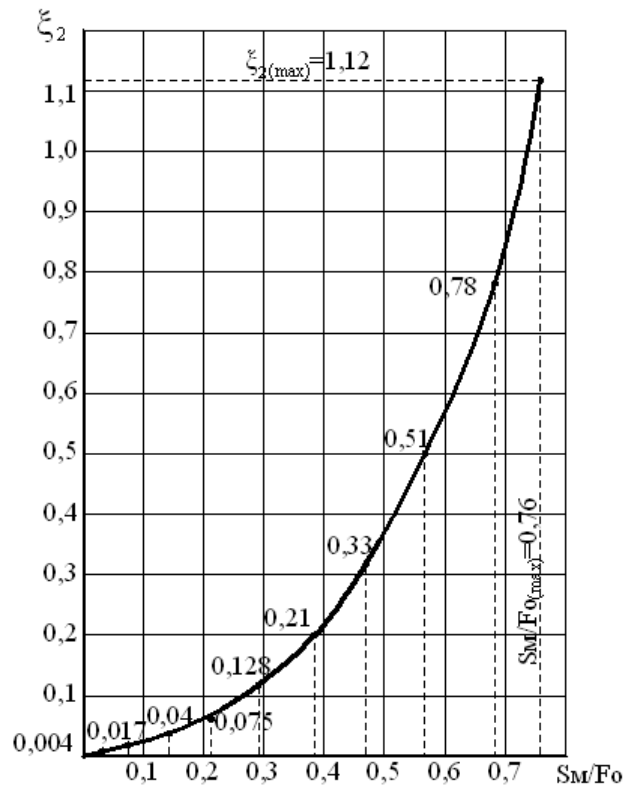


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта місцевого опору регулювального пристрою вдосконаленої конструкції від величини прохідного перерізу  $\xi_2 = f(S_m / F_0)$

Отримана графічна залежність  $\xi_2 = f(S_m / F_0)$  (рис.2.4) може бути використана для проектування аеродинамічної мережі повітропроводів з прогнозованим налаштуванням регулювальних пристроїв на відгалужувальних ділянках на задані величини коефіцієнти місцевих опорів.

## 2.1 Модель багатфакторної оцінки енергоємності вентиляційних та аспіраційних систем

Впровадження інноваційних технологій, проведення заходів щодо покращення умов праці на підприємствах харчової промисловості, будівельному комплексі, громадських установах призводить до необхідності реконструювання та створення

ефективних вентиляційних та аспіраційних систем (аеродинамічних систем). Проектування відповідного обладнання, монтаж, введення в експлуатацію та сама експлуатація повинні бути скоординованими та направленними на досягнення енергоощадності шляхом оптимізації їх енергоємності. На ефективність функціонування аеродинамічних систем впливають кількісні та якісні фактори, що виникають на стадії проектування, під час будівельно-монтажних робіт та в процесі експлуатації [13, 16, 20, 42, 96].

Аеродинамічні системи - складна сукупність розгалужених повітропроводів, аеродинамічних машин, повітрооброблюючих механізмів, засобів регулювання, системи автоматики, функціонування в комплексі яких викликає труднощі з впровадженням енергоощадного обладнання. Енергоємність аеродинамічної системи визначається витратою кількістю енергії, яка необхідна для одержання виробленого продукту, в нашому випадку на транспортування робочого середовища.

Прийняття рішень у керуванні аеродинамічними системами здійснюється в умовах апіорної невизначеності, обумовленою нечіткістю вхідних даних, природою зовнішніх впливів, відсутністю адекватної математичної моделі функціонування. Невизначеність функціонування аеродинамічної системи під впливом сукупності збуджуючих зовнішніх та внутрішніх факторів призводить до зростання ризиків від прийняття неефективних рішень. Результатом такої невизначеності можуть бути негативні техніко-економічні показники функціонування системи. Відсутність комплексного математичного апарату з оцінювання та прогнозування якості функціонування аеродинамічних систем є однією з причин зниження їх енергоємності.

На початкових етапах проектування виникає необхідність оцінювання пропозицій та умов на будівництво об'єкту. Новий підхід з використанням математичної моделі в нечіткій технології для прийняття управлінських рішень з підвищення енергоощадності функціонування аеродинамічних систем на основі лінгвістичної інформації є одним з напрямків вирішення даної задачі [53, 73].

Прогнозування енергоємності аеродинамічних систем в залежності від факторів, що її обумовлюють, можливо за допомогою нечіткої бази знань як взаємозв'язаної сукупності математичних

моделей, алгоритмів, формалізованих методик з використанням експертно-лінгвістичної інформації [86, 87].

Побудова моделі за допомогою нечіткої бази знань передбачає три етапи (рис.2.5). На першому етапі (фазифікація) представлення нечіткої множини здійснюється за допомогою лінгвістичних змінних, базових терм-множини, функції належності. На другому етапі формуються правила нечітких висновків, під час якого складають продукційні правила і вибирають оператори нечіткої логіки. Останній третій етап (дефазифікація) об'єднує вихідні нечіткі множини, а на виході формує чітке конкретне значення.

Структурну схему нечіткого логічного висновку щодо прогнозування енергоємності аеродинамічних систем наведено на рис.2.5.

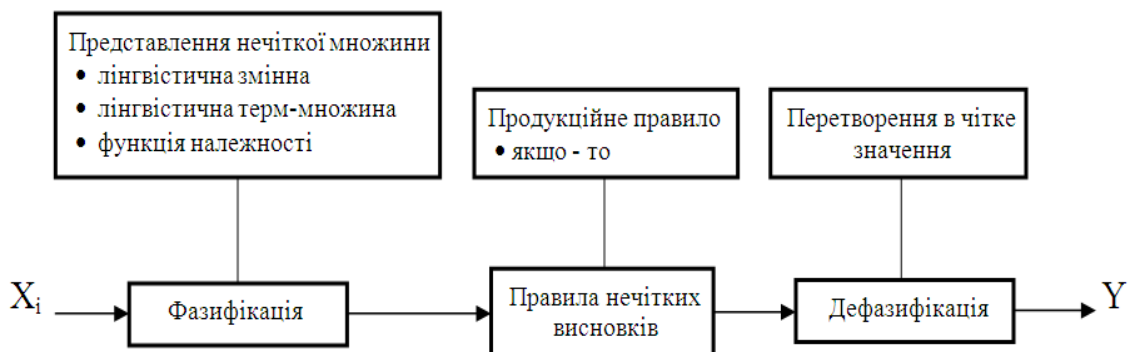


Рисунок 2.5 – Структурна схема нечіткого логічного висновку

Ієрархічна побудова структури математичної моделі енергоємності аеродинамічних систем здійснюється на основі формалізації факторів впливу у вигляді нечітких множин, класифікація яких наведена на рис. 2.6. Основними факторами впливу є наступні: науково-технічний рівень проектних рішень, якість будівельно-монтажних робіт та експлуатаційні показники системи.

Енергоефективність функціонування аеродинамічної системи визначаємо показником *енергоємністю*, тобто відношенням енергії, що споживає аеродинамічна мережа до величини, що характеризує результат її функціонування (кількість транспортуємого повітря в системі вентиляції та повітря разом з різного роду домішками в системі аспірації та пневмотранспорту за одиницю часу).

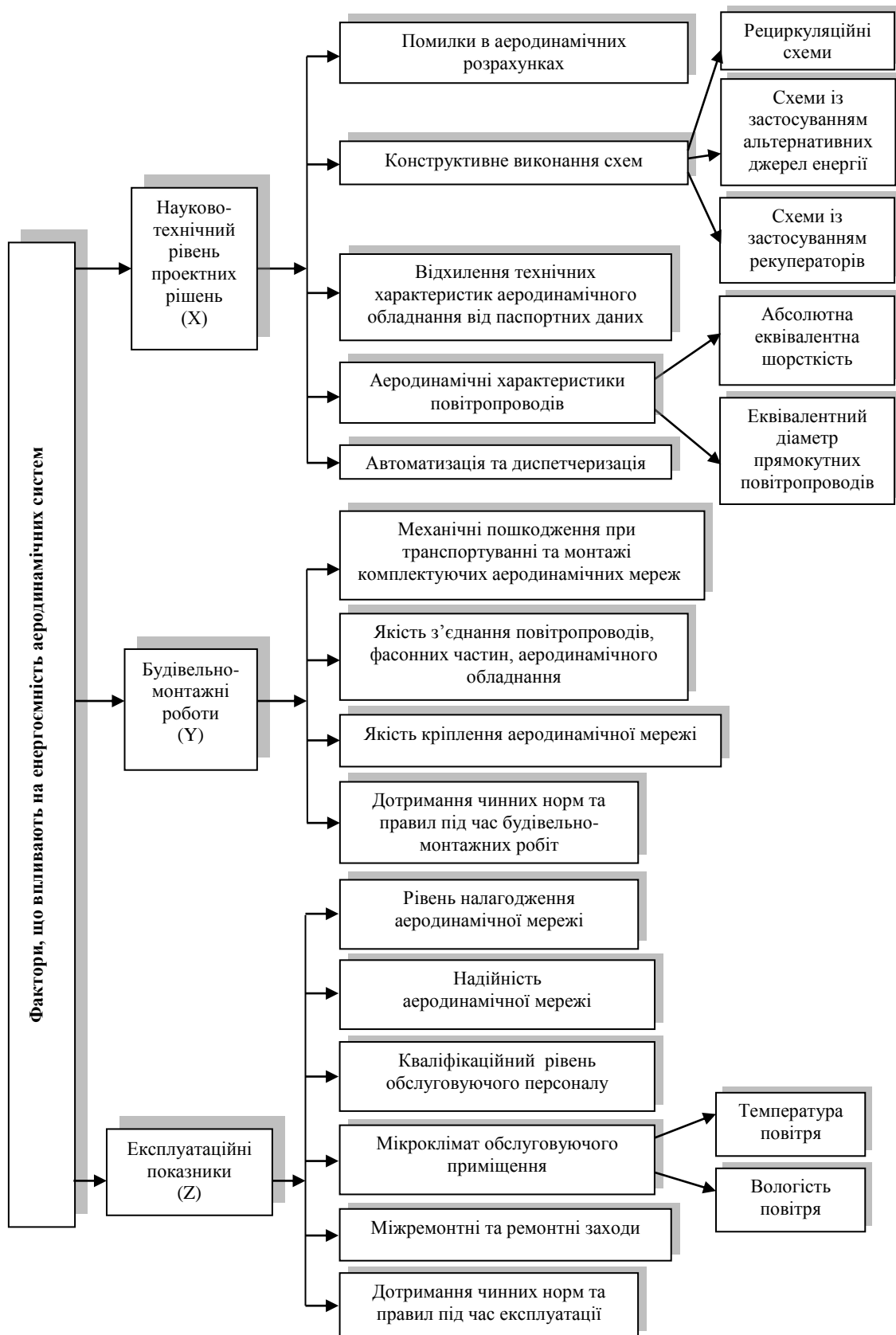


Рисунок 2.6 – Класифікація факторів, що впливають на енергоємність аеродинамічних систем



Рівень показника енергоємності аеродинамічної системи на системному рівні  $L_{AM}$  представлений у вигляді співвідношення

$$L_{AM} = f(X;Y;Z), \quad (2.8)$$

де  $X$  – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує вплив науково-технічного рівня проектних рішень;

$Y$  – ЛЗ, що описує вплив якості будівельно-монтажних робіт;

$Z$  – ЛЗ, що описує вплив якості експлуатаційних показників.

За результатами класифікації сукупності факторів, що характеризують енергоємність аеродинамічних систем, запропоновано модель ієрархічних співвідношень між лінгвістичними змінними (2.8) у вигляді дерева логічного висновку (рис. 2.7). Корінь дерева логічного висновку відповідає енергоємності аеродинамічних систем, вищі вершини – факторам як лінгвістичним змінним, що впливають на її величину.

Оцінювання лінгвістичних змінних проводиться за допомогою нечітких термів [53, 73, 86, 87, 88]. Ієрархія факторів, що впливають на енергоємність аеродинамічних систем, розподіляються по трьом рівням: науково-технічний рівень проектних рішень, будівельно-монтажні роботи, експлуатаційні показники.

Лінгвістична змінна, що описує вплив науково-технічного рівня проектних рішень на енергоємність, може бути розгорнута в вигляді співвідношення

$$X = f_x(x_1; x_2; x_3; x_4; x_5). \quad (2.9)$$

Фактор  $x_1$  – помилки в аеродинамічних розрахунках визначимо на універсальній множині  $U(x_1) = \{1, 3, 5, 7, 10\}$  (балів). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(x_1) = \langle \text{грубі, вище середніх, середні, нижче середніх, відсутні} \rangle$ .

Рівнянню (2.9) належить змінна  $x_2$ , яка в свою чергу залежить від наступних факторів

$$x_2 = f_{x_2}(a_1; a_2; a_3). \quad (2.10)$$

Фактор  $a_1$  – рециркуляційні схеми визначимо на універсальній множині  $U(a_1) = \{0, 0,25, 0,5, 0,75, 1\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення

цього фактору задаються терм-множиною  $T(a_1) = \langle \text{присутні, відсутні} \rangle$ .

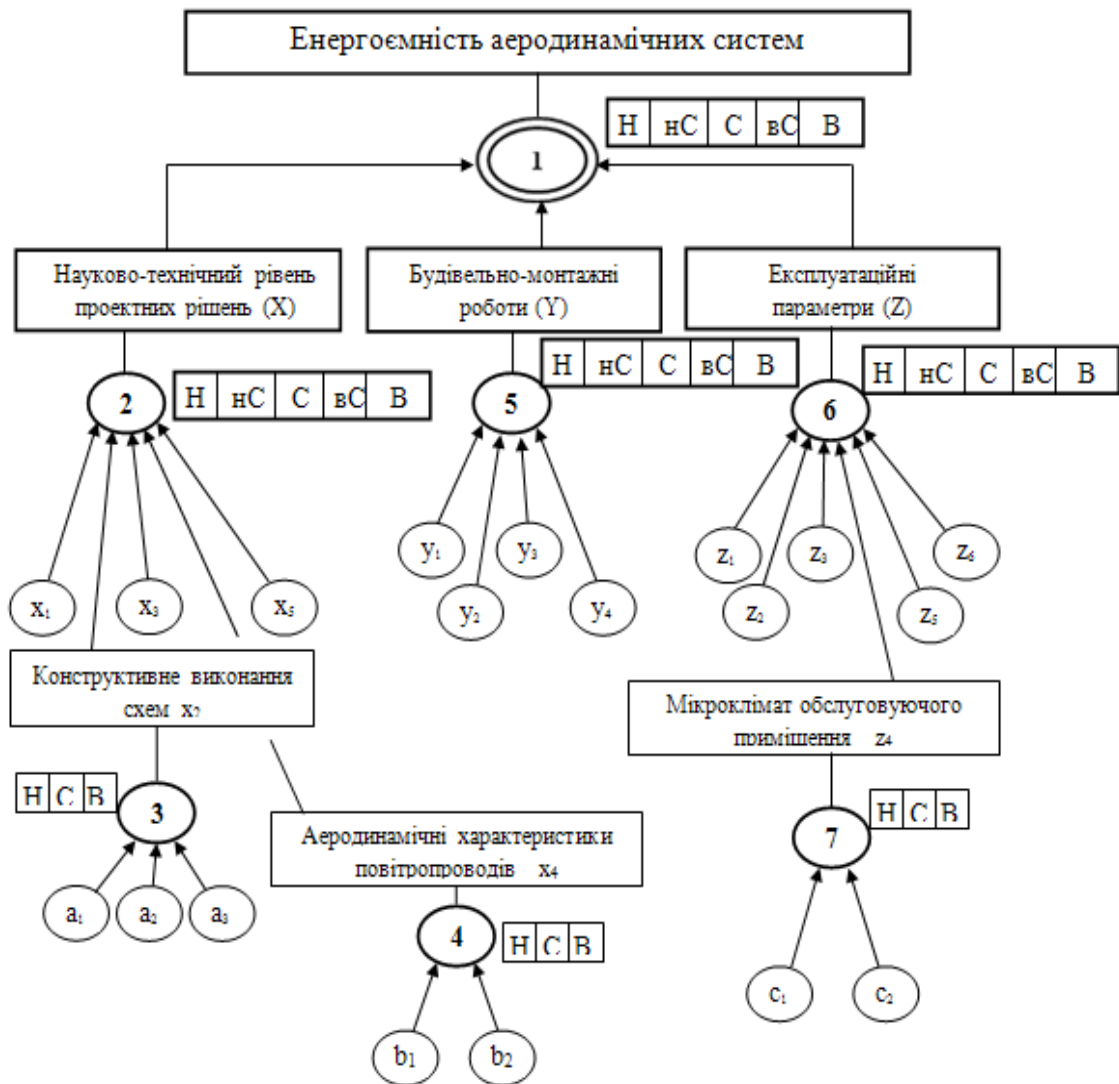


Рисунок 2.7 – Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на енергоємність аеродинамічних систем

Фактор  $a_2$  – схеми із застосуванням альтернативних джерел енергії визначимо на універсальній множині  $U(a_2) = \{0, 0,25, 0,5, 0,75, 1\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(a_2) = \langle \text{присутні, відсутні} \rangle$ .

Фактор  $a_3$  – схеми із застосуванням рекуператорів визначимо на універсальній множині  $U(a_3) = \{0, 0,25, 0,5, 0,75, 1\}$  (у.о.).

Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(a_3) = \langle \text{присутні, відсутні} \rangle$ .

Фактор  $x_3$  – відхилення технічних характеристик аеродинамічного обладнання визначимо на універсальній множині  $U(x_3) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  (балів). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(x_3) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle$ .

Рівнянню (2.9) належить змінна  $x_4$ , яка в свою чергу залежить від наступних факторів

$$x_4 = f_{x_4}(b_1; b_2). \quad (2.11)$$

Фактор  $b_1$  – абсолютну еквівалентну шорсткість визначимо на універсальній множині  $U(b_1) = \{0,03, 0,06, 0,09, 0,12, 0,15\}$  (мм). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(b_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $b_2$  – **еквівалентний діаметр прямокутних повітропроводів** визначимо на універсальній множині  $U(b_2) = \{100, 580, 1050, 1530, 2000\}$  (мм). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(b_2) = \langle \text{малий, середній, великий} \rangle$ .

Фактор  $x_5$  – автоматизація та диспетчеризація визначимо на універсальній множині  $U(x_5) = \{0, 25, 50, 75, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(x_5) = \langle \text{відсутня, частково відсутня, присутня} \rangle$ .

Лінгвістична змінна, що описує вплив якості будівельно-монтажних робіт на енергоефективність, представлена наступним виразом

$$Y = f_y(y_1; y_2; y_3; y_4). \quad (2.12)$$

Фактор  $y_1$  – механічні пошкодження при транспортуванні та монтажу комплектуючих аеродинамічних систем визначимо на універсальній множині  $U(y_1) = \{0, 10, 20, 30, 40\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(y_1) = \langle \text{відсутні, частково відсутні, присутні} \rangle$ .

Фактор  $y_2$  – якість з'єднання повітропроводів, фасонних частин, аеродинамічного обладнання визначимо на універсальній множині

$U(y_2) = \{60, 70, 80, 90, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(y_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $y_3$  – якість кріплення аеродинамічної системи визначимо на універсальній множині  $U(y_3) = \{50, 62, 75, 88, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(y_3) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $y_4$  – дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт визначимо на універсальній множині  $U(y_4) = \{70, 78, 85, 92, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(y_4) = \langle \text{низьке, середнє, високе} \rangle$ .

Лінгвістична змінна, що описує вплив якості експлуатаційних показників на енергоємність, може бути представлена виразом

$$Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6). \quad (2.13)$$

Фактор  $z_1$  – рівень налагодження аеродинамічної системи визначимо на універсальній множині  $U(z_1) = \{60, 70, 80, 90, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(z_1) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle$ .

Фактор  $z_2$  – надійність аеродинамічної системи визначимо на універсальній множині  $U(z_2) = \{6, 7, 8, 9, 10\}$  (балів). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(z_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$ .

Фактор  $z_3$  – кваліфікаційний рівень обслуговуючого персоналу визначимо на універсальній множині  $U(z_3) = \{1, 1,5, 2, 2,5, 3\}$  (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(z_3) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle$ .

Рівнянню (2.13) належить змінна  $z_3$ , яка в свою чергу залежить від наступних факторів

$$z_4 = f_{z_4}(c_1; c_2). \quad (2.14)$$

Фактор  $c_1$  – температура повітря визначимо на універсальній множині  $U(c_1) = \{12, 29, 46, 63, 80\}$  (°C). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(c_1) = \langle \text{низька, нижче середньої, середня, вище середньої, висока} \rangle$ .

Фактор  $c_2$  – вологість повітря визначимо на універсальній множині  $U(c_2) = \{10, 28, 45, 62, 80\}$  (%). Лінгвістичні значення цього

фактору задаються терм-множиною  $T(c_2) = \langle \text{низька, нижче середньої, середня, вище середньої, висока} \rangle$ .

Фактор  $z_5$  – міжремонтні та ремонтні заходи визначимо на універсальній множині  $U(z_5) = \{60, 70, 80, 90, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(z_5) = \langle \text{відсутні, частково відсутні, присутні} \rangle$ .

Фактор  $z_6$  – дотримання чинних норм та правил під час експлуатації визначимо на універсальній множині  $U(z_6) = \{70, 78, 85, 92, 100\}$  (%). Лінгвістичні значення цього фактору задаються терм-множиною  $T(z_6) = \langle \text{низьке, середнє, високе} \rangle$ .

Вищенаведені вирази формують нечітку множину у вигляді лінгвістичних змінних, які віддзеркалюють ієрархічний зв'язок кількісних та якісних параметрів, інтерпретація яких дозволяє розробити математичну модель для оптимізації аеродинамічної системи з метою забезпечення енергоефективного її функціонування [70].

Формування нечітких термів для оцінки значень лінгвістичних змінних, які входять у моделі (2.8 – 2.14), здійснюється за допомогою функцій належності. Побудова функцій належності передбачає перший етап розроблення моделі обчислення - фазифікацію нечітких оцінок факторів впливу, який включає вибір нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів впливу, що заданий на відповідних універсальних множинах [53].

Для досліджуваної предметної області застосовується дзвіноподібна модель функції належності, яка забезпечує достатню "гнучкість" представлення нечіткої інформації.

Запропонована методика побудови функції належності детально розглядається на прикладі фактору  $z_1$  - "рівень налагодження аеродинамічної системи" [53].

1. Фактор  $z_1$  - "рівень налагодження аеродинамічної системи"

$$U(z_1) = [ 60 \dots 100 ] \%$$

Для лінгвістичної оцінки фактора  $z_1$  використовується сукупність нечітких термів:

$$T(z_1) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle.$$

Сформулюємо матрицю парних порівнянь різних рівнів налагодження аеродинамічної системи для термів «низький», «середній», «високий»:

$$A^{\text{низький}}(z_I) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 6/8 & 4/8 & 2/8 & 1/8 \\ u_2 & 8/6 & 1 & 4/6 & 2/6 & 1/6 \\ u_3 & 8/4 & 6/4 & 1 & 2/4 & 1/4 \\ u_4 & 8/2 & 6/2 & 4/2 & 1 & 1/2 \\ u_5 & 8/1 & 6/1 & 4/1 & 2/1 & 1 \end{array} \quad (2.15)$$

$$A^{\text{середній}}(z_I) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 6/4 & 8/4 & 6/4 & 1 \\ u_2 & 4/6 & 1 & 8/6 & 1 & 4/6 \\ u_3 & 4/8 & 6/8 & 1 & 6/8 & 4/8 \\ u_4 & 4/6 & 1 & 8/6 & 1 & 4/6 \\ u_5 & 1 & 6/4 & 8/4 & 6/4 & 1 \end{array} \quad (2.16)$$

$$A^{\text{високий}}(z_I) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 2/1 & 4/1 & 6/1 & 8/1 \\ u_2 & 1/2 & 1 & 4/2 & 6/2 & 8/2 \\ u_3 & 1/4 & 2/4 & 1 & 6/4 & 8/4 \\ u_4 & 1/6 & 2/6 & 4/6 & 1 & 8/6 \\ u_5 & 1/8 & 2/8 & 4/8 & 6/8 & 1 \end{array} \quad (2.17)$$

На підставі рішення матриць парних порівнянь (2.15 – 2.17) отримано функції належностей для всіх термів. Отримані результати функцій належності пронормовано на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності. В результаті цього лінгвістична змінна «рівень налагодження аеродинамічної системи» представлена у вигляді таких нечітких множин.

Лінгвістична змінна «рівень налагодження аеродинамічної системи»:

$$\begin{aligned} \text{“низький”} &= \left\{ \frac{1}{60}; \frac{0,75}{70}; \frac{0,5}{80}; \frac{0,25}{90}; \frac{0,125}{100} \right\}; \\ \text{“середній”} &= \left\{ \frac{0,5}{60}; \frac{0,75}{70}; \frac{1}{80}; \frac{0,75}{90}; \frac{0,5}{100} \right\}; \end{aligned}$$

$$\text{“високий”} = \left\{ \frac{0,125}{60}; \frac{0,25}{70}; \frac{0,5}{80}; \frac{0,75}{90}; \frac{1}{100} \right\};$$

Нечіткі множини описуються функціями належності, які наведено на рис. 2.8.

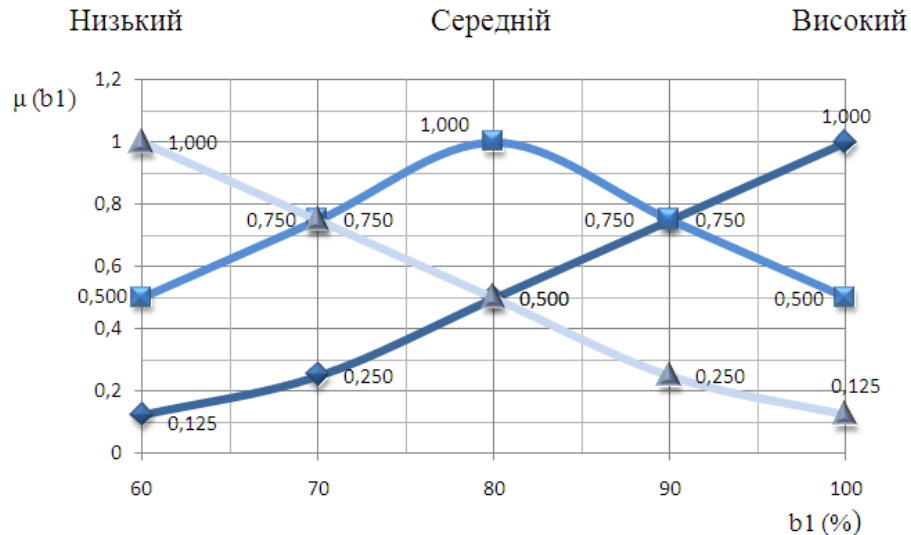


Рисунок 2.8 – Функції належності ЛЗ "рівень налагодження аеродинамічної системи"

На прикладі побудови функцій належності для фактору впливу «рівень налагодження аеродинамічної системи» виконано побудову функцій належності (рис. 2.9, рис. 2.10, рис. 2.11) наступних факторів впливу: науково-технічний рівень проектних рішень, якість будівельно-монтажних робіт та експлуатаційні показники для оцінювання термінальних вершин дерева логічного висновку всіх нечітких термів та проведення подальшого моделювання.

Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень з підвищення енергоефективності функціонування аеродинамічних систем (енергоємність аеродинамічної системи) виконано за допомогою нечітких логічних рівнянь.

Для перетворення нечітких вхідних даних на необхідні керуючі впливи, що мають також нечіткий характер, використовуються нечіткі умовні правила “ЯКЩО - ТО” у термінах лінгвістичних змінних та нечітких множин.

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлює зв’язок між факторами впливу (2.8) на енергоємність функціонування

аеродинамічних систем ( $L_{AM}$ ) з проектними рішеннями ( $X$ ), будівельно-монтажними роботами ( $Y$ ) та експлуатаційними показниками ( $Z$ ), виконується за допомогою системи терм-множини:

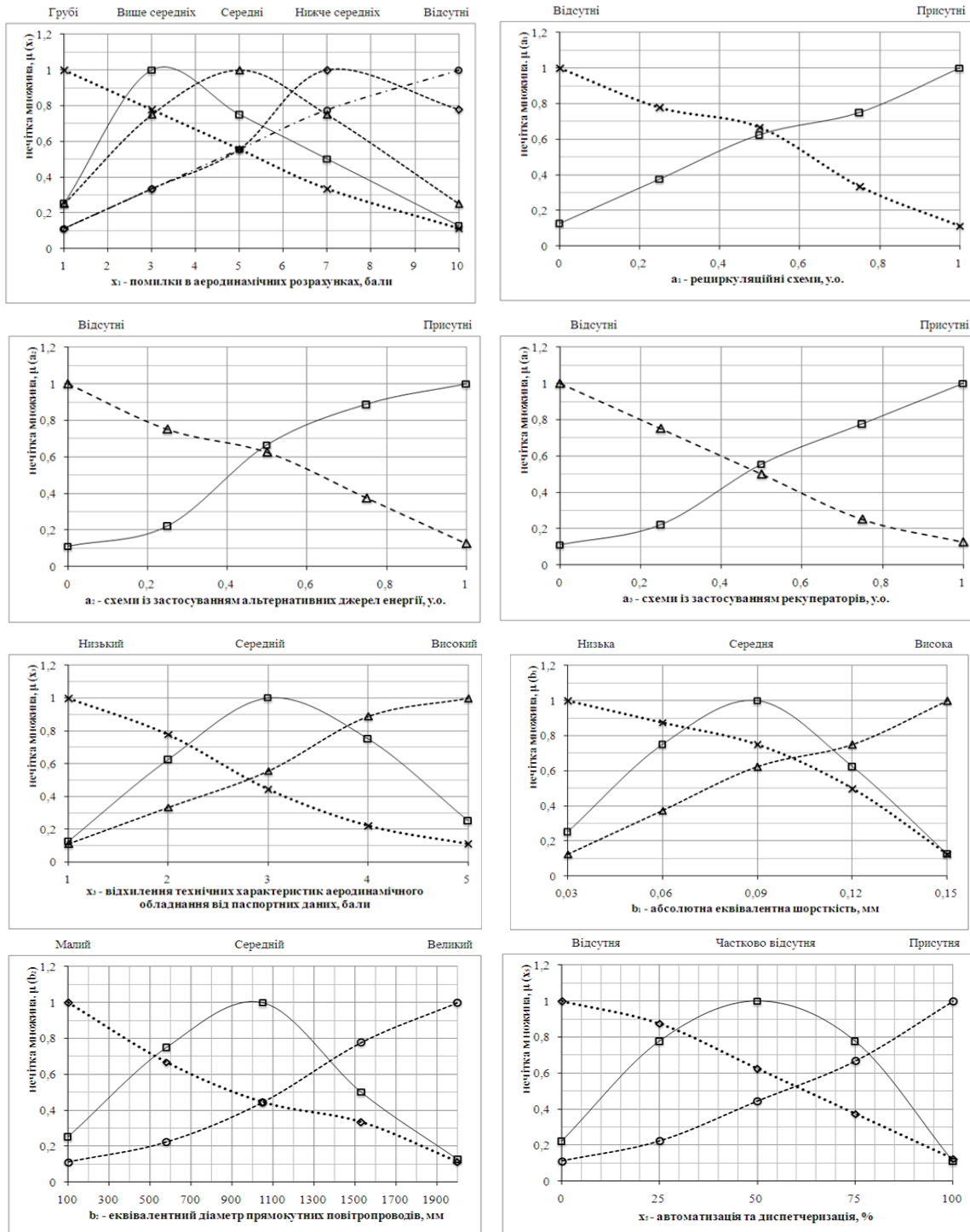


Рисунок 2.9 – Функції належності для лінгвістичних змінних, що описують науково-технічний рівень проектних рішень



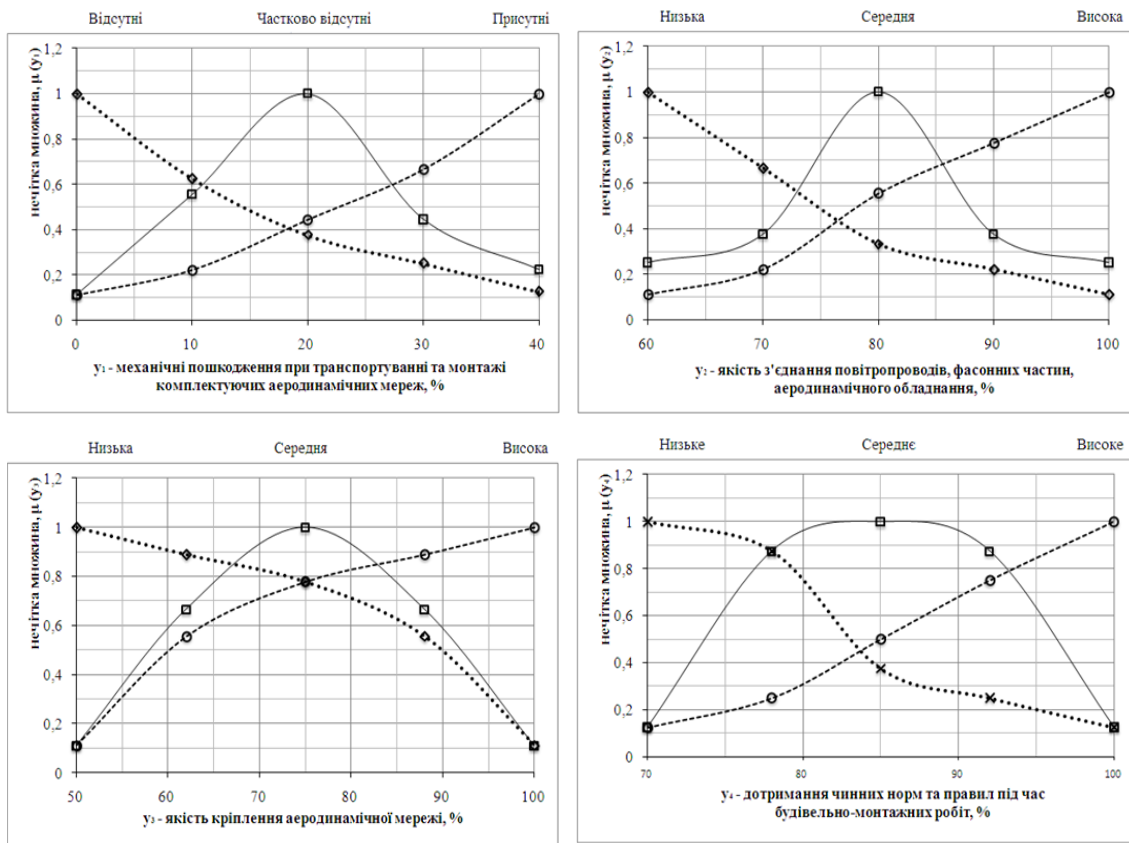


Рисунок 2.10 – Функції належності для лінгвістичних змінних, що описують якість будівельно-монтажних робіт

$T(L_{AM}) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle$ ;

$T(X) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle$ ;

$T(Y) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle$ ;

$T(Z) = \langle \text{низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі} \rangle$ .

Нечітку базу знань, що відповідає залежності (2.8), з урахуванням введених терм-множин наведено в табл. 2.1.

Нечітким правилам для залежності (2.18), що наведені в табл. 3.1, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідного терму [76, 87, 88]

Таблиця 2.1 – Продукційні нечіткі правила “ЯКЩО - ТО” для залежності (2.8)

Умова			Наслідок
ЯКЩО			ТО
Науково-технічний рівень проектних рішень (X)	Будівельно-монтажні роботи (Y)	Експлуатаційні показники (Z)	Енергоємність аеродинамічних мереж ( $L_{AM}$ )
Низький (Н)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	Низька (Н)
Низький (Н)	Нижче середніх (нС)	Низькі (Н)	
Низький (Н)	Низькі (Н)	Нижче середніх (нС)	
Нижче середніх (нС)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	
Низький (Н)	Середні (С)	Середні (С)	Нижче середнього (нС)
Нижче середніх (нС)	Середні (С)	Низькі (Н)	
Середній (С)	Низькі (Н)	Нижче середніх (нС)	
Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Низькі (Н)	
Середній (С)	Середні (С)	Середня (С)	Середня (С)
Нижче середніх (нС)	Середні (С)	Середня (С)	
Середній (С)	Середні (С)	Нижче середніх (нС)	
Середній (С)	Вище середніх (вС)	Нижче середніх (нС)	
Середній (С)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середнього (вС)
Середній (С)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	
Високий (В)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	Висока (В)
Високий (В)	Високі (В)	Вище середніх (вС)	
Високий (В)	Високі (В)	Високі (В)	

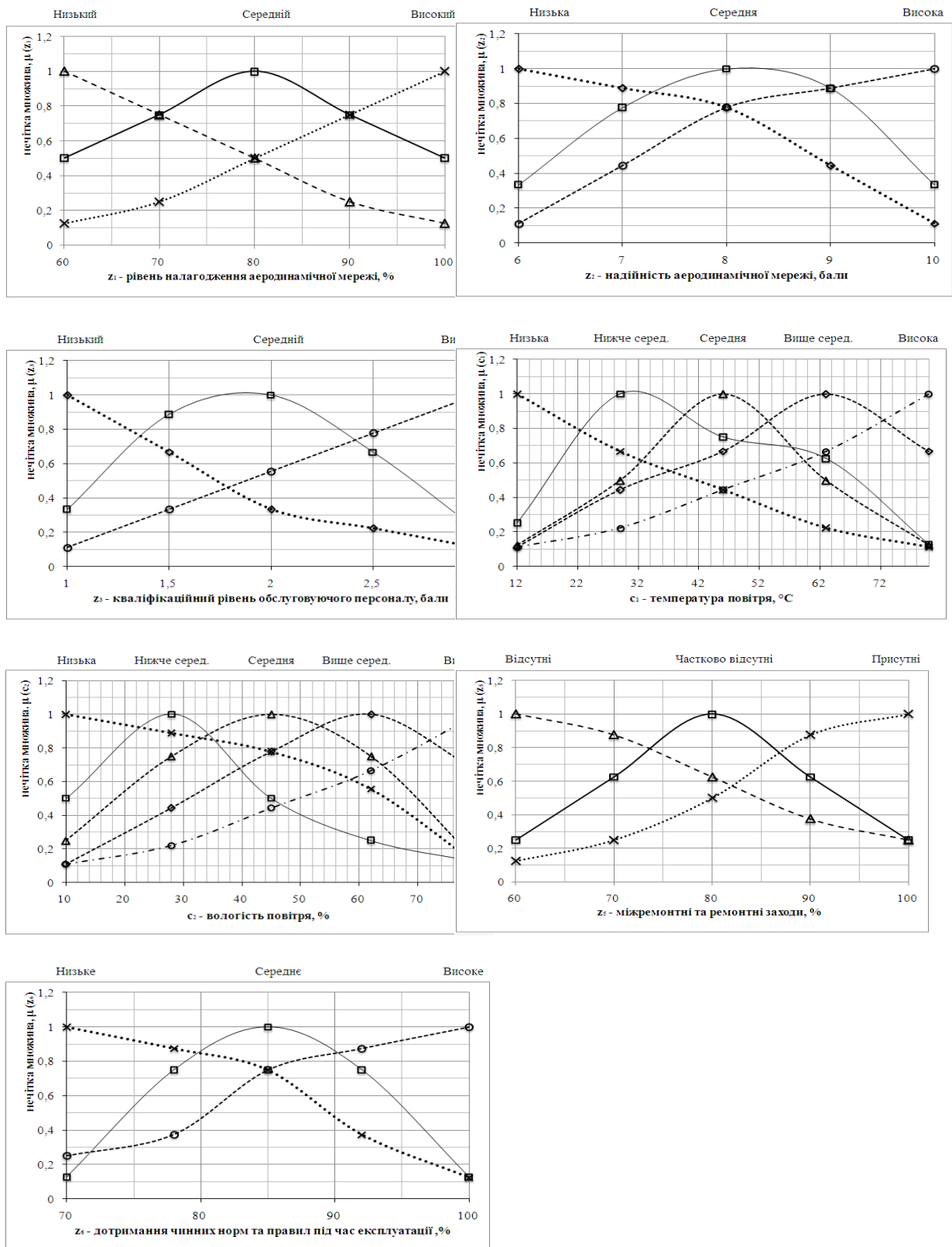


Рисунок 2.11 – Функції належності для лінгвістичних змінних, що описують експлуатаційні показники

$$\mu_H(L_{AM}) = \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z); \quad (2.19)$$

$$\mu_{HC}(L_{AM}) = \mu_H(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_H(Z); \quad (2.20)$$

$$\mu_C(L_{AM}) = \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_{HC}(Z); \quad (2.21)$$

$$\mu_{\delta C}(L_{AM}) = \mu_C(X) \wedge \mu_{\delta C}(Y) \wedge \mu_{\delta C}(Z) \vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{HC}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{\delta C}(Y) \wedge \mu_{HC}(Z); \quad (2.22)$$

$$\mu_B(L_{AM}) = \mu_B(X) \wedge \mu_{\delta C}(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_{\delta C}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z). \quad (2.23)$$

Аналогічно прикладу (табл. 3.1) і (2.19) - (2.23) розробляються лінгвістичні висловлювання та відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної лінгвістичної змінної вищенаведених рівнів.

Використовуючи функції належності (рис. 2.9, 2.10, 2.11), знаходимо аналітичні моделі функцій належності оцінок вхідних змінних для всіх термів, що описуються наступною лінійною залежністю [87]

$$\mu_T(u^*) = \frac{au^* + b}{c}, \quad (2.24)$$

де  $a = \mu_{i+1} - \mu_i$ ;

$b = \mu_i(u_{i+1} - u_i) - u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)$ ;

$c = u_{i+1} - u_i$ .

Для оцінювання енергоємності аеродинамічної системи, з відповідними умовами її функціонування, підставляємо параметри кожної лінгвістичної змінної в аналітичні моделі по заданим рівням, що характеризують дану мережу та знаходимо значення функцій належності змінних X, Y, Z. Отримані значення функцій належності наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення функцій належності факторів, що впливають на енергоємність аеродинамічних систем

Фактор впливу (U*)		Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U*		Значення функції належності змінних (X, Y, Z)
1		2	3		4
<b>Науково-технічний рівень проектних рішень</b>					
x <sub>1</sub> – помилки в аеродинамічних розрахунках		3 бали	$\mu_{Гр}(x_1)=0,52$ $\mu_{вс}(x_1)=1$ $\mu_{с}(x_1)=0,75$ $\mu_{нс}(x_1)=0,33$ $\mu_{вїдс}(x_1)=0,33$		$\mu_{н}(X)=0,63$ $\mu_{нс}(X)=0,77$ $\mu_{с}(X)=0,77$ $\mu_{вс}(X)=0,78$ $\mu_{в}(X)=0,78$
x <sub>2</sub> – конструктивне виконання схем	a <sub>1</sub> – рециркуляційні схеми	0,5 у.о.	$\mu_{вїдс}(a_1)=0,67$ $\mu_{пр}(a_1)=0,63$	$\mu_{н}(x_2)=0,75$ $\mu_{с}(x_2)=0,63$ $\mu_{в}(x_2)=0,89$	
	a <sub>2</sub> – схеми із застосуванням альтернативних джерел енергії	0,75 у.о.	$\mu_{вїдс}(a_2)=0,38$ $\mu_{пр}(a_2)=0,89$		
	a <sub>3</sub> – схеми із застосуванням рекуператорів	0,25 у.о.	$\mu_{вїдс}(a_3)=0,75$ $\mu_{пр}(a_3)=0,22$		
x <sub>3</sub> – відхилення технічних характеристик аеродинамічного обладнання від паспортних даних		2 бали	$\mu_{н}(x_3)=0,78$ $\mu_{с}(x_3)=0,63$ $\mu_{в}(x_3)=0,33$		
x <sub>4</sub> – аеродинамічні характеристики повітропроводів	b <sub>1</sub> – абсолютна еквівалентна шорсткість	0,03 мм	$\mu_{н}(b_1)=1$ $\mu_{с}(b_1)=0,25$ $\mu_{в}(b_1)=0,13$	$\mu_{н}(x_4)=0,44$ $\mu_{с}(x_4)=1$ $\mu_{в}(x_4)=0,44$	
	b <sub>2</sub> – еквівалентний діаметр прямокутних повітро-проводів	1050 мм	$\mu_{м}(b_2)=0,44$ $\mu_{с}(b_2)=1$ $\mu_{вел}(b_2)=0,44$		
x <sub>5</sub> – автоматизація та диспетчеризація		75%	$\mu_{вїдс}(x_5)=0,38$ $\mu_{чв}(x_5)=0,77$ $\mu_{пр}(x_5)=0,67$		

Продовження табл. 2.2

1		2	3		4
<b>Будівельно-монтажні роботи</b>					
у <sub>1</sub> - механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі комплектуючих аеродинамічних систем		10%	$\mu_{\text{Відс}}(y_1)=0,63$ $\mu_{\text{чВ}}(y_1)=0,55$ $\mu_{\text{Пр}}(y_1)=0,22$		$\mu_{\text{H}}(Y)=0,59$ $\mu_{\text{HC}}(Y)=0,59$ $\mu_{\text{C}}(Y)=0,59$ $\mu_{\text{BC}}(Y)=0,76$ $\mu_{\text{B}}(Y)=1$
у <sub>2</sub> – якість з'єднання повітропроводів, фасонних частин, аеродинамічного обладнання		90%	$\mu_{\text{H}}(y_2)=0,23$ $\mu_{\text{C}}(y_2)=0,38$ $\mu_{\text{B}}(y_2)=0,76$		
у <sub>3</sub> – якість кріплення аеродинамічної мережі		88%	$\mu_{\text{H}}(y_3)=0,59$ $\mu_{\text{C}}(y_3)=0,63$ $\mu_{\text{B}}(y_3)=0,88$		
у <sub>4</sub> – дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт		100%	$\mu_{\text{H}}(y_4)=0,13$ $\mu_{\text{C}}(y_4)=0,13$ $\mu_{\text{B}}(y_4)=1$		
<b>Експлуатаційні показники</b>					
z <sub>1</sub> – рівень налагодження аеродинамічної системи		90%	$\mu_{\text{H}}(z_1)=0,75$ $\mu_{\text{C}}(z_1)=0,75$ $\mu_{\text{B}}(z_1)=0,25$		$\mu_{\text{H}}(Z)=1$ $\mu_{\text{HC}}(Z)=1$ $\mu_{\text{C}}(Z)=1$ $\mu_{\text{BC}}(Z)=0,77$ $\mu_{\text{B}}(Z)=0,77$
z <sub>2</sub> – надійність аеродинамічної системи		7 балів	$\mu_{\text{H}}(z_2)=0,9$ $\mu_{\text{C}}(z_2)=0,76$ $\mu_{\text{B}}(z_2)=0,42$		
z <sub>3</sub> – кваліфікаційний рівень обслуговуючого персоналу		2,5 балів	$\mu_{\text{H}}(z_3)=0,23$ $\mu_{\text{C}}(z_3)=0,68$ $\mu_{\text{B}}(z_3)=0,77$		
z <sub>4</sub> – мікроклімат обслуговуючого приміщення	c <sub>1</sub> – температура повітря	46 °C	$\mu_{\text{H}}(c_1)=0,45$ $\mu_{\text{HC}}(c_1)=0,75$ $\mu_{\text{C}}(c_1)=1$ $\mu_{\text{BC}}(c_1)=0,66$ $\mu_{\text{B}}(c_1)=0,44$	$\mu_{\text{H}}(z_4)=0,5$ $\mu_{\text{C}}(z_4)=1$	
	c <sub>2</sub> – вологість повітря	45%	$\mu_{\text{H}}(c_2)=0,78$ $\mu_{\text{HC}}(c_2)=0,5$ $\mu_{\text{C}}(c_2)=1$ $\mu_{\text{BC}}(c_2)=0,77$ $\mu_{\text{B}}(c_2)=0,44$	$\mu_{\text{B}}(z_4)=0,44$	
z <sub>5</sub> – міжремонтні та ремонтні заходи		100%	$\mu_{\text{Відс}}(z_5)=1$ $\mu_{\text{чВ}}(z_5)=0,25$ $\mu_{\text{Пр}}(z_5)=0,25$		
z <sub>6</sub> – дотримання чинних норм та правил під час експлуатації		100%	$\mu_{\text{H}}(z_6)=0,13$ $\mu_{\text{C}}(z_6)=0,13$ $\mu_{\text{B}}(z_6)=1$		

Використовуючи аналітичні формули (2.19) - (2.23) та значення функцій належності змінних X, Y, Z (табл. 3.2) отримуємо значення функцій належності терм-оцінок змінної  $L_{AM}$

$$\mu_H(L_{AM}) = 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{HC}(L_{AM}) = 0,63 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_C(L_{AM}) = 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,76 \cdot 1 = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{BC}(L_{AM}) = 0,77 \cdot 0,76 \cdot 0,77 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,59 \cdot 1 \vee 0,77 \cdot 0,76 \cdot 1 = 0,77 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,77;$$

$$\mu_B(L_{AM}) = 0,78 \cdot 0,76 \cdot 0,77 \vee 0,78 \cdot 1 \cdot 0,77 \vee 0,78 \cdot 1 \cdot 0,77 = 0,78 \cdot 1 \cdot 1 = 0,78.$$

Наступним (кінцевим) етапом моделювання є процес дефазифікації. На вході цього блоку маємо нечітку множину (об'єднання вихідних нечітких множин), а на виході чітке значення. Використовуємо найбільш поширений метод дефазифікації знаходження “центру тяжіння” плоскої фігури, яка обмежена функцією належності нечіткої множини та горизонтальною координатою [76, 87, 88].

Для визначення величини енергоємності аеродинамічної системи використаємо бальну шкалу, згідно рекомендацій [87, 88]. Інтуїтивна величина бальної шкали не буде впливати на істинний результат величини енергоємності аеродинамічної системи: запропонуємо – 5-ти бальну шкалу.

Здійснимо прогнозування енергоємності аеродинамічної системи задаючись конкретними параметрами факторів впливу (табл. 2.2) та використовуючи наступну формулу [87] за умови, що  $\underline{L}_{AM} = 1$  бал,  $\overline{L}_{AM} = 5$  балів

$$L_{AM}^* = \frac{\sum_{i=1}^m M_{qi}(L_{AM}) \cdot \left[ \underline{L_{AM}} + \frac{\overline{L_{AM}} - \underline{L_{AM}}}{m-1} \cdot (i-1) \right]}{\sum_{i=1}^m M_{qi}(L_{AM})} =$$

$$= \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 0,77 \cdot 4 + 0,78 \cdot 5}{1 + 1 + 1 + 0,77 + 0,78} = 2,85 \text{ балів},$$

де  $\underline{L_{AM}}$  ( $\overline{L_{AM}}$ ) – найменше (найбільше) значення змінної  $L_{AM}$ .

Отже, енергоємність функціонування аеродинамічної системи за 5-ти бальною шкалою з запропонованими параметрами (табл. 2.2) становить 2,85 балів. Отриманий результат прогнозованої ефективності аеродинамічної системи дозволяє варіюючи змінними факторами моделювання визначити найбільш пріоритетні напрямки вдосконалення як окремих елементів так і системи в цілому.

### **2.3 Моделювання прогнозованої надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем**

Проектування та експлуатація складних вентиляційних та аспіраційних систем (аеродинамічних систем), як невід’ємної ланки для створення мікроклімату та технологічної складової промислових підприємств, вимагають наукового підходу щодо вибору методів підвищення їх надійного та ефективного функціонування. Одним з найголовніших показників якості роботи складових аеродинамічних систем є надійність - властивість складових системи зберігати на протязі часу свою працездатність: можливість виконувати задані функції при збереженні технічних показників в межах, встановлених нормативно-технічною документацією [16]. Надійність є одним з основних показників якості обладнання, що відображає в ньому зміну на протязі всього часу його експлуатації. Згідно [16] головною з властивостей, наведених в [54], яку необхідно цілеспрямовано враховувати та визначати при проектуванні аеродинамічних систем є безвідмовність. Безвідмовність характеризується показником  $P(t)$  – “ймовірність безвідмовної роботи”, тобто ймовірність того, що в заданому проміжку часу  $t$  порушення працездатності обладнання системи не виникають.



На відміну від постійних відмов, які можливо передбачити заздалегідь та завчасно вжити заходів, раптові відмови роботи системи передбачити практично неможливо, що зазвичай виникають без виражених передуючих ознак та являють найбільшу загрозу. Найбільш поширеним математичним методом прогнозування появи раптових відмов є теорія ймовірності, яка виявляє закономірності, виникаючі при взаємодії великої кількості випадкових факторів. Застосування теорії ймовірності як одного з основних математичних апаратів не завжди чітко оцінює прогнозовану надійність функціонування аеродинамічних систем внаслідок відсутності порівняння з іншими методами прогнозування.

Оцінювання прогнозованої надійності складних багатозв'язних систем, якими є вентиляційні та аспіраційні системи, за допомогою нейро-нечіткої мережі є одним з сучасних методів інтелектуальної технології як універсального апроксиматора складних функціональних залежностей [53, 78]. Застосування нейрон-нечіткої мережі обумовлює вивчення структури об'єкту за допомогою спеціально розроблених алгоритмів з можливістю використання експертних знань про його функціонування.

Для пошуку оптимальних ефективних енергоощадних заходів при прийнятті рішень під час проектування, будівництва та експлуатації доцільно використати математичний апарат з оцінювання прогнозованої надійності функціонування аеродинамічних систем за допомогою нейро-нечіткої мережі.

Розроблення структури моделі прогнозування надійності вентиляційних та аспіраційних систем за допомогою нейро-нечіткої мережі вимагає застосування універсального апроксиматора [53, 78, 86] та виведеного дерева логічного висновку (рис 2.7). Вузол дерева висновку відповідає базі знань, наведених в [75], з використанням терм-множин експертних оцінок.

На рис.2.12 наведена структура нейро-нечіткої мережі, що відповідає дереву логічного висновку (рис.2.7).

Величина ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем обумовлюється факторами впливу, що замінюються наступними підстановками:

- ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем

$$L_{AM} = F_{L_{AM}}(X, Y, Z, W_{L_{AM}}, B_{L_{AM}}, C_{L_{AM}}), \quad (2.25)$$

- науково-технічний рівень проектних рішень

$$X = f_X(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, W_X, B_X, C_X), \quad (2.26)$$

- якість будівель-монтажних робіт

$$Y = f_Y(y_1, y_2, y_3, y_4, W_Y, B_Y, C_Y), \quad (2.27)$$

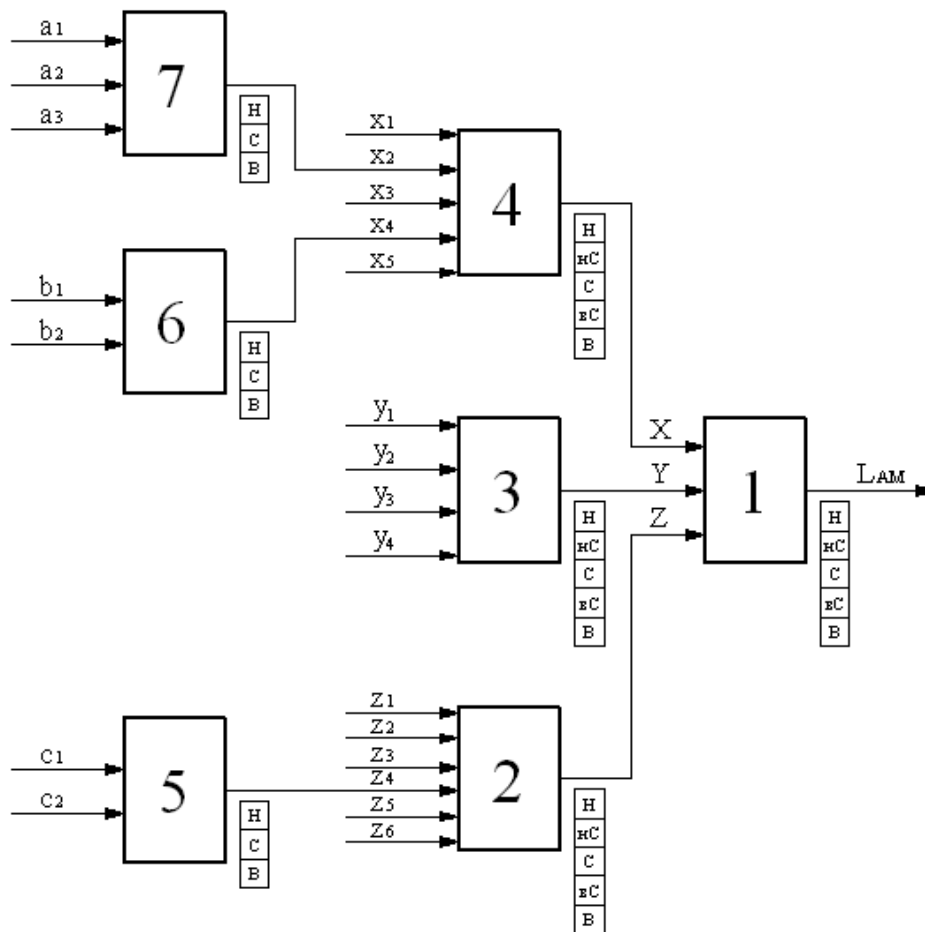


Рисунок 2.12 – Структура нейро-нечіткої мережі оцінювання прогнозуваної надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем

- експлуатаційні показники

$$Z = f_Z(z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, W_Z, B_Z, C_Z), \quad (2.28)$$

- помилки в аеродинамічних розрахунках

$$x_2 = f_{x_2}(a_1, a_2, W_{x_2}, B_{x_2}, C_{x_2}), \quad (2.29)$$

- аеродинамічні характеристики повітропроводів

$$x_4 = f_{x_4}(b_1, b_2, W_{x_4}, B_{x_4}, C_{x_4}), \quad (2.30)$$

- мікроклімат обслуговуючого приміщення

$$z_4 = f_{z_4}(c_1, c_2, W_{z_4}, B_{z_4}, C_{z_4}), \quad (2.31)$$

де  $W_i = (w_1, w_2, \dots, w_N)$  - вектор ваг нечітких правил,  $i \in (X, Y, Z, x_2, x_4, z_4)$  ;

$B_i = (b_1, b_2, \dots, b_q)$  та  $C_i = (C_1, C_2, \dots, C_q)$  - вектори параметрів налаштування дзвіноподібної функції належності,  $i \in (X, Y, Z, x_2, x_4, z_4)$  ;

$F_{L_{AM}}$  - оператор зв'язку вхідних та вихідних перемінних;

$N$  - загальна кількість правил у ієрархічній побудові нечіткій баз знань;

$q$  - загальна кількість нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів впливу на величину ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем;

Нечіткі моделі (2.25) – (2.31) включають фактори впливу на оцінювання прогнозованої надійності функціонування аеродинамічних систем з врахуванням векторів  $W$ ,  $B$ ,  $C$ , координати яких встановлюються для кожної із залежностей.

Для визначення зв'язку між функціями належності вхідних та вихідних перемінних використовуємо нечітке логічне рівняння (2.32), отримавши з нечіткої бази знань шляхом заміни змінних на їх функції належності, а логічні операції I ( $\wedge$ ) та АБО ( $\vee$ ) на операції  $\min$  і  $\max$

$$\mu^{d_j}(L_{AM}) = a_{j1} \cdot [\mu^{j1}(X) \wedge \mu^{j1}(Y) \wedge \mu^{j1}(Z)] \vee a_{j2} \cdot [\mu^{j2}(X) \wedge \mu^{j2}(Y) \wedge \mu^{j2}(Z)], \quad j = \overline{1, 5}; \quad (2.32)$$

де  $d_j$  - клас рішення, який відповідає вихідному терму  $\mu^{d_j}(L_{AM})$ ,  $j = \overline{1, 5}$ ;

$\mu^{d_j}(L_{AM})$  - функція незалежності виходу  $L_{AM}$  до інтервалу  $d_j \in [L_{AM_{j-1}}; L_{AM_j}]$ .

Для перетворення нечіткої бази знань в чітку форму застосовуємо операцію дефазифікації. Ймовірність безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем, що відповідає нечіткій множині [78, 86], здійснюється за допомогою математичного апарату (2.33)

$$L_{AM} = \frac{\underline{L}_{AM}\mu^{d_1}(L_{AM}) + L_1\mu^{d_2}(L_{AM}) + L_2\mu^{d_3}(L_{AM}) + L_3\mu^{d_4}(L_{AM}) + \overline{L}_{AM}\mu^{d_5}(L_{AM})}{\mu^{d_1}(L_{AM}) + \mu^{d_2}(L_{AM}) + \mu^{d_3}(L_{AM}) + \mu^{d_4}(L_{AM}) + \mu^{d_5}(L_{AM})}; \quad (2.33)$$

де  $\underline{L}_{AM}$  ( $\overline{L}_{AM}$ ) - найменше (найбільше) значення змінної  $L_{AM}$ .

Функції належності лінгвістичних термів вхідних змінних можуть бути побудовані як експериментально (за допомогою методу парних порівнянь Сааті), так і розраховуватись аналітично

$$\mu^{jp}(X) = \frac{1}{1 + \left(\frac{X - b^{jp}}{c^{jp}}\right)^2}; \quad \mu^{jp}(Y) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Y - b^{jp}}{c^{jp}}\right)^2}; \quad \mu^{jp}(Z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Z - b^{jp}}{c^{jp}}\right)^2}; \quad p = \overline{1,2}, \quad (2.34)$$

де  $\mu^{jp}(X)$ ,  $\mu^{jp}(Y)$ ,  $\mu^{jp}(Z)$  – функції належності факторів  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  до термів, якими вони оцінюються з терм-множини  $T$ ;

$b^{jp}$ ,  $c^{jp}$  – параметри настройки функцій належності;

$p$  – кількість рядків-кон'юнкцій, що відповідають класу рішення  $d_j \in [L_{j-1}, L_j]$ .

Отримана нечітка база знань відповідає етапу грубого налагодження. Тому процес налагодження грубої нечіткої бази знань можливий при наявності вибірки достовірних експериментальних даних, що являє собою сукупність  $M$  пар типу

$$\langle \widehat{X}_l, \widehat{Y}_l, \widehat{Z}_l, \widehat{L}_{AM} \rangle, \quad l = \overline{1, M}, \quad (2.35)$$

де

$\widehat{X}_l, \widehat{Y}_l, \widehat{Z}_l = \{(\widehat{x}_1^l, \widehat{x}_2^l, \widehat{x}_3^l, \widehat{x}_4^l, \widehat{x}_5^l), (\widehat{a}_1^l; \widehat{a}_2^l; \widehat{a}_3^l), (\widehat{b}_1^l; \widehat{b}_2^l), (\widehat{y}_1^l; \widehat{y}_2^l; \widehat{y}_3^l; \widehat{y}_4^l), (\widehat{z}_1^l; \widehat{z}_2^l; \widehat{z}_3^l; \widehat{z}_4^l; \widehat{z}_5^l; \widehat{z}_6^l), (\widehat{c}_1^l; \widehat{c}_2^l)\}$  - сукупність значень факторів, що впливають на величину ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем;

$\widehat{L}_{AM}$  - відповідні їм експериментальні значення ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем.

Чітке налагодження вищенаведеної моделі обумовлюється підбором таких параметрів функцій належності і ваг нечітких правил, що забезпечать мінімальну розбіжність між розрахунковими результатами та експериментальними даними

$$\sum_{l=1}^M (F_{L_{AM}}(\widehat{X}_l, \widehat{Y}_l, \widehat{Z}_l, W, B, C) - \widehat{L}_{AM})^2 \rightarrow \min_{W, B, C}. \quad (2.36)$$

Налагодження параметрів нейрон-нечіткої мережі здійснюється за допомогою наступних рекурентних співвідношень

$$w_{jp}(t+1) = w_{jp}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{jp}(t)}; \quad (2.37)$$

$$c_i^{jp}(t+1) = c_i^{jp}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial c_i^{jp}(t)}; \quad (2.38)$$

$$b_i^{jp}(t+1) = b_i^{jp}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial b_i^{jp}(t)}, \quad (2.39)$$

де  $b_i^{jp}(t)$ ,  $c_i^{jp}(t)$ ,  $w_{jp}(t)$ , - параметри функцій належності і ваги правил на  $t$ -му кроці навчання;

$\eta$  – параметр, що характеризує швидкість навчання та вибирається відповідно до рекомендацій роботи.

Фрагмент нейрон-нечіткої мережі, що втілює базу знань оцінювання прогнозованої надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем, зображено на рис. 2.13.

Результатом обчислення за формулами (2.37) – (2.39) є пошук мінімізації критерію якості налагодження параметрів нейро-нечіткої мережі для оцінювання прогнозованої надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем

$$E_t = \frac{1}{2} (\widehat{L}_{AM} - L_{AM})^2, \quad (2.40)$$

де  $\widehat{L}_{AM}$ ,  $L_{AM}$  - відповідно, модельне (розрахункове) та експериментальне значення величини ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем.

Співвідношення для розрахунку частинних похідних (2.37) – (2.39), останні які характеризують чутливість похибки мережі ( $E_t$ ) до зміни її параметрів, обумовлені структурою мережі, що втілює нечітку модель оцінювання прогнозування надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем з врахуванням властивостей ієрархічності даної структури.

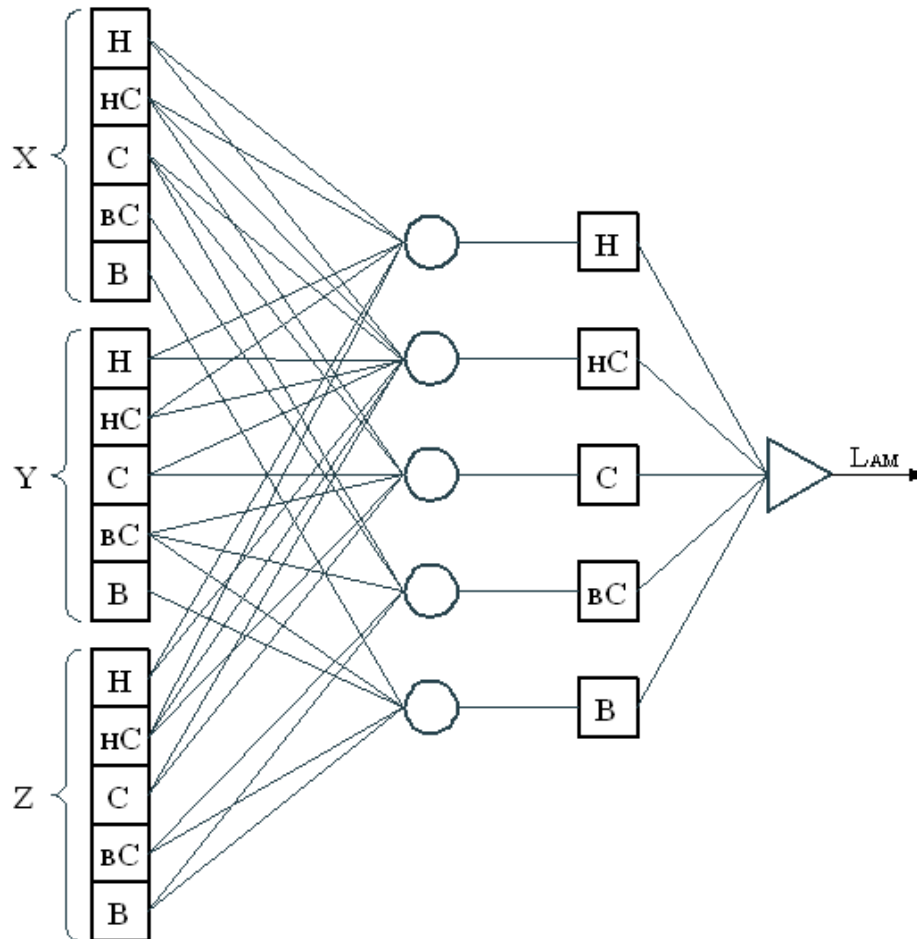


Рисунок 2.13 – Нейро-нечітка мережа оцінювання прогнозованої надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем

Модель багатofакторної оцінки енергоємності вентиляційних та аспіраційних систем дозволяє врахувати особливості факторів впливу, з врахуванням кількісних та якісних показників, що виникають на стадії проектування, під час будівельно-монтажних робіт та в процесі експлуатації. Модель також дозволяє надати необхідні рекомендації інтелектуальної підтримки прийняття рішень на початкових стадіях проектування вентиляційних та аспіраційних систем.

Альтернативний підхід оцінювання прогнозованої надійності функціонування вентиляційних та аспіраційних систем за допомогою нейрон-нечітких мереж з можливістю використання експертних знань, експериментальних даних та наступним їх обробленням є актуальним для пошуку оптимальних проектних рішень. Застосування нейро-нечіткої мережі обумовлює чітке налагодження моделі з наступним її навчанням за допомогою навчальної вибірки вхідних факторів впливу та виходу ймовірності безвідмовної роботи функціонування вентиляційних та аспіраційних систем.

## **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ РЕГУЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА РОБОЧІ ПАРАМЕТРИ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ ТА АСПІРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

### **3.1 Задачі та об'єкт експериментальних досліджень**

Одним з основних етапів в розробленні ефективних інноваційних проектів з енергозбереження є експериментальні підтвердження теоретичних положень визначення основних параметрів оптимізації робочого процесу вентиляційних та аспіраційних систем [28, 29, 30, 36, 84, 93]. Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних задач:

- проектування та виготовлення експериментальної установки з дослідження робочих параметрів вентиляційної та аспіраційної систем з регулювальним пристроєм удосконаленої конструкції;
- перевірка працездатності об'єкта дослідження – удосконаленої конструкції регулювального пристрою (ДКЕВ);
- вибір контрольно-вимірювальної та реєструючої апаратури;
- проведення експериментальних досліджень та оброблення експериментальних даних з використанням сучасного математичного аналізу;
- встановлення закономірностей зміни оптимальних робочих режимів при ефективному процесі регулювання вентиляційної та аспіраційної мереж;
- перевірка адекватності аналітичних припущень при формуванні математичного апарату робочого процесу;

Об'єктом дослідження є аеродинамічна установка, що включає систему повітропроводів з влаштованими конструкціями регулювальних пристроїв, необхідне комплектуюче обладнання, контрольно-вимірювальну апаратуру [15, 28, 84].

Експериментальні дослідження роботи регулювальних пристроїв передбачають два етапи: для системи вентиляції (однофазне середовище - повітря) та для системи аспірації (багатофазне середовище – повітря разом з різного роду домішками).

Комплексний підхід при проектуванні аеродинамічної мережі та енергоефективне функціонування залежить від оптимальної взаємодії



всіх її елементів, одним з яких є регулювальні пристрої [6, 13, 16, 17, 20, 28, 29, 30, 42, 43, 96]. Нечіткість налагоджування аеродинамічної мережі при використанні існуючих засобів регулювання призводить до похибки вимірювання швидкостей 15-20% [13, 37]. Однією з причин яких є неврахування виникнення похибок при осьових замірах швидкостей повітря, через їх значну нестабільність [13, 37].

Неефективність існуючих засобів регулювання робочих параметрів визначає пошук шляхів вирішення науково-технічних задач підвищення техніко-економічних характеристик аеродинамічної мережі, оптимізації їх конструктивних та аеродинамічних характеристик. Дослідження аеродинамічних процесів, виявлення впливу конструктивно-технологічних параметрів регулювальних пристроїв на закономірність зміни аеродинаміки транспортованого робочого середовища невід'ємно пов'язано з експериментом, початковим етапом якого є його планування [2, 14, 94].

Ефективність регулювання аеродинамічної мережі залежить від плавності втрати тиску та збільшення величини його діапазону від мінімального до максимального на регулювальній ділянці [37]. Регулювальний пристрій в аеродинамічній мережі створює місцевий опір, тому втрата тиску на ньому визначається за формулою [6, 72, 96]

$$\Delta p = \xi \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (3.1)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт місцевого опору регулювального пристрою;

$\rho$  - густина робочого середовища, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  - швидкість робочого середовища, м/с.

Керування потоками повітря в аеродинамічних мережах здійснюється механічною арматурою різного призначення, різновидом якої є дросель-клапан для регулювання витрати робочого середовища на відгалуженнях, надалі ДКЗВ. Влаштування регулювальної пластини або ряд пластин всередині корпусу повітропроводу обумовлює інтенсивне вихроутворення, турбулентність, при зіткненні робочого середовища з регулюючою пластиною [8, 28].

Для зменшення турбулентності, впорядкованості аеродинамічних потоків розроблені нові конструкції дросель-клапанів, надалі ДКЕВ, що захищені патентами України на корисну модель [29-37]. Одна з

конструкцій регулювального пристрою зі зручнообтічними виконавчими елементами наведена на рис. 3.1 [62].

Регулювальний пристрій (рис. 3.1) включає: корпус 1, всередині якого герметично закріплена еластична розтягувальна вставка 2, всередині корпуса встановлені два регулювально-запірні елементи 3, які своїми кінцями закріплені до регулювальних гвинтів 4. Регулювальні гвинти 4 розташовані по краях видовжених сторін корпуса 1 та закріплені до останнього за допомогою заглушок 6, які розташовані на кінцях регулювальних гвинтів 4. По центру регулювальних гвинтів 4 закріплені колеса регулювання 5 відповідно. Еластична розтягувальна вставка 2 розміщена між регулювально-запірними елементами 3.

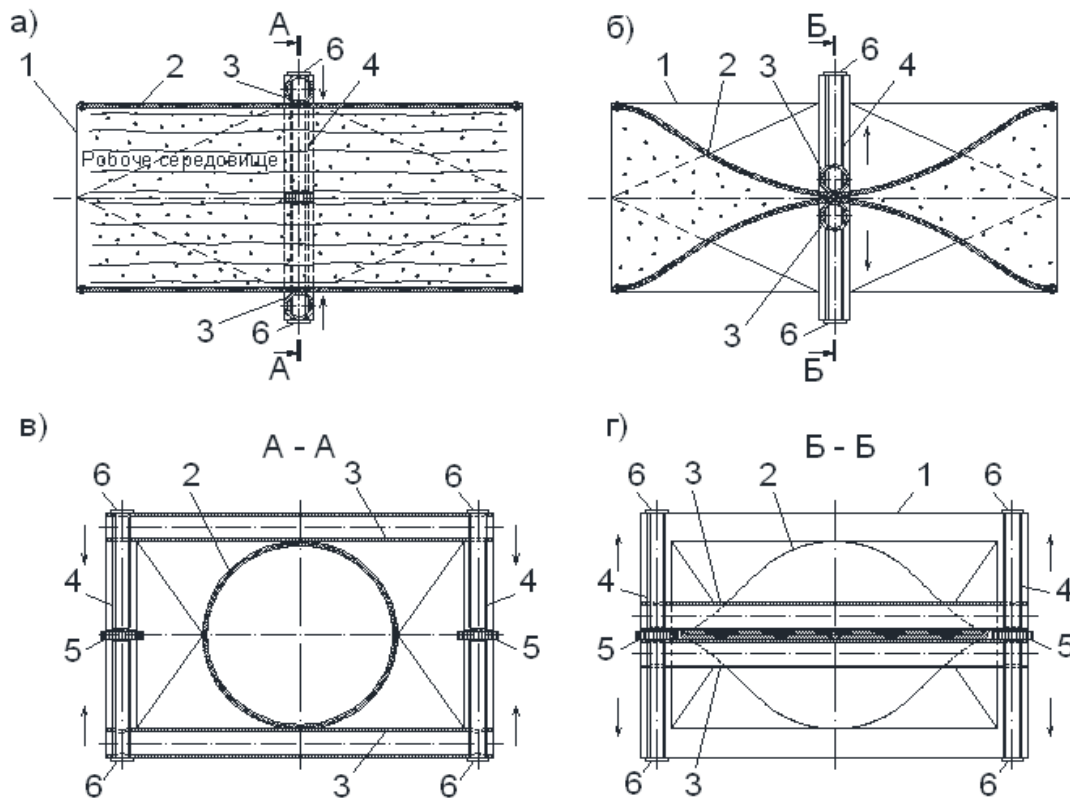


Рисунок 3.1. – Регулювальний пристрій з зручнообтічними регулювальними елементами (ДКЕВ):

1 – корпус; 2 – еластична розтягувальна вставка; 3 – регулювально-запірні виконавчі елементи; 4 – регулювальні гвинти; 5 – колеса регулювання; 6 – заглушки.

Регулювальний пристрій (рис. 3.1) працює наступним чином.

В початковому положенні, при повністю відкритому прохідному перерізі, регулювально-запірні виконавчі елементи 3 знаходяться у верхньому положенні (рис. 3.1). При необхідності створення регулювального або запірного процесу рухомого робочого середовища, колесами регулювання 5 здійснюють оберти. Це в свою чергу приводить до обертання регулювальних гвинтів 4. Внаслідок наявності різьбового з'єднання між регулювальними гвинтами 4 та регулювально-запірними виконавчими елементами 3, при обертанні регулювальних гвинтів 4 відбувається переміщення по останнім регулювально-запірних виконавчих елементів 3 до осі корпусу 1. Видовжені сторони корпусу 1 створюють умови для компенсації необхідного об'єму здавленої частини еластичної розтягувальної вставки 2. Регулювальні гвинти 4 закріплені до корпусу 1 за допомогою заглушок 6.

Звужувальна область, що утворюється в результаті надавлювання регулювально-запірних виконавчих елементів 3 на еластичну розтягувальну вставку 2, створює плавний спектр обтікання з невеликою зоною хаотичного вихрового руху за звужувальною областю. Така область обтікання спостерігається у каплеподібного тіла, яке в аеродинаміці називають – зручнообтічним. Утворення за тілом невеликої області вихроутворення сприяє покращенню аеродинамічних властивостей протікання струмینی чистого повітря та повітря разом з різного роду домішками. Протікання такого процесу в дросельному пристрої призводить до підвищення енергоефективної роботи вентиляційних систем в цілому.

## **3.2 Методика експериментальних досліджень та результати чисельного моделювання робочих параметрів системи аспірації з різними конструкціями регулювальних пристроїв**

### **3.2.1 Конструктивно-технологічна схема експериментальної установки**

Для дослідження робочих параметрів регулювальних пристроїв ДКЗВ та ДКЕВ запроектована та виготовлена експериментальна установка, конструктивно-технологічну схему якої наведено на рис.

3.2, а загальний вид на рис. 3.3 та рис. 3.4 [21, 22, 24, 35, 37, 57, 58, 72, 77, 79, 89, 90, 91, 97, 106].

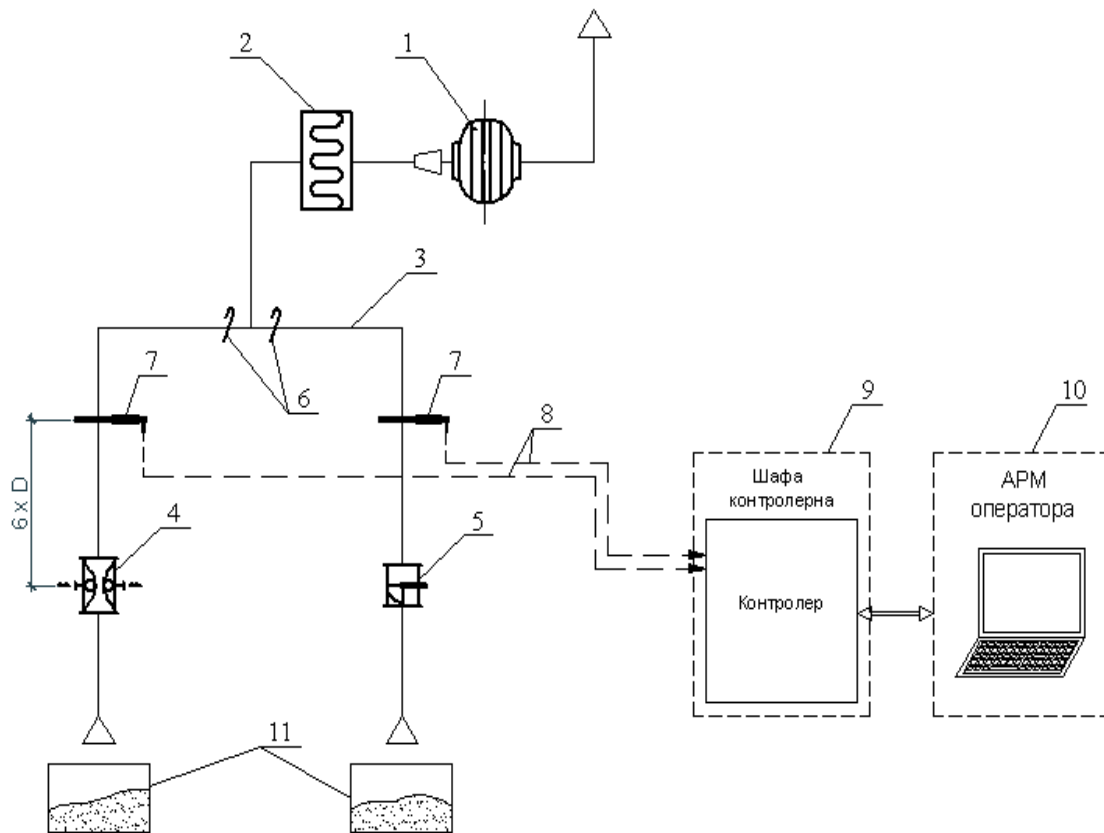


Рисунок 3.2 – Конструктивно-технологічна схема експериментальної установки:

1 – вентиляційний агрегат VKA125LD; 2 – пилочисне обладнання (фільтр) [85]; 3 – аеродинамічна мережа (повітропровід) Ø100мм [15]; 4 – регулювальний пристрій з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ); 5 – регулювальний пристрій традиційного виконання (з влаштованою всередині регулювальною пластиною (ДКЗВ)); 6 – шибер; 7 – сенсори динамічного перепаду тиску; 8 – кабельно-провідникова мережа; 9 – шафа з контролером; 10 – автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора; 11 – ємність для транспортованого середовища (цукрового пилу)

Експериментальні аеродинамічні випробування проводились згідно методики [50]. При проведенні експерименту заміри тиску робочого середовища виконуються при перемінному регулюванні аеродинамічної мережі різними конструкціями регулювальних

пристроїв (рис. 3.2), відповідно 4 та 5, відсікаючи переміно повітропровід 3 шиберами 6. Значення втрат тиску на регулювальних пристроях 4 та 5 сприймаються сенсорами динамічного перепаду тиску 7, а потім через шафу з контролером 9 передаються до автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора 10 [77].



Рисунок 3.3 – Загальний вид фрагменту експериментальної установки. Фото



Рисунок 3.4 – Конструктивне виконання регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами (фото):  
 а) неробоче положення; б) робоче положення

Під час експериментальних досліджень впливу конструктивних параметрів регулювального пристрою на втрати тиску в аеродинамічній мережі використовувалась контрольно-вимірювальна та реєструвальна апаратура, технічні характеристики якої наведено в табл. 3.1 [7, 72, 77].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики реєструвальної апаратури, використаної в експериментальних дослідженнях

№ п/п	Найменування засобу вимірювання	Технічна характеристика	
		Параметр	Значення
1	Диференційний манометр TESTO 510	діапазон вимірювання похибка  робоча температура	0 ... 100 гПа; ±0,03 гПа (0...0,3 гПа); ±0,05 гПа (0,31...1,0гПа); ±(0,1 гПа+1,5% від вимір. величини); 0 ... +40 °С
2	Трубка Піто	довжина діаметр	350 мм 7 мм
3	Термометр спиртовий	діапазон вимірювання похибка ціна поділки	-30 ... +100 °С; ±0,1°С; 1 °С;
4	Барометр-анероїд БАММ-1	діапазон вимірювання похибка ціна поділки шкали тиску	80 ... 160 кПа; ±0,2 кПа; 0,1 кПа
5	Лазерний вимірювач дистанції Leica DISTO D2	вимірювальна довжина робоча температура точність вимірювання	0,05... 60 м; 0 ... +40 °С; ±1,5мм
6	Ваги цифрові Digital Scale	діапазон вимірювання дискретність	0,01 ... 300 г 0,01 г

Розташування реєструвальної апаратури в аеродинамічній мережі визначалось з врахуванням уникнення впливу на точність реєстрації показників повітряних потоків, конвективних потоків та випромінювання, вібрацій [7, 24, 37, 97].

Співставлення результатів вимірювань тиску робочого середовища, при перемінному регулюванні аеродинамічної мережі регулювальними пристроями двох різних конструкцій ДКЗВ та ДКЕВ, здійснюється при однакових їх площах поперечного перерізу  $F_1 = F_2$  (рис. 3.5).

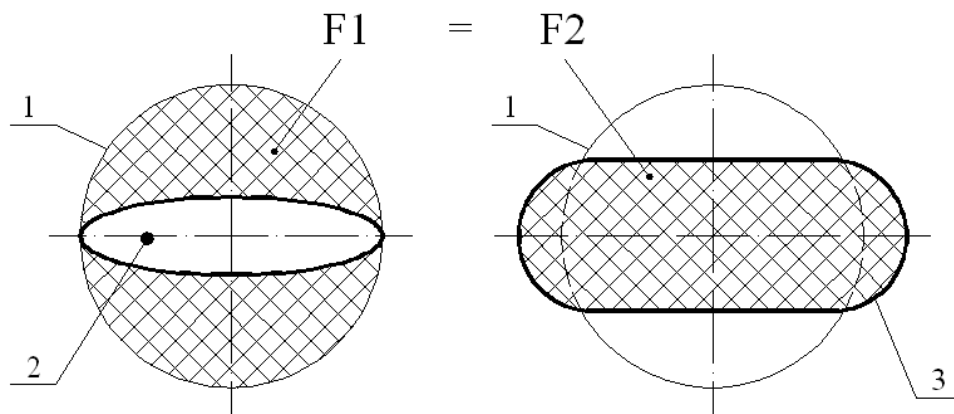


Рисунок 3.5 – Схема співставлення площ поперечних перерізів регулювальних пристроїв ДКЗВ та ДКЕВ:

1 – корпус; 2 – регулювальний орган – металевий диск; 3 – регулювальний орган – еластична вставка; F1 – площа поперечного перерізу регулювального пристрою традиційного виконання (ДКЗВ); F2 – площа поперечного перерізу регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ).

Дослідження роботи регулювальних пристроїв виконано в системі аспірації, що є технологічною складовою цукрових заводів. Згідно [20] приймаємо запиленість відсмоктуючого повітря  $800 \text{ мг/м}^3$ . Так як концентрація цукрового пилу може набагато перевищувати рекомендовану концентрацію, внаслідок осідання цукрового пилу на металевих конструкціях, обладнаннях, збільшимо концентрацію в 2 рази, що і буде верхньою межею варіювання  $1600 \text{ мг/м}^3$ . Інтервал варіювання становитиме  $800 \dots 1600 \text{ мг/м}^3$ . В експериментальній установці для досягнення заданої концентрації транспортованого середовища в робочому середовищі (від  $800$  до  $1600 \text{ мг/м}^3$ ) в ємність 11 додавали необхідну кількість цукрового пилу при роботі вентиляційного агрегату 1.

### **3.2.2 Планування багатофакторного експерименту дослідження робочих параметрів регулювальних пристроїв системи аспірації**

Значення втрат тиску на регулювальному пристрої  $\Delta p$  в системі аспірації є функцією факторів впливу на її величину [14, 77]



$$\Delta p = f(v, \varphi, \mu), \quad (3.2)$$

де  $v$  – швидкість робочого середовища, м/с;

$\varphi = S_{ДР}/S_{max}$  - коефіцієнт, що враховує співвідношення площі відкриття регулювального пристрою до площі поперечного перерізу аеродинамічної мережі;

$\mu$  – вагова концентрація домішок транспортованого середовища в системі аспірації, кг/кг.

Чутливість величини втрат тиску  $\Delta p$  залежить від факторів впливу  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  та конструктивних властивостей регулювального пристрою.

Коефіцієнт  $\varphi$  визначає величину коефіцієнта місцевого опору регулювального пристрою. При виборі інтервалу варіювання коефіцієнта  $\varphi$  враховували роботи авторів [96], в яких рекомендується поворот стулки в регулювальному пристрої ДКЗВ обмежувати кутом повороту від  $0^\circ$  до  $40^\circ$ .

Інтервал варіювання коефіцієнта  $\varphi$  та вагової концентрації домішок транспортованого середовища  $\mu$  наведено в табл. 3.2.

Дослідження впливу факторів  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  на втрату тиску  $\Delta p$  при проведенні багатофакторних експериментів пов'язано із значним об'ємом робіт. Використовуючи методи матричного планування експериментів об'єм експериментальних робіт можна скоротити [2, 14, 77, 94].

З метою уникнення протиріччя при виборі діапазону варіювання факторів впливу та їхньої сукупності в даному діапазоні, при плануванні експерименту з дослідження робочих параметрів регулювальних пристроїв проведено пошукові експерименти для визначення області, в межах якої були б реалізовані сполучення рівнів факторів. Так як фактори впливу є величинами, що мають різну розмірність, а значення цих величин мають різні порядки, для отримання поверхні відгуку цих функцій проведено операцію кодування факторів у вигляді лінійного перетворення факторного простору [2]. Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний  $-1$ , середній  $0$ , максимальний  $+1$  та “зіркові” значення, відповідно,  $-1,682$  та  $+1,682$ , загальна кількість дослідів  $n$  дорівнює  $20$  [2].

Істинні значення факторів встановлено на основі проведення пошукових експериментів і наведено в табл. 3.2 [77].

Таблиця 3.2 – Рівні факторів впливу та інтервали варіювання

Фактори	Рівні варіювання факторів					Інтервал варіювання
	-1,682	-1	0	+1	+1,682	
$x_1$ – швидкість робочого середовища, м/с ( $v$ )	8	9,19	10	11,19	12	$\pm 1,19$
$x_2$ – коефіцієнт, що враховує співвідношення площі відкриття регулювального пристрою до площі поперечного перерізу аеродинамічної мережі ( $\varphi$ )	0,36	0,486	0,67	0,854	0,97	$\pm 0,184$
$x_3$ – вагова концентрація домішок транспортованого середовища, кг/кг ( $\mu$ )	$6,7 \times 10^{-4}$	$8,66 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-4}$

Складено матриці планування експериментів для функції відгуку  $\Delta p_1$  - втрати тиску в аеродинамічній мережі при влаштування ДКЗВ та  $\Delta p_2$  - втрати тиску в аеродинамічній мережі при влаштування ДКЕВ, з метою проведення повнофакторного експерименту виду  $2^3$ , які наведено в табл. 3.3, 3.4.

Вплив факторів  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  на втрати тиску  $\Delta p$  описано наступними регресійними моделями 2-го порядку [94]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (3.3)$$

де  $y$  – функція втрати тиску в аеродинамічній мережі  $\Delta p$ ;

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$  – коефіцієнти регресії.

Для визначення значень  $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$  використано метод найменших квадратів [2]:

$$B = Y\Phi^{-1}, \quad (3.4)$$

де  $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$  – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi = F^T F$  – інформаційна матриця Фішера;

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} \quad \text{– матриця, що містить результати експериментів} \\ \text{за матрицею планування (табл. 3.3, 3.4);}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix} \quad \text{– матриця, що містить значення факторів } x_{i,j};$$

де  $i$  – номер дослідів за матрицею планування;

$j$  – номер фактора;

$k$  – кількість факторів;

$N$  – кількість дослідів за матрицею планування (табл. 3.3, 3.4).

Адекватність регресійних моделей перевіряється за критерієм Фішера  $F$  [2, 77]:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{відт}}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (3.5)$$

де  $S_{\text{ад}}$  – дисперсія адекватності;

$S_{\text{відт}}$  – дисперсія відтворюваності.

$[F(f_1, f_2)]$  – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера;

$f_1 = N - d$  – кількість ступенів свободи дисперсії адекватності;

$f_2 = n - 1$  – кількість ступенів свободи дисперсії відтворюваності;

$d$  – кількість значимих коефіцієнтів регресії;

$n$  – кількість попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Для визначення адекватності регресійної моделі розрахункове значення критерію  $F$  порівнювалося з критичним  $[F]$ : при  $F > [F]$  регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія відтворюваності визначалася за формулою [2, с.128]:

$$S_{\text{відт}}^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.6)$$

де  $y_i$  – результат  $i$ -го повторного дослідів;

$\bar{y}$  – середнє арифметичне значення результатів  $n$  повторних дослідів.

Для забезпечення достатньої достовірності отриманих результатів, необхідної для кожного виду експерименту, кількість повторних дослідів повинна бути не менше значення, що визначене за формулою [55]

$$n \geq \frac{1 + \gamma + 2 \cdot n_{\text{відк}}}{1 - \gamma}, \quad (3.7)$$

де  $\gamma$  – довірна ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах;

$n_{\text{відк}}$  – число вимірювань, що відкидається.

Згідно рекомендацій [47, 55] довірна ймовірність при нормуванні оцінки результуючої та випадкової похибок вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при  $n_{\text{відк}} = 0$ , кількість повторних дослідів

$$n \geq \frac{1 + (0,8 \dots 0,9)}{1 - (0,8 \dots 0,9)} = 9 \dots 19.$$

Перевірка закону розподілу експериментальних значень в кожній серії повторних дослідів проводилась шляхом порівняння відношень дисперсій кожного планового досліду до сумарної дисперсії експерименту з табличним значенням  $G$ -критерію Кохрена [94, с. 23]. При перевищенні значення цього критерію експерименти, що відповідають неоднорідним дисперсіям, повторювались знову, а в іншому випадку гіпотеза про однорідність дисперсій приймалася.

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за  $t$ -критерієм Стьюдента [2]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{\text{відт}} \sqrt{c_{ij}}} > [t(f_2)], \quad (3.8)$$

де  $[t(f_2)]$  – критичне значення  $t$ -критерію Стьюдента, яке рівне значенню розподілу Стьюдента;

$c_{ij}$  – відповідний елемент матриці  $\Phi^{-1}$ .

Розрахункове значення критерію  $t_i$  порівнювалося з критичним і при  $|t_i| \leq [t]$   $i$ -й коефіцієнт регресії вважався незначним. Отже, ще одною умовою коректності і достовірності регресійних моделей була умова про те, що у випадку отримання при всіх значимих коефіцієнтах розрахункових значень  $|t_i| \leq [t]$ , рівняння регресії вважались некоректними.

Оброблення експериментальних даних та виведення рівняння регресії здійснювалося за допомогою програмного забезпечення,

розробленого в НДЛ гідродинаміки ВНТУ з використання програмної оболонки Borland Delphi 5.0.

Матрицю планування експерименту для функції відгуку  $\Delta p_1$ -втрати тиску на ДКЗВ наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Матриця планування експерименту для функції відгуку  $\Delta p_1$

№ досліду	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1 <sup>2</sup>	X2 <sup>2</sup>	X3 <sup>2</sup>	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13,04
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	10,31
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	48,1
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	37,47
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	15,2
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	18,76
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	48,08
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	37,89
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	21,89
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	32,78
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	55,64
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	5,7
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	28,74
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	27,33
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,24
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,24
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,16
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,32
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,4
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29,5
b <sub>i</sub>	27,94	2,80	-14,51	-0,98	-2,71	0,84	-1,28	-0,24	0,94	0,0065	
β <sub>i</sub>	4,06	7,03	42,98	-17355,35	-12,36	3606,80	-35388,48	-0,17	27,72	169863	
t	74,60	11,28	-58,40	-3,94	-8,33	2,59	-3,93	-1,00	3,88	0,027	[t]=2,571

Для функції відгуку  $\Delta p_1$  рівняння регресії (3.3) згідно багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд

$$\Delta p_1 = 27,94 + 2,804x_1 - 14,51x_2 - 0,98x_3 - 2,71x_1x_2 + 0,84x_1x_3 - 1,28x_2x_3 - 0,241x_1^2 + 0,938x_2^2 + 0,0065x_3^2. \quad (3.9)$$

При цьому дисперсія відтворюваності  $S_{\text{відт}}^2 = 0,84$ ; дисперсія адекватності  $S_{\text{ад}}^2 = 2,25$ ; критерій Фішера  $F=2,67 < [F]=2,77$ , отже регресійна модель (3.9) адекватна. Коефіцієнт кореляції  $R^2=0,995$ .

Після відкидання сполучення факторів, які обумовлені умовою  $|t_i| \leq [t]$ , рівняння регресії (3.9) в кодованих значеннях має вигляд

$$\Delta p_1 = 27,94 + 2,804x_1 - 14,51x_2 - 0,98x_3 - 2,71x_1x_2 + 0,84x_1x_3 - 1,28x_2x_3 + 0,938x_2^2. \quad (3.10)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії (3.10) для функції  $\Delta p_1$  має вигляд, Па

$$\Delta p_1 = 4,06 + 7,03\vartheta + 42,98\varphi - 17355,3\mu - 12,36\vartheta\varphi + 3606,8\vartheta\mu - 35338,5\varphi\mu + 27,716\varphi^2. \quad (3.11)$$

Матрицю планування експерименту для функції відгуку  $\Delta p_2$ -втрати тиску на ДКЕВ наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Матрицю планування експерименту для функції відгуку  $\Delta p_2$

№ досліду	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1 <sup>2</sup>	X2 <sup>2</sup>	X3 <sup>2</sup>	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11,88
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	9,14
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	43,65
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	32,8
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	13,7
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	16,43
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	42,79
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	34,2
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	19,15
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	30,1
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	48,77
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	4,32
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	26,2
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	22,84
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,1
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,24
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,6
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,42
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,9
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,2
bi	23,87	2,77	-12,96	-1,12	-2,43	0,97	-1,07	0,32	1,00	0,28	
βi	19,95	5,62	19,65	-23097,43	-11,09	4142,73	-29704,14	0,22	29,44	7304542	
t	63,43	11,10	-51,92	-4,49	-7,45	2,96	-3,28	1,31	4,10	1,15	[t]=2,571

Для функції відгуку  $\Delta p_2$  рівняння регресії (3.3) згідно багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд

$$\Delta p_2 = 23,87 + 2,77x_1 - 12,96x_2 - 1,12x_3 - 2,43x_1x_2 + 0,966x_1x_3 - 1,071x_2x_3 - 0,318x_1^2 + 0,997x_2^2 + 0,281x_3^2. \quad (3.12)$$

При цьому дисперсія відтворюваності  $S_{\text{відт}}^2 = 0,85$ ; дисперсія адекватності  $S_{\text{ад}}^2 = 2,09$ ; критерій Фішера  $F=2,45 < [F]=2,77$ , отже регресійна модель (3.12) адекватна. Коефіцієнт кореляції  $R^2=0,994$ .

Після відкидання сполучення факторів, які обумовлені умовою  $|t_i| \leq [t]$ , рівняння регресії (3.12) в кодованих значеннях має вигляд

$$\Delta p_2 = 23,87 + 2,77x_1 - 12,96x_2 - 1,12x_3 - 2,43x_1x_2 + 0,966x_1x_3 - 1,071x_2x_3 + 0,997x_2^2. \quad (3.13)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії (3.13) для функції  $\Delta p_2$  має вигляд, Па

$$\Delta p_2 = 19,95 + 5,618\vartheta + 19,647\varphi - 23097,4\mu - 11,092\vartheta\varphi + 4142,73\vartheta\mu - 29704,1\varphi\mu + 29,44\varphi^2 \quad (3.14)$$

### **3.3 Чисельне моделювання робочих параметрів систем аспірації з різними конструкціями регулювальних пристроїв**

Для виявлення різниці значень втрат тиску на регулювальних пристроях двох різних конструкцій  $\Delta p_1$  і  $\Delta p_2$  побудовано графіки залежності функцій  $\Delta p_{1,2}$  від сполучення факторів впливу  $u$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  -  $n$  (рис. 3.6) [77]. Значні втрати тиску досягалися внаслідок перекидання поперечного перерізу регулювальних пристроїв (ДКЗВ, ДКЕВ) на 60%, що відповідає 40° кута повороту регулювального органу ДКЗВ. Порівнюючи графіки функцій  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$  можна виділити зону нестабільності функції  $\Delta p_1$  при дослідженні роботи ДКЗВ, а саме:  $\Delta p_1 = (37,47 \dots 55,64)$  Па (рис. 3.6). Коливання в даній зоні  $\Delta p_1$  обумовлені великою турбулентністю, вихроутворенням, невпорядкованістю аеродинамічних потоків за регулювальним органом ДКЗВ. Це призводить до неможливості досягнення проектного значення втрат тиску на відгалуженні та складності налагодження аеродинамічної мережі в цілому.

Робота аеродинамічної мережі з ДКЕВ свідчить про більш впорядковане та плавне регулювання тиску, особливо в діапазоні  $\Delta p_2 = (34,2 \dots 48,77)$  Па. Крім того, всі значення функції  $\Delta p_2$  є меншими значень функції  $\Delta p_1$  при однакових співставленнях їх площ поперечних перерізів  $F1 = F2$  (рис. 3.5). Плавність зростання втрат тиску в ДКЕВ обумовлена зменшенням турбулентності й вихроутворення та впорядкованістю аеродинамічних потоків

внаслідок плавного спектру обтікання регульовального органу робочим середовищем [77].

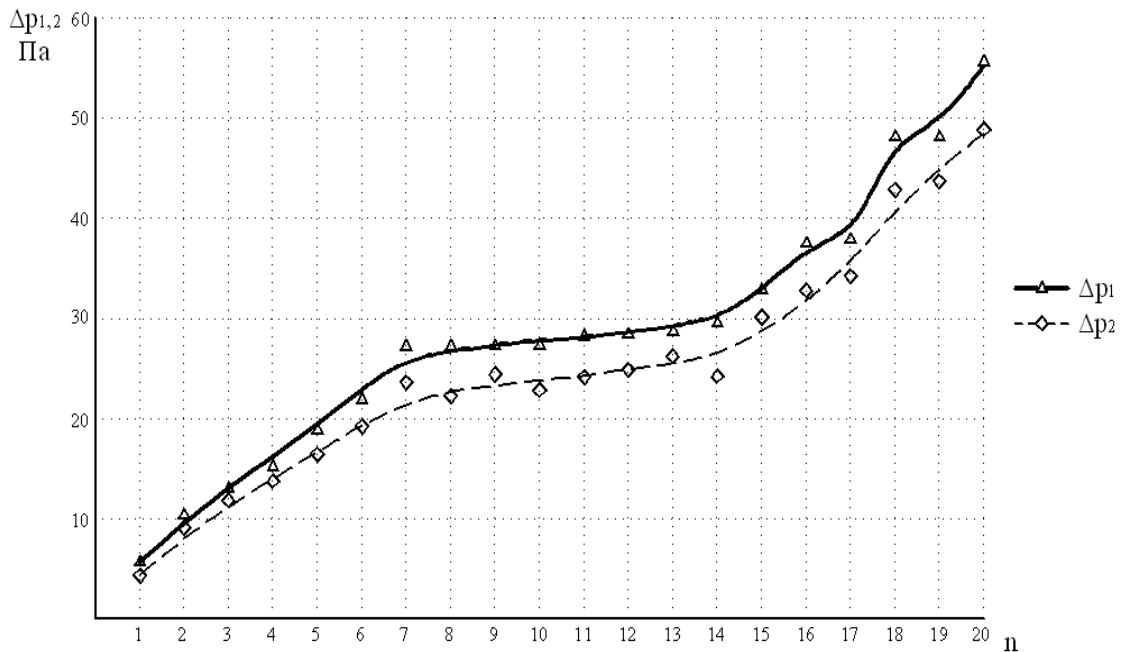


Рисунок 3.6 – Графіки залежності  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$  від сполучення факторів впливу  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$

Розбіжність оптимумів функцій (див. табл. 3.3, 3.4), а саме  $\Delta p_1 = 55,64 \text{ Па} > \Delta p_2 = 48,77 \text{ Па}$  свідчить про можливість розширення діапазону регулювання робочих параметрів аеродинамічної мережі при застосуванні вдосконаленої конструкції ДКЕВ.

Отримані рівняння регресії (3.11) та (3.14) можуть бути використані для математичного моделювання втрати тиску на ділянці аеродинамічної мережі (системи аспірації) при влаштування регульовальних пристроїв різного конструктивного виконання, відповідно, ДКЗВ та ДКЕВ, а також для розроблення інженерної методики розрахунку її параметрів.

Отримані поверхні відгуків функцій  $\Delta p_1$  і  $\Delta p_2$  в залежності від окремих параметрів оптимізації в площині їх дійсних значень що відображають сполучення факторів  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  (рис. 3.7).



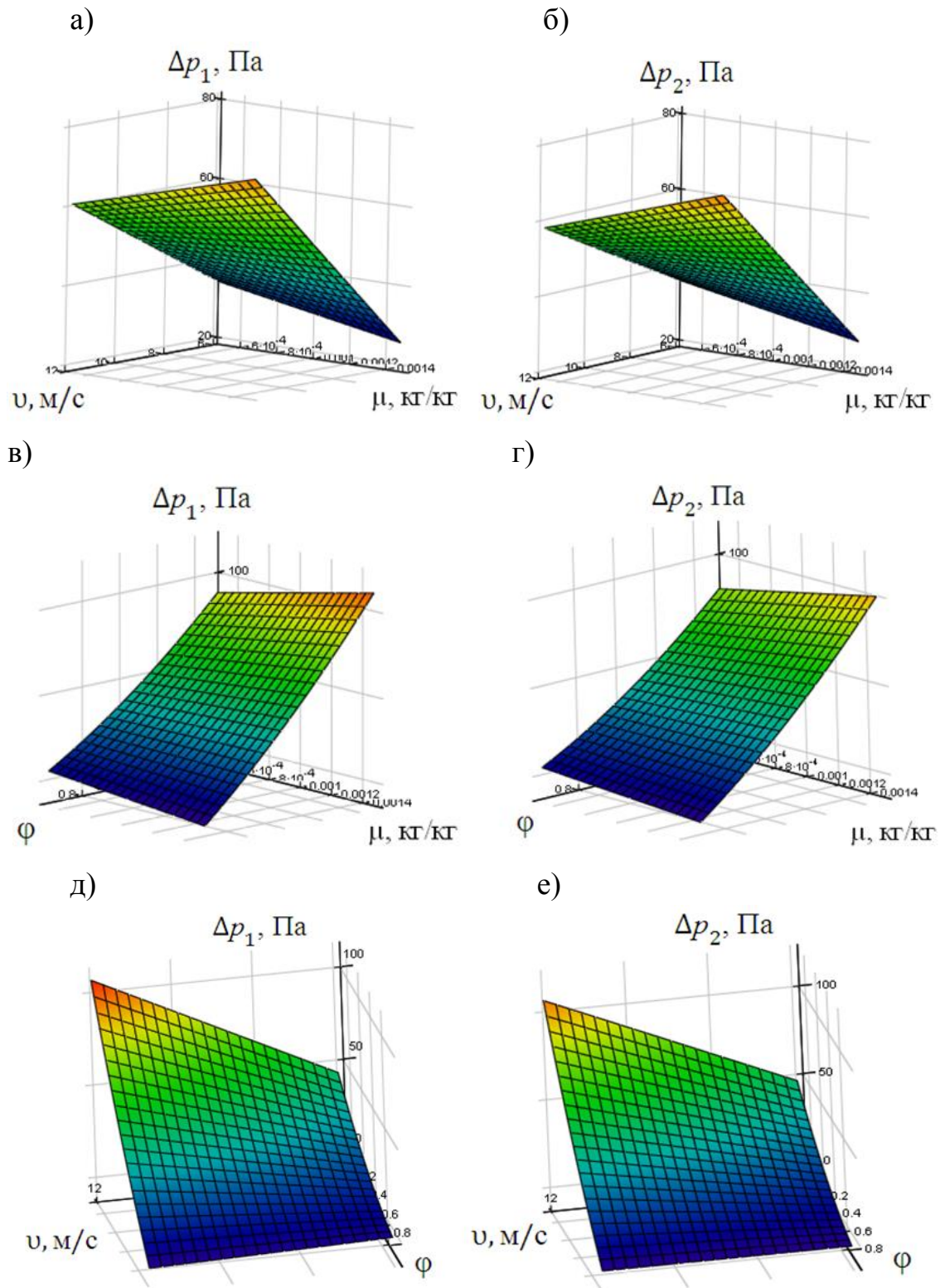


Рисунок 3.7 – Поверхні відгуків функцій  $\Delta p_1$  і  $\Delta p_2$  в залежності від окремих параметрів оптимізації в площині їх дійсних значень:  
 а)  $\Delta p_1 = f(v, \varphi)$ ; б)  $\Delta p_2 = f(v, \varphi)$ ; в)  $\Delta p_1 = f(v, \mu)$ ; г)  $\Delta p_2 = f(v, \mu)$ ;  
 д)  $\Delta p_1 = f(\varphi, \mu)$ ; е)  $\Delta p_2 = f(\varphi, \mu)$ .

За результатами аналізу факторних просторів залежності параметрів оптимізації  $\Delta p_1$  і  $\Delta p_2$  від сполучення факторів  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  виявлено, що найбільш впливовими факторами на величину втрат тиску є швидкість робочого середовища  $v$ , та коефіцієнт, який враховує співвідношення площі відкриття регулювального пристрою до площі поперечного перерізу аеродинамічної мережі  $\varphi$  (рис. 3.7). Підтвердженням виявленої залежності є крутий підйом поверхонь відгуку відносно  $\Delta p_1$  і  $\Delta p_2$  в міру зростання швидкості  $v$ , та зменшення коефіцієнта  $\varphi$ . Зростання втрат тиску  $\Delta p_1$  і  $\Delta p_2$  при зменшенні  $\varphi$  обумовлюється тим, що коефіцієнт  $\varphi$  визначає величину місцевого опору на регулювальних пристроях [77].

Менш впливовим фактором є вагова концентрація домішок транспортованого середовища  $\mu = 6,7 \times 10^{-4} \dots 1,33 \times 10^{-3}$  (рис. 3.7, в, г, д, е). Це обумовлено незначною концентрацією домішок, прикладом якої є величини концентрації цукрового пилу в сушильному та пакувальному відділеннях цукрових заводів [18].

Розбіжність оптимумів та найбільших втрат тиску на регулювальних пристроях відповідно до поверхонь відгуків  $\Delta p_{1opt} > \Delta p_{2opt}$  свідчить про можливість розширення діапазону регулювання робочих параметрів аеродинамічної мережі при влаштуванні вдосконаленої конструкції ДКЕВ.

### **3.3 Експериментальні дослідження роботи регулювальних пристроїв в системі вентиляції**

Для порівняння аеродинамічних характеристик запропонованих дросель-клапанів, що мають різні конструкції, розроблено експериментальну установку (рис. 3.8) [21, 22, 24, 57, 58, 72, 74, 89, 90, 97, 106,]. Установка включає каналний вентилятор типу VKA125LD, повітровід  $\varnothing 125$ , в якому по черзі вмонтовують регулювальний пристрій традиційного виконання (ДКЗВ) (рис. 1.4, а) та регулювальний пристрій з зручнообтічними регулюючими елементами (ДКЕВ) (рис. 3.8). ДКЗВ та ДКЕВ мають градуйовані шкали, які вказують на зміну положення виконавчого органу регулювального пристрою. Температура повітря в приміщенні твн.= 20 °C [91].

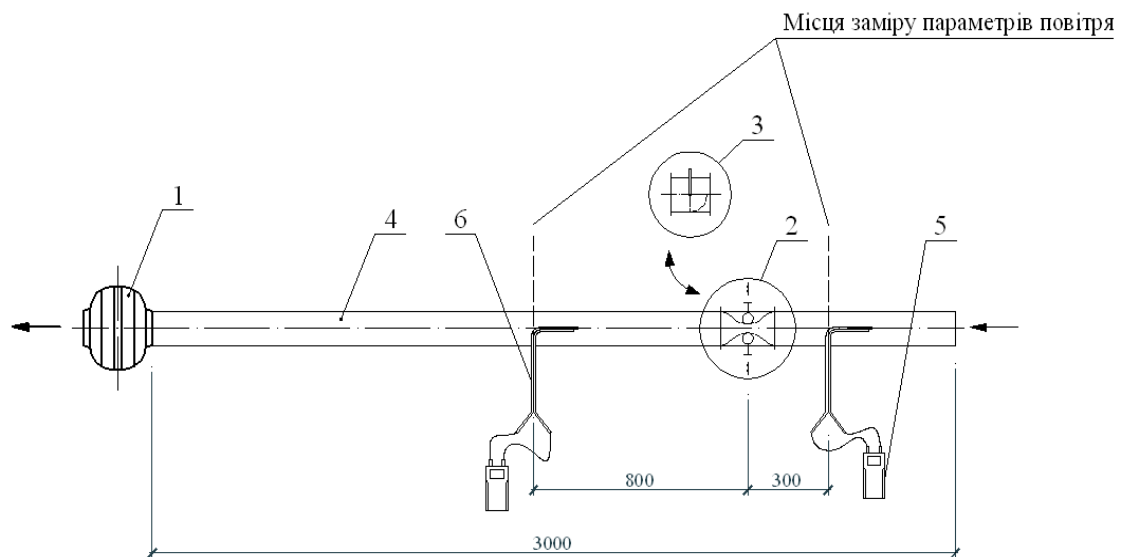


Рисунок 3.8 – Схема експериментальної установки з ДКЗВ та ДКЕВ

Експериментальна установка включає: 1 – каналний вентилятор низького тиску VKA125LD; 2 – регулювальний пристрій з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ); 3 – регулювальний пристрій традиційного виконання (ДКЗВ); 4 – повітровід [15]; 5 – вимірювальний прилад TESTO 510; 6 – трубка Піто.

При проведенні експерименту співставлення результатів вимірювання параметрів повітря, внаслідок почергового регулювання вентиляційної мережі регулювальними пристроями двох різних конструкцій, здійснювали при *однакових їх площях поперечного перерізу  $F1 = F2$*  (рис. 3.9). Площу поперечного перерізу  $F2$  зорієнтовували по площі поперечного перерізу  $F1$ , наприклад, при обертанні регулювального органу поз.2 на  $5^\circ$  -  $F1 = F2 = 11007 \text{ мм}^2$  і т.д. [74].

Проведення експерименту на вищенаведеному стенді (рис. 3.8) відбувалось відповідно до методики [50].

Для вимірювання тиску та швидкості рух повітря в повітроводі передбачено ділянки з розташуванням мірних перерізів на відстані не менше шести гідравлічних діаметрів за місцем збурення потоку (за

регулювальним пристроєм) та не менше двох гідравлічних діаметрів перед ним [74].

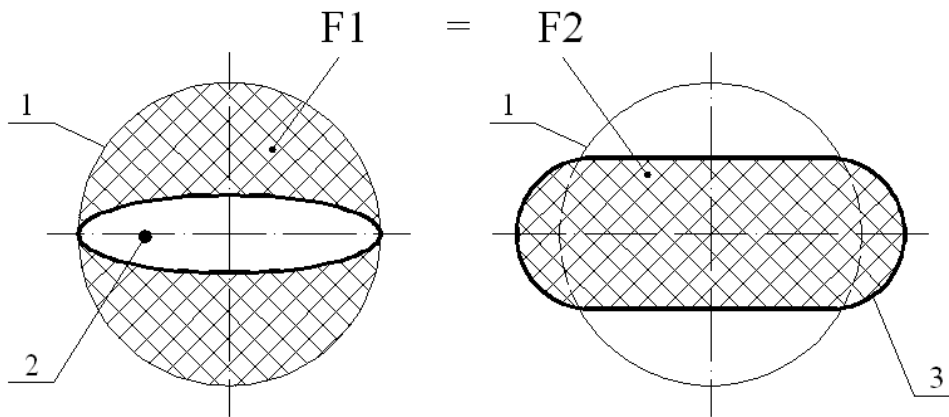


Рисунок 3.9 – Схема порівняння площ поперечних перерізів регулювальних пристроїв різних конструкцій під час вимірювання втрат тиску в вентиляційній мережі:

1 – корпус; 2 – регулювальний орган – металевий диск; 3 – регулювальний орган – еластична вставка; F1 – площа поперечного перерізу регулювального пристрою традиційного виконання; F2 – площа поперечного перерізу регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами.

Для проведення замірів параметрів повітря використовувалось наступне обладнання: диференційний манометр TESTO 510; трубка Піто ( $L=350$  мм,  $D=7$  мм).

Експеримент проведено в наступній послідовності [74]:

1. У повітровід вмонтовано регулювальний пристрій традиційного виконання (ДКЗВ) і не раніше 15 хв. після пуску вентилятора виконано заміри втрат тиску на регулювальному пристрої [74], повертаючи регулювальний орган через 5 градусів.

2. Після заміни конструкцій регулювальних пристроїв ДКЗВ на ДКЕВ (рис. 3.8) виконано послідовність дій при вимірюванні, аналогічно пункту 1. При цьому, надавлюючи на еластичну вставку 2 регулювально-запірними елементами  $3_1$  і  $3_2$ , змінювали площу поперечного перерізу (рис. 3.1). Площу поперечного перерізу еластичної вставки в місці здавлювання - приведено до площі поперечного перерізу регулювального пристрою традиційного

виконання (ДКЗВ) (рис. 3.9), внаслідок повертання регулювального органу останнього через 5 градусів.

Візуалізацію результатів аеродинамічного процесу наведено у вигляді таблиці (табл. 3.5), а також графіків залежності коефіцієнта місцевого опору та втрати тиску від площ поперечних перерізів ДКЕВ та ДКЗВ (рис. 3.10, 3.11) [74].

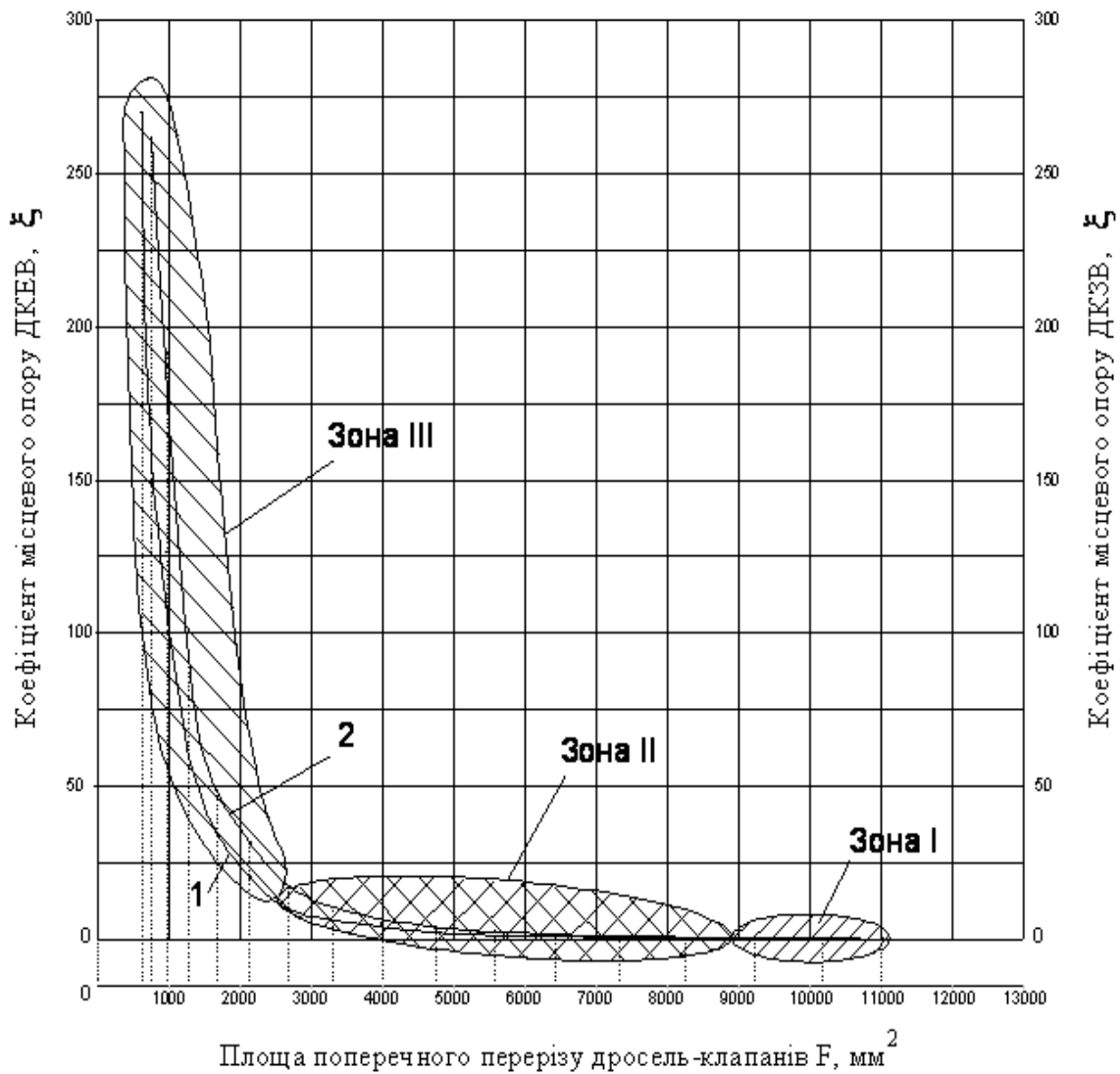


Рисунок 3.10 – Аеродинамічні характеристики регулювальних пристроїв  $\xi - F$ , мм<sup>2</sup>: 1 - характеристика регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ); 2 - характеристика регулювального пристрою традиційного виконання (ДКЗВ).

Таблиця 3.5 – Результати експериментальних досліджень робочих параметрів регулювальних пристроїв

Регулювальний пристрій традиційного виконання (ДКЗВ)						Регулювальний пристрій з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ)					
Зміна площі поперечного перерізу	$\Delta P$ , Па	$\xi$	Зміна площі поперечного перерізу	$\Delta P$ , Па	$\xi$	Зміна площі поперечного перерізу	$\Delta P$ , Па	$\xi$	Зміна площі поперечного перерізу	$\Delta P$ , Па	$\xi$
Регулювання відсутнє $F=11023 \text{ мм}^2$	10	0,29	(45°) $F=3982 \text{ мм}^2$	118,3	5,82	Регулювання відсутнє $F=12272 \text{ мм}^2$	3,67	0,105	103 мм (45°) $F=3982 \text{ мм}^2$	103,7	4,71
(5°) $F=11007 \text{ мм}^2$	7,3	0,21	(50°) $F=3293 \text{ мм}^2$	156	10,64	40 мм (5°) $F=11007 \text{ мм}^2$	6,67	0,184	107 мм (50°) $F=3293 \text{ мм}^2$	121	6,72
(10°) $F=10178 \text{ мм}^2$	11,3	0,31	(55°) $F=2672 \text{ мм}^2$	178	15,3	52 мм (10°) $F=10178 \text{ мм}^2$	10	0,27	110 мм (55°) $F=2672 \text{ мм}^2$	147	9,87
(15°) $F=9213 \text{ мм}^2$	12	0,32	(60°) $F=2124 \text{ мм}^2$	210,7	31,6	62 мм (15°) $F=9213 \text{ мм}^2$	14,3	0,37	114 мм (60°) $F=2124 \text{ мм}^2$	190,7	20,43
(20°) $F=8253 \text{ мм}^2$	23	0,66	(65°) $F=1653 \text{ мм}^2$	228,3	48,93	71 мм (20°) $F=8253 \text{ мм}^2$	16	0,44	116 мм (65°) $F=1653 \text{ мм}^2$	211	35,17
(25°) $F=7318 \text{ мм}^2$	38,3	1,14	(70°) $F=1263 \text{ мм}^2$	245	91,88	79 мм (25°) $F=7318 \text{ мм}^2$	20,33	0,58	118 мм (70°) $F=1263 \text{ мм}^2$	237,3	79,1
(30°) $F=6418 \text{ мм}^2$	53	1,75	(75°) $F=956 \text{ мм}^2$	255,3	191,5	86 мм (30°) $F=6418 \text{ мм}^2$	33	0,95	120 мм (75°) $F=956 \text{ мм}^2$	253	126,5
(35°) $F=5563 \text{ мм}^2$	67,7	2,67	(80°) $F=735 \text{ мм}^2$	262	-	91 мм (35°) 5563	45,3	1,35	121 мм (80°) $F=735 \text{ мм}^2$	264	132
(40°) $F=4733 \text{ мм}^2$	93,7	4,13	(85°) $F=602 \text{ мм}^2$	-	-	98 мм (40°) $F=4733 \text{ мм}^2$	69,7	2,4	122 мм (85°) $F=602 \text{ мм}^2$	270	270

За результатами аналізу аеродинамічних характеристик (рис. 3.10) регулювальних пристроїв встановлено три характерних зони розбіжності величин коефіцієнтів місцевих опорів (КМО):

зона I – незначна розбіжність КМО:  $\xi_{(ДКЗВ)} \approx \xi_{(ДКЕВ)}$ ;

зона II – суттєва розбіжність КМО:  $\xi_{(ДКЗВ)} > \xi_{(ДКЕВ)}$ ;

зона III – дуже суттєва розбіжність КМО:  $\xi_{(ДКЗВ)} \gg \xi_{(ДКЕВ)}$

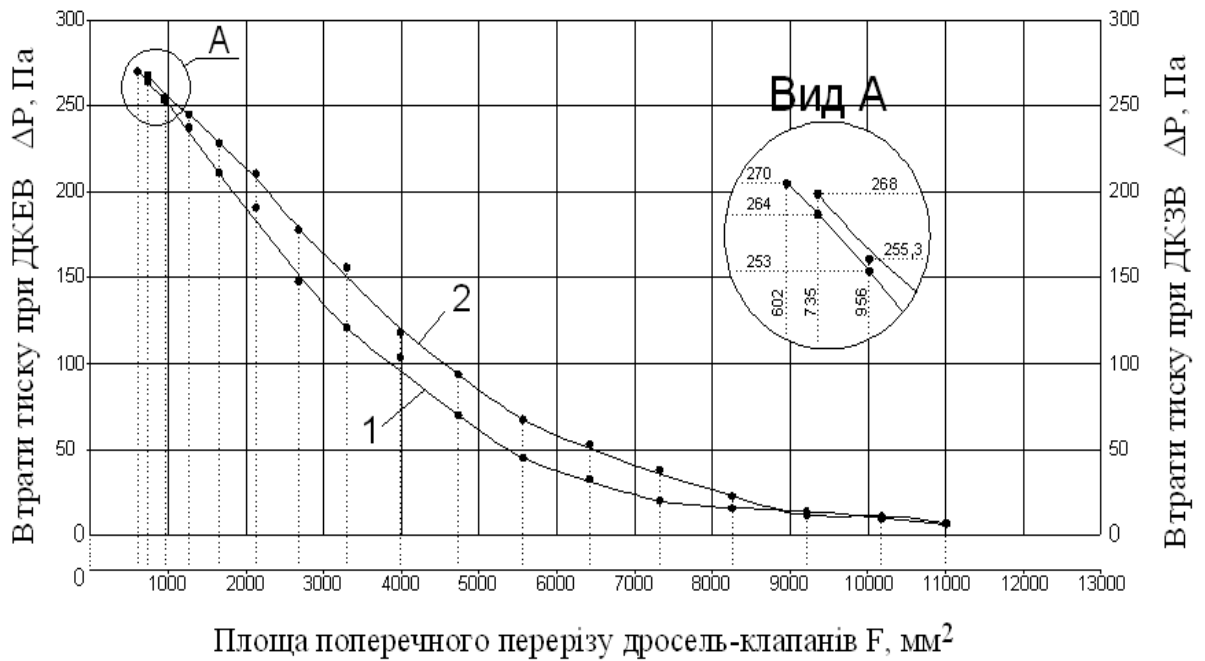


Рисунок 3.11 – Аеродинамічні характеристики регулюючих пристроїв  $\Delta P - F, \text{мм}^2$ : 1 - характеристика регулюючого пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ); 2 - характеристика регулюючого пристрою традиційного виконання (ДКЗВ).

Аналіз отриманих експериментальних результатів свідчить про наступне, що внаслідок співставлення аеродинамічних характеристик регулюючих пристроїв  $\xi - F, \text{мм}^2$  (рис. 3.10) можна виділити три зони:

- зона I – незначна зміна площ поперечних перерізів регулюючих пристроїв, що відповідає **положенню регулюючого органу ДКЗВ від 0° до 15°** ( $F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}=9213\text{мм}^2$ ), призводить майже до однакових значень коефіцієнтів місцевих опорів КМО:  $\xi_{(ДКЗВ)} \approx \xi_{(ДКЕВ)}$ ;

- зона II – зміна площ поперечних перерізів від  $F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}=9213\text{мм}^2$  до  $F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}=2672\text{мм}^2$  призводить до суттєвої розбіжності КМО:  $\xi_{(ДКЗВ)} > \xi_{(ДКЕВ)}$ ;

- зона III - зміна площ поперечних перерізів від  $F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}=2672\text{мм}^2$  до повного закриття регулюючих пристроїв призводить до дуже суттєвої різниці КМО:  $\xi_{(ДКЗВ)} \gg \xi_{(ДКЕВ)}$ . Значна різниця між значеннями КМО спостерігається при зміні площ поперечних перерізів регулюючих пристроїв

від  $F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}=956\text{мм}^2$  до повного закриття (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Розбіжність КМО регулюючих пристроїв різних конструкцій в зоні III

$F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}$ , мм <sup>2</sup>	Коефіцієнт місцевого опору (КМО)	
	$\xi_{(ДКЗВ)}$	$\xi_{(ДКЕВ)}$
956	191,5	126,5
735	262	132
602	–	270

За результатами експериментальних досліджень виявлено що застосування ДКЕВ дозволяє розширити регулювальні можливості аеродинамічної мережі. Це підтверджується співставленням аеродинамічних характеристик регулюючих пристроїв  $\Delta P$ -F, мм<sup>2</sup> (рис. 3.11), які свідчать про те, що:

- втрати тиску різні при однакових площах поперечних перерізів  $\Delta P_{ДКЗВ} > \Delta P_{ДКЕВ}$ ;

- при площі поперечного перерізу  $F_{(ДКЗВ)}=F_{(ДКЕВ)}=602\text{мм}^2$  втрати тиску різко зростають і унеможливають подальше проведення вимірювань при застосуванні регулювального пристрою традиційного виконання (ДКЗВ) (рис. 3.11), (Вид А);

- при відсутньому режимі регулювання втрати тиску  $\Delta P_{ДКЗВ} > \Delta P_{ДКЕВ}$  внаслідок наявності гідроопору (металевого диску) в конструкції ДКЗВ, (табл. 3.7).

Результати досліджень  $\xi$  та  $\Delta P$  при відсутньому режимі регулювання не наведені в графічних залежностях (рис. 3.10, рис. 3.11).

Таблиця 3.7 – Значення  $\xi$  та  $\Delta P$  регулювальних пристроїв різних конструкцій при відсутньому режимі регулювання

Площа поперечного перерізу дросель-клапанів різних конструкцій при відсутньому режимі регулювання	Коефіцієнт місцевого опору (КМО), $\xi$	Втрати тиску $\Delta P$ , Па
$F_{(ДКЕВ)} = 12272 \text{мм}^2$	0,106	3,67
$F_{(ДКЗВ)} = 11023 \text{мм}^2$	0,294	10



Аналіз вимірювань аеродинамічних характеристик регулювальних пристроїв різних конструкцій дозволив виділити зони нестабільності, а саме при створенні дуже малої площі поперечного перерізу проходження повітря через регулювальний пристрій, що спостерігається при відкриванні та закриванні останніх. Для детальнішого синтезу та аналізу роботи запропонованих регулювальних пристроїв аеродинамічних потоків необхідно дослідити виявлені зони нестабільності [74].

### **3.4 Експериментальні дослідження робочих характеристик регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами в системах аспірації підприємств харчової та переробної промисловості**

Технологічні процеси на підприємствах харчової та переробної промисловостях (хлібозаводи, цукрові заводи, олійножирові комбінати, крохмалопаточні підприємства, тютюнові, чайні фабрики та ін.) супроводжуються виділенням пилу, що містять шкідливі речовини [18]. Виділення пилу пов'язано з втратою частини сировини та готової продукції, а також негативно впливає на обслуговувальний персонал, викликає передчасну необхідність ремонту або заміни технологічного обладнання, забруднює навколишнє середовище. Більшість пилу харчових виробництв, що має органічну основу, здатний утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші, відкладення пилу є пожежонебезпечними [71, 105]. Недостатня герметизація технологічного обладнання, недотримання режимів роботи, низька ефективність вентиляційних та аспіраційних систем призводить до високої запиленості виробничих приміщень [82, 104].

Ефективність уловлення пилу, транспортування робочого двофазного середовища (пил і повітря), регулювання витрат двофазного середовища, його очищення має не тільки санітарно-гігієнічне, екологічне і технологічне, але й суттєве економічне значення [3, 5]. Пиловиділення на підприємствах локалізується місцевими відсмоктувачами системи аспірації (зонти, укриття, бортові відсмоктувачі) і є найбільш ефективним методом боротьби з забрудненням робочого середовища [3, 5, 104]. Одним із шляхів підвищення ефективності аспіраційної системи є вдосконалення пристроїв для регулювання витрат робочого середовища на окремих ділянках та підтримання налагоджених аеродинамічних параметрів під час експлуатації [37].

Втрати тиску на окремих ділянках аспіраційної системи рекомендується врівноважувати за результатами чисельного моделювання шляхом зміною діаметрів та довжин повітропроводів без застосування регулювальних

клапанів, шиберів, тощо . При неможливості досягнення врівноваження втрат тиску геометричними розмірами повітропроводів застосовують шибери, діафрагми конусні та ірисові регулювальні діафрагми на вертикальних ділянках повітропроводів. Використання наведених регулювальних пристроїв призводить до виникнення ряду негативних явищ в аеродинамічній мережі: перпендикулярне зіткнення транспортувальної частинки з регулювальним диском, зіткнення з іншими частинками, траєкторія руху яких направлена вниз та внаслідок інтенсивного вихроутворення збільшується хаотичний рух частинок в завихрених зонах [98].

Двофазний потік, що аспірується від технологічного обладнання олійножирової та зернопереробної галузях харчової промисловості, містить частинки пилу розміром декілька міліметрів. В зв'язку з цим в експериментальному дослідженні використано як транспортуючі компоненти соняшникову лузгу та хлібну крихту. Хімічний склад соняшникової лузги (в залежності від технологічної схеми) становить [56]: сирий жир 0,99 – 3,42%, сирова клітчатка 52,0 - 65,9%, сирова зола 1,374 – 2,77%, віск 0,28 – 1,27%, безазотистоекстрактивні речовини 29,9 – 39,55%.

Основним показником при проектуванні системи аспірації є кількість видалюваного повітря  $Q$  (м<sup>3</sup>/год) від джерела утворення пилу, витрата якого регламентується нормативною документацією [19, 56].

Енергоощадне регулювання витрат двофазного робочого середовища може виконуватися за допомогою запропонованої конструкції регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами, що захищена патентом України на корисну модель [62].

Для дослідження робочих характеристик регулювальних пристроїв – ірисової регулювальної діафрагми (ІДР) та регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ) запроектована та виготовлена експериментальна установка (рис. 3.12) [21, 22, 24, 57, 58, 72, 82, 89, 90, 106].

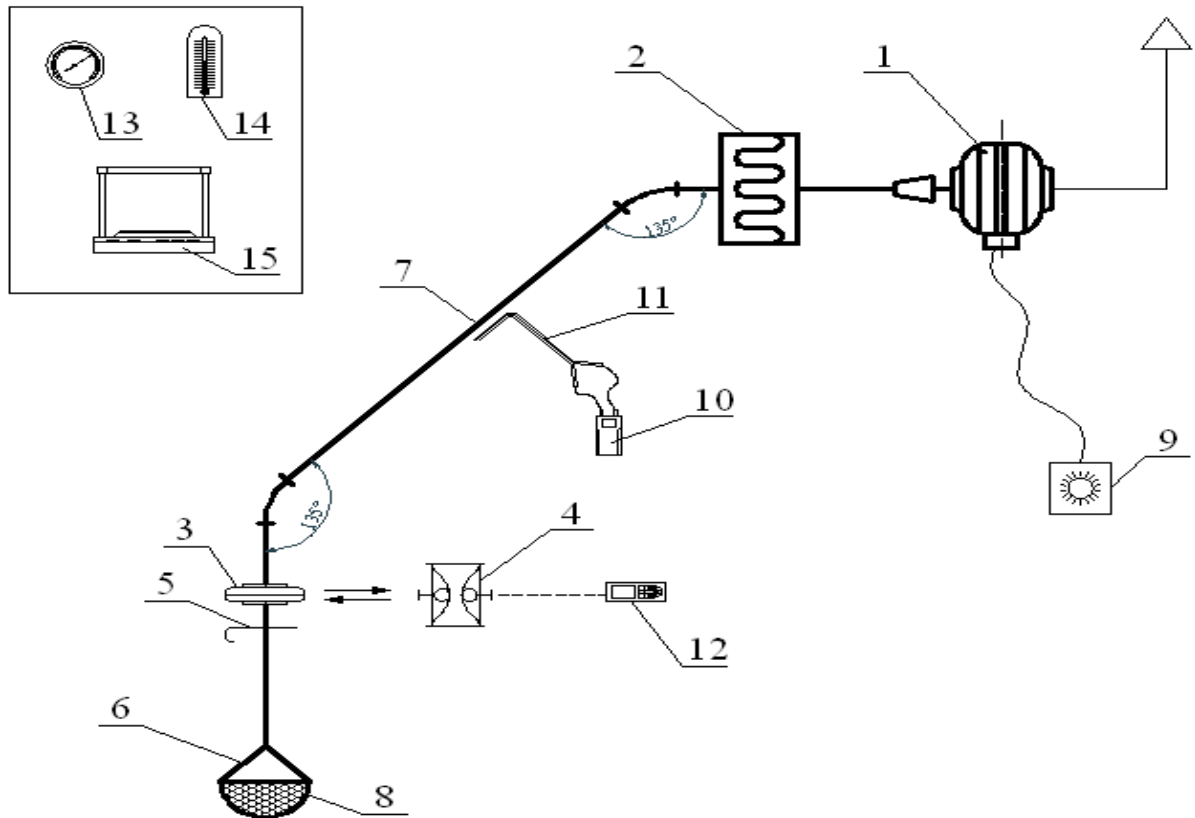


Рисунок 3.12 – Конструктивна схема експериментальної установки

Експериментальна установка містить наступне обладнання: 1 – вентиляційний агрегат VKA125LD; 2 – пилоочисне обладнання (фільтр); 3 – ірисова регульовальна діафрагма (ІДР) [46]; 4 – регульовальний пристрій з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ) [62]; 5 – шибер; 6 – аспіраційний приймальний патрубок; 7 – аспіраційна мережа; 8 – контейнер перфорований з транспортуємим компонентом; 9 – регулятор швидкості РС-1-300; 10 – диференційний манометр TESTO 510; 11 – трубка Піто; 12 – лазерний вимірювач дистанції Leica DISTO D2; 13 – барометр-анероїд БАММ-1; 14 – термометр спиртовий; 15 – ваги цифрові Digital Scale.

Загальний вид експериментальної установки та її окремих елементів показано на рис. 3.13.



Рисунок 3.13 – Загальний вид експериментальної установки та її окремих елементів: а) загальний вид; б) контейнер перфорований з транспортувальним компонентом; в) вимірювання переміщення виконавчого елемента до осі регульовального пристрою

Фото реєструвальних приладів для проведення замірів робочих параметрів аеродинамічної мережі в експериментальній установці показано на рис. 3.14.

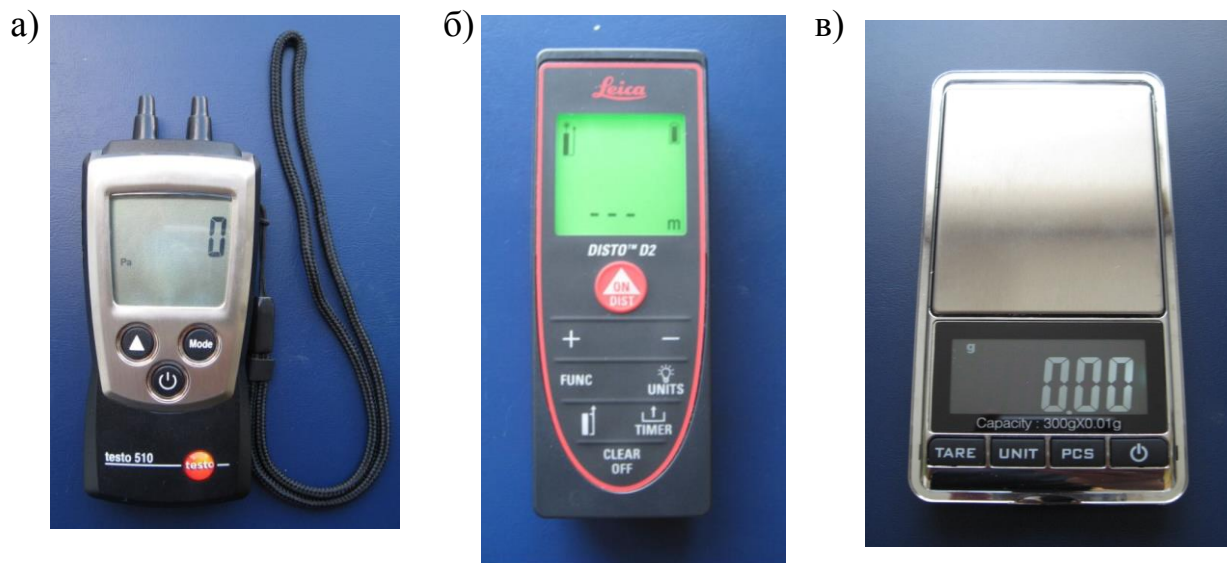


Рисунок 3.14 – Фото реєструвальних приладів:  
 а) диференційний манометр TESTO 510; б) лазерний вимірювач  
 дистанції Leica DISTO D2; в) ваги цифрові Digital Scale

Дослідження проводили наступним чином [82]. В аспіраційну мережу влаштували ІДР 3 (рис. 3.12) на заданий режим регулювання витрати [82]. Після роботи вентиляційного агрегату 1 протягом 20 хвилин шибером 5 перекривали аспіраційну мережу 7. Перфорований контейнер 8 наповнювали транспортуємим компонентом – соняшниковою лузгою (СЛ) в кількості 50 грам (рис. 3.15, а). При відкриванні шибера 5 задіяли в роботу систему аспірації, що працювала 10 хв. Виключивши вентиляційний агрегат 1, з пилоочисного обладнання 2 [85] діставали транспортувальний компонент і визначили його масу на цифрових вагах 13. Дослідження роботи ІДР також проводили по вищенаведеній послідовності, замінивши транспортуємий компонент на хлібну крихту (ХК) в кількості 40 грам (рис. 3.15, б).



Рисунок 3.15 – Компоненти, що транспортуються:  
 а) соняшникова лузга (СЛ); б) хлібна крихта (ХК)

При виконанні експерименту вимірювали: втрати тиску на регулювальних пристроях ІДР та ДКЕВ за допомогою диференційного манометра TESTO 510 (рис. 3.14, а), маса транспортуємих компонентів – соняшnikової лужки та хлібної крихти за допомогою цифрової ваги Digital Scale (рис. 3.14, в). Контроль зближення регулювальних елементів ДКЕВ до його осі виконувався за допомогою лазерного вимірювача дистанції Leica DISTO D2 (рис. 3.14, б).

Після дослідження робочих характеристик ІДР її демонтували, а в аспіраційну мережу влаштували ДКЕВ (рис. 3.12) [82]. Дослідження робочих характеристик регулювальних пристроїв двох різних конструкцій здійснювали при перемінному їх застосуванні за умови співставлення площ поперечних перерізів при рівних значення втрат тиску на регулювальних пристроях  $\Delta P_1 = \Delta P_2$  (рис. 3.16) [19, 82].

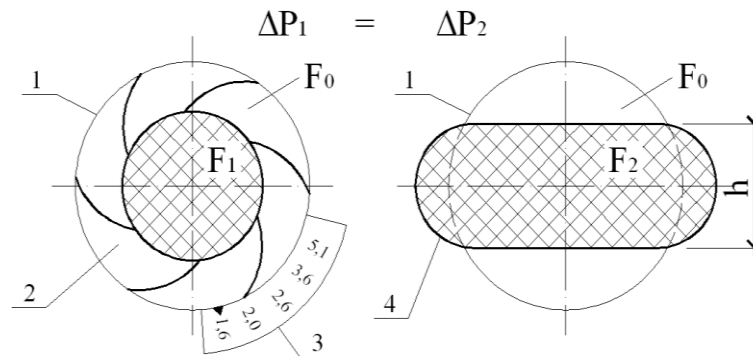


Рисунок 3.16 – Схема співставлення площ поперечних перерізів регулювальних пристроїв двох різних конструктивних виконань при рівних значеннях втрат тиску на них

На рис. 3.16 зображено: 1 – корпус; 2 – регулювальний орган – металевий диск; 3 – шкала регулювання з нанесеними позиціями; 4 – регулювальний орган – еластична вставка;  $\Delta P_1$  – втрата тиску на регулювальній ірисовій діафрагмі (ІДР);  $\Delta P_2$  – втрата тиску на регулювальному пристрої з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ);  $F_0$  – площа поперечного перерізу повністю відкритого повітропроводу;  $F_1$  – площа поперечного перерізу регулювальної ірисової діафрагми (ІДР);  $F_2$  – площа поперечного перерізу регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ).

Результати налаштування ІДР та ДКЕВ на однакові значення втрат тиску  $\Delta P_1 = \Delta P_2$ , а також результати досліджень робочих параметрів наведено в табл. 3.9 [34, 82].

Таблиця 3.9 – Результати досліджень роботи ІДР та ДКЕВ в системі аспірації

Регулювальна ірисова діафрагма (ІДР)						Регулювальний пристрій з зручнообтічними виконавчими елементами (ДКЕВ)					
Позиції на шкалі регулювання	Втрати тиску на ІДР $\Delta P_1$ , Па	Площа поперечного перерізу ІДР, $F_1$ , $m^2$	$F_0/F_1$	Маса вловленого транспортного компоненту, грам		Звуження вставки $h$ , мм	Втрати тиску на ДКЕВ $\Delta P_2$ , Па	Площа поперечного перерізу ДКЕВ, $F_2$ , $m^2$	$F_0/F_2$	Маса вловленого транспортного компоненту, грам	
				Соняшникова лузга	Хлібні крихти					Соняшникова лузга	Хлібні крихти
5,1	75	0,00418	0,53	28,43	30,14	23,5	75	0,003256	0,41	39,4	33,66
4,4	95	0,00374	0,48	28,0	25,49	20,3	95	0,002863	0,36	38,79	28,59
3,6	123	0,00312	0,4	27,77	17,57	17,0	123	0,002442	0,31	38,42	21,27
3,1	154	0,00273	0,35	26,24	12,27	14,0	154	0,002044	0,26	37,77	15,61
2,6	176	0,00246	0,31	24,83	8,89	12,6	176	0,001854	0,24	35,0	10,96
2,3	198	0,0022	0,28	22,37	6,26	10,3	198	0,001534	0,20	31,98	7,24
2,0	218	0,0018	0,23	16,58	3,59	8,4	218	0,001263	0,16	24,69	4,36
1,8	233	0,00166	0,21	12,04	1,34	7,8	233	0,001177	0,15	18,97	2,86
1,6	244	0,00126	0,165	8,37	0,36	6,5	244	0,000987	0,13	10,47	1,05

Для зручності оцінювання кількості вловлених транспортних компонентів при різних втратах тиску на регулювальних пристроях ІДР та ДКЕВ побудовано залежності  $\mu_{СЛ} = f(\Delta P_{ІДР})$ ,  $\mu_{СЛ} = f(\Delta P_{ДКЕВ})$ ,  $\mu_{ХК} = f(\Delta P_{ІДР})$ ,  $\mu_{ХК} = f(\Delta P_{ДКЕВ})$  (рис. 3.17).

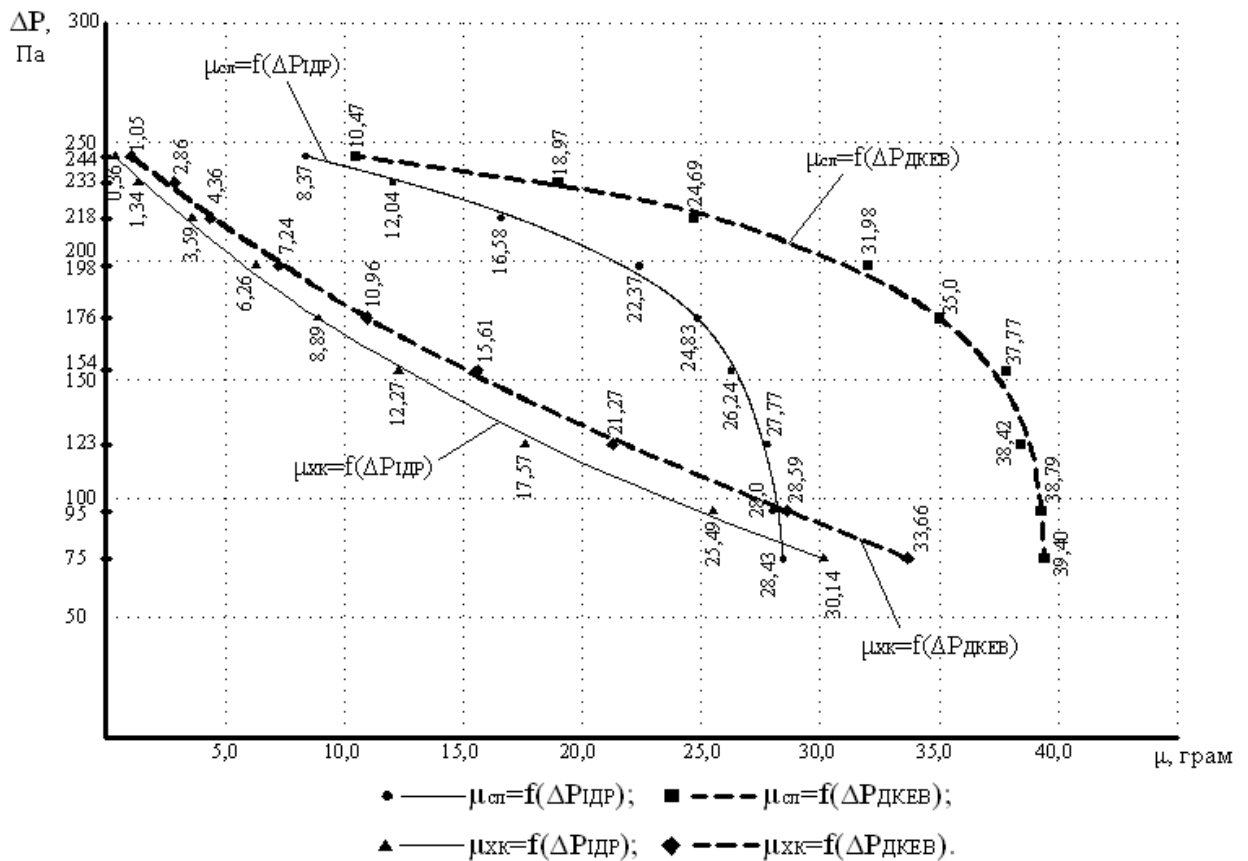


Рисунок 3.17 – Графіки залежності кількості вловлених транспортних компонентів соняшникової лузги  $\mu_{сл}$  та хлібної крихти  $\mu_{хк}$  від втрат тиску  $\Delta P$  на регулюючих пристроях різних конструктивних виконань

Аналіз графіків (рис. 3.17) свідчить [82]:

1. При однакових втратах тиску на регулювальних пристроях, кількість вловленого транспортного компонента, яка пройшла через регулювальні пристрої різні, а саме  $\mu_{(ДКЕВ)} > \mu_{(ІДР)}$ ;

2. Зміна густини транспортного компонента (соняшникова лузга та хлібна крихта) обумовлює розбіжність кількості проходження останнього через регулювальні пристрої ІДР та ДКЕВ. Чим менше втрата тиску на регулювальних пристроях, тим більша розбіжність в витратах транспортного компонента. Наприклад, при транспортуванні соняшникової лузги (СЛ) і втратах тиску на регулювальному пристрої  $\Delta P = 75$  Па:  $\mu_{(ДКЕВ)} = 39,40$  г  $>$   $\mu_{(ІДР)} = 28,43$  г. При транспортуванні хлібної крихти (ХК) і тих самих втратах тиску на регулювальному пристрої  $\Delta P = 75$  Па:  $\mu_{(ДКЕВ)} = 36,66$  г  $>$   $\mu_{(ІДР)} = 30,14$  г. Збільшення втрати тиску на регулювальних пристроях сприяє зменшенню різниці кількості транспортних компонентів різних густин.

3. Влаштування ДКЕВ дозволяє збільшувати діапазон регулювання кількості транспортного компонента в системах аспірації.



### **3.5 Експериментальні дослідження впливу регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами на втрати тиску в коліні вентиляційної системи**

Для зміни напрямку руху чистого повітря в системі вентиляції та повітря разом з різного роду домішками в система аспірації та пневмотранспорту без розділення потоку використовуються коліна та відводи, які створюють значний опір протіканню робочого середовища та сприяють утворенню суттєвих втрат тиску в мережі [44, 81, 83]. Основна частина втрат тиску в колінах та відводах виникає внаслідок вихроутворенням біля внутрішньої стінки, яке разом з вторинними потоками визначають в основному і характер розподілення швидкостей за поворотом [44, 81, 83]. Найбільший опір в коліні створюється, коли кромка згину на внутрішній частині гостра, тобто радіус заокруглення внутрішньої стінки  $r_0=0$  і відрив течії від даної стінки відбувається найбільш інтенсивно. Заокруглення зовнішньої стінки при збереженні внутрішньої кромки гострою  $r_0=0$  не призводить до суттєвого зниження опору коліна.

Складність технологічного процесу та велика трудомісткість змушують сучасних виробників вентиляційних систем виробляти коліна з гострими внутрішніми кромками, що підвищує місцеві втрати тиску та не сприяє підвищенню енергоощадності.

В зв'язку з цим нагальною необхідністю є виконання експериментальних досліджень впливу регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами на втрати тиску в коліні вентиляційної системи без зміни конструктивних рішень самого коліна [62, 80, 81, 83].

Дослідження розподілу поля швидкостей та тисків повітря у коліні та після нього (рис. 3.18, а, б) свідчать, що найбільш інтенсивне вихроутворення виникає за гострою кромкою та напроти неї біля зовнішньої частини коліна [44, 81, 83]. Схема зміни епюри швидкостей та тисків в коліні і прямій трубі за ним та залежність коефіцієнта опору коліна від радіуса заокруглення  $r/b_0$  показано на (рис. 3.18, а, б).

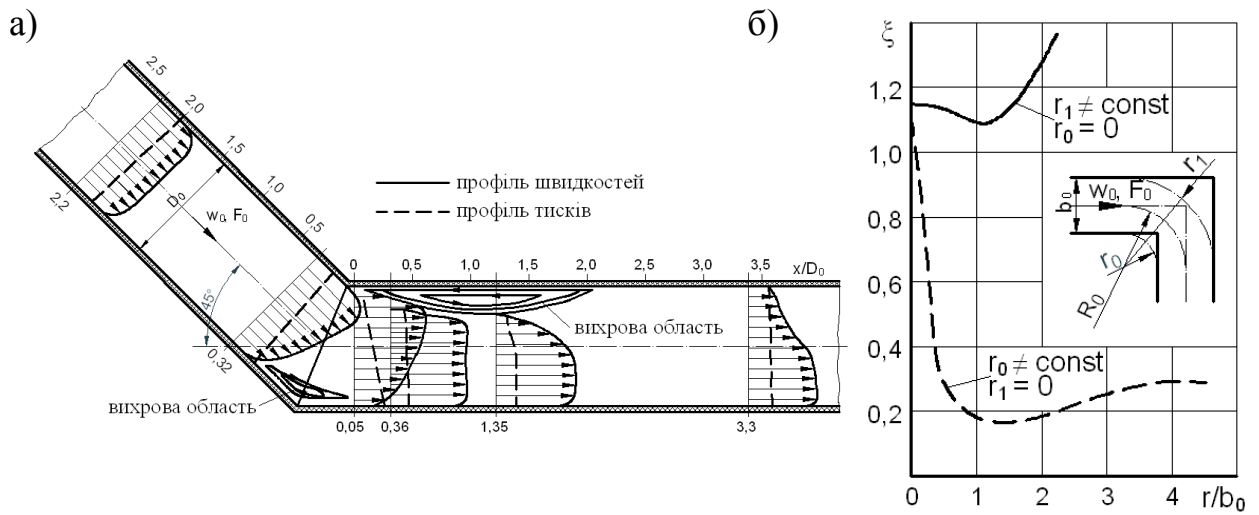


Рисунок 3.18 – Схема зміни епюри швидкостей та тисків в коліні та прямій трубі за ним (а) та залежність коефіцієнта опору коліна від радіуса заокруглення  $r/b_0$  (б)

Аналіз епюр розподілу швидкостей та втрати тиску в коліні (рис. 3.18, а), а також впливу радіуса заокруглення (рис. 3.18, б) свідчить, що одним із шляхів зменшення втрат тиску в коліні є зменшення вихроутворення в вищенаведених областях. Для вирішення поставленої задачі запропоновано влаштування удосконаленої конструкції регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами [62] перед коліном. Схему влаштування регулювального пристрою перед коліном в вентиляційній мережі з вентиляційним агрегатом та вимірювальними приладами наведено на рис. 3.19 [83].

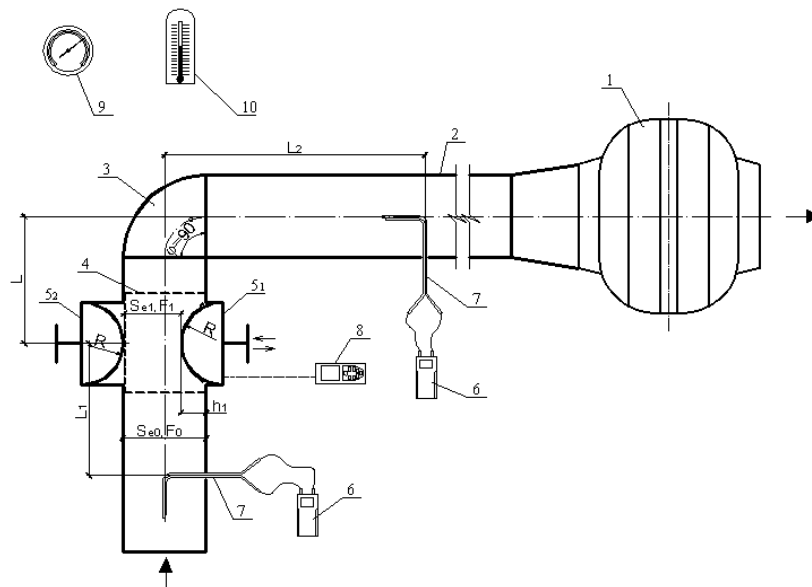


Рисунок 3.19 – Схема дослідження впливу роботи регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами на втрати тиску в коліні вентиляційної системи

На схемі (рис. 3.19) зображено: 1 – вентиляційний агрегат VKA125LD; 2 – повітропровід  $\varnothing 100\text{мм}$ ; 3 – коліно  $90^\circ$ ; 4 – регулювальний пристрій; 5<sub>1</sub>, 5<sub>2</sub> – зручнообтічні виконавчі елементи регулювального пристрою; 6 – диференційний манометр TESTO 510; 7 – трубка Піто; 8 – лазерний вимірювач дистанції Leica DISTO D2; 9 – барометр-анероїд БАММ-1; 10 – термометр спиртовий.

Експериментальні дослідження впливу роботи регулювального пристрою на втрати тиску в коліні проводились згідно методики, що передбачено ГОСТ 12.3.018-79 [50]. Контроль за корегуванням розташування виконавчого елементу регулювального пристрою на експериментальній установці щодо вертикальної та горизонтальної осей повітропроводу здійснювався за допомогою лазерного вимірювача дистанції Leica DISTO D2. Для замірів втрат тиску використовувався диференційний манометр TESTO 510 (рис. 3.19) [83].

Загальний вид експериментальної установки з дослідження впливу роботи регулювального пристрою з зручнообтікаючими виконавчими елементами та втрат тиску в коліні вентиляційної системи наведено на рис. 3.20.



Рисунок 3.20 – Експериментальна установка з дослідження впливу роботи регулювального пристрою на втрати тиску в коліні

При відсутньому режимі регулювання швидкість повітря в повітропроводі становила  $v = 9,3$  м/с, при цьому витрата складала  $Q = 263$  м<sup>3</sup>/год. Для дослідження втрат тиску в коліні вентиляційної мережі, вдавнення еластичної вставки регулювального пристрою здійснювалось із внутрішньої сторони (гострої кромки) відводу на величину  $h_1$  (рис. 3.19).

З метою визначення оптимальної величини переміщення виконавчого елемента до осі регулювального пристрою на величину  $h_1$  та розміщення регулювального елемента відносно осі горизонтального повітропроводу на величину  $L$  (рис. 3.19) при плануванні експерименту визначення області, в межах яких реалізуються сполучення вищенаведених факторів [83]. Побудова математичної моделі процесу регулювання втрат тиску в коліні вентиляційної мережі передбачає виконання операції кодування факторів у вигляді лінійного перетворення факторного простору [2, 83] та встановлення наступних значень рівнів факторів в умовному масштабі, а саме мінімальний  $-1$ , середній  $0$ , максимальний  $+1$  та “зірковий” значення, відповідно,  $-1,414$  та  $+1,414$ , загальна кількість дослідів  $n$  дорівнює  $13$  [2, 83]. За результатами проведення пошукових експериментів встановлюють істинні величини факторів впливу, значення яких наведено в табл. 3.10 [83].

Таблиця 3.10 – Значення рівнів факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні варіювання факторів					Інтервал варіювання
	-1,414	-1	0	+1	+1,414	
$x_1$ – розташування виконавчого елемента щодо горизонтальної осі повітропроводу, м ( $L$ )	0,159	0,163	0,167	0,171	0,175	$\pm 0,004$
$x_2$ – розташування виконавчого елемента щодо вертикальної осі повітропроводу, м ( $h_1$ )	0	0,00825	0,0165	0,02475	0,033	$\pm 0,00825$

З метою проведення повнофакторного експерименту складають матрицю планування експерименту для функції відгуку  $\Delta p_K$  - втрати тиску в коліні, яку наведено в табл. 3.11.

Для функції відгуку  $\Delta p_K$  рівняння регресії згідно багатфакторного експерименту для кодованих значень має вигляд

$$\Delta p_K = 80,22 + 1,405x_1 - 0,905x_2 + 1,25x_1x_2 + 0,32x_1^2 - 0,178x_2^2. \quad (3.15)$$

При цьому дисперсія відтворюваності  $S_{\text{відт}}^2 = 0,7$ ; дисперсія адекватності  $S_{\text{ад}}^2 = 1,25$ ; критерій Фішера  $F=1,79 < [F]=3,41$ , отже регресійна модель (3.15) адекватна. Коефіцієнт кореляції для регресійної моделі (3.15)  $R^2=0,82$ .

Таблиця 3.11 – Матриця планування експерименту для функції відгуку  $\Delta p_K$ 

№ дослуду	X0	X1	X2	X1X2	X1 <sup>2</sup>	X2 <sup>2</sup>	Y
1	1	1	1	1	1	1	83
2	1	-1	1	-1	1	1	77
3	1	1	-1	-1	1	1	82
4	1	-1	-1	1	1	1	81
5	1	-1,414	0	0	2	0	79
6	1	1,414	0	0	2	0	82
7	1	0	-1,414	0	0	2	81
8	1	0	1,414	0	0	2	78
9	1	0	0	0	0	0	81
10	1	0	0	0	0	0	80
11	1	0	0	0	0	0	81
12	1	0	0	0	0	0	79
13	1	0	0	0	0	0	80
b <sub>i</sub>	80,21933	1,40525	-0,90525	1,25	0,32192	-0,17833	
β <sub>i</sub>	127,824	-273,688	-6435,48	37878,79	20120,03	-2620,07	
t	214,3237	4,749028	-3,05928	2,987075	1,014321	-0,56188	[t]=2.776

Після відкидання сполучення факторів [83], які обумовлені умовою порівняння розрахункового значення критерію Стьюдента  $|t_i|$  з критичним, і при умові  $|t_i| \leq [t]$  і-й коефіцієнт регресії вважався незначним, рівняння регресії (3.15) в кодованих значеннях має вигляд

$$\Delta p_K = 80,22 + 1,405x_1 - 0,905x_2 + 1,25x_1x_2. \quad (3.16)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії (3.16) для функції  $\Delta p_K$  має вигляд, Па

$$\Delta p_K = 127,82 + 273,69x_1 - 6435,48x_2 + 37878,7x_1x_2. \quad (3.17)$$

Для зручності оцінювання втрати тиску в залежності від факторів впливу  $\Delta p_K = f(x_1, x_2)$  будують поверхню відгуку (рис. 3.21)

Аналіз поверхні відгуку свідчить, що найменші втрати тиску в коліні досягались внаслідок зближення виконавчого елемента до осі регульовального пристрою на величину  $h_1 = 0,033$ м та при розміщенні виконавчого елемента відносно осі горизонтального повітропроводу на величину  $L = 0,159$ м. Найбільші втрати тиску в коліні досягались при  $h_1 = 0$  м, тобто при відсутності процесу регулювання. Розбіжність втрат тиску в коліні обумовлюється впливом зручнообтічного виконавчого елемента на зменшення вихроутворення в коліні за гострою кромкою та напроти неї біля зовнішньої частини коліна (рис. 3.18, а) [83].

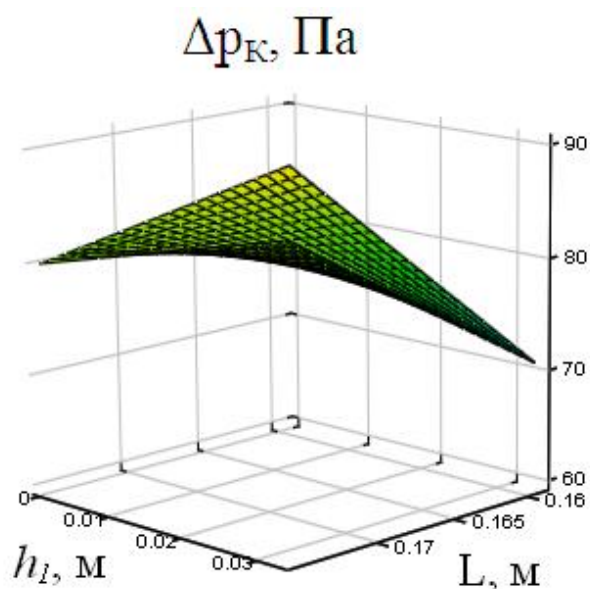


Рисунок 3.21 – Поверхня відгуку функції  $\Delta p_K$  в залежності від параметрів оптимізації в площині їх дійсних значень  $\Delta p_K = f(h_1, L)$

Результати експерименту вказують, що найбільш суттєвий вплив з двох факторів має фактор  $x_2$  ( $h_1$ ) - розташування виконавчого елемента щодо вертикальної осі повітропроводу. Вплив фактору  $x_1$  ( $L$ ) на втрати тиску в коліні без наявності фактору  $x_2$  ( $h_1$ ) втрачає сенс, так як відсутність фактору впливу  $x_2$  ( $h_1$ ) обумовлює відсутність процесу регулювання. Графічну залежність втрати тиску в коліні вентиляційної системи  $\Delta p_K$  від степені зближення виконавчого елемента щодо вертикальної осі повітропроводу  $h_1$  наведено на рис. 3.22 [34, 83].

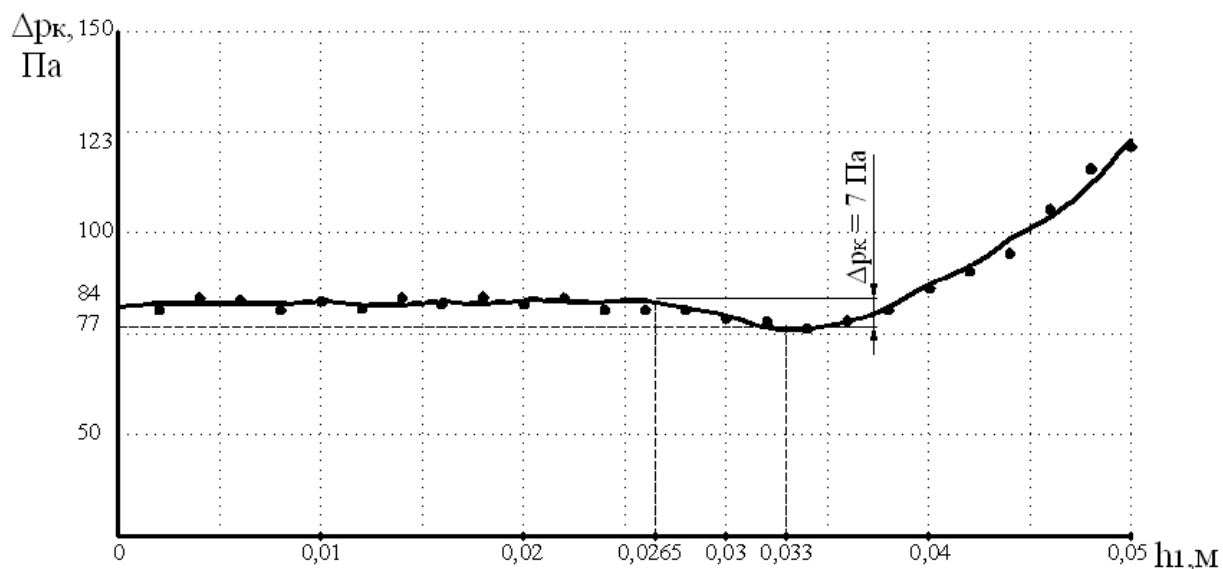


Рисунок 3.22 – Залежність втрат тиску в коліні  $\Delta p_K$  від степені зближення виконавчого елемента  $h_1$  регульовального пристрою до його осі

Аналіз графіка свідчить (рис. 3.22) [34], що при степені зближення виконавчого елемента до осі регулювального пристрою  $h_I = 0 \dots 0,0265\text{м}$  втрати тиску в коліні трубопровода діаметром 100 мм при швидкості до 10 м/с коливаються в межах  $\Delta p_K = 82 \dots 84\text{Па}$ . При подальшому зближенні виконавчого елемента до осі регулювального пристрою втрати тиску поступово зменшуються і досягають найменшого значення  $\Delta p_{Kmin} = 77\text{Па}$  при  $h_{Imin} = 0,033\text{м}$ . При  $h_I > 0,033\text{м}$  втрати тиску різко зростають і при досягненні виконавчим елементом осі регулювального пристрою  $h_I = 0,05\text{м}$  втрати тиску досягають 123Па.

Результати дослідження свідчать про можливість застосування регулювального пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами перед коліном вентиляційної мережі для зменшення в останньому трат тиску.

Отримана емпірична залежність  $\Delta p_K = f(h_I, L)$  може бути використана в методиці інженерного розрахунку вентиляційної мережі, що дозволить збільшити енергоощадність за рахунок зменшення втрат тиску в вентиляційній мережі [83].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г.Н. - М.: Наука, 1976.- 544 с.
2. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Александров А.Н. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях / А.Н. Александров, Г.Ф. Козориз. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 248 с.
4. Алексин В.А. Математические модели турбулентных течений: учеб. пособие / В. А. Алексин. –М. : МГИУ, 2008. – 54 с.
5. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Справочник / Алиев Г.М.-А.. – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
6. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости). Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп./ А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. - М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
7. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер; пер. с англ. С. В. Сенина, Е. Ю. Шальмана ; под ред. Г. Л. Подвидза. - М. : Мир, 1990. – 728 с.
8. Андрійчук К.Н. Системи вентиляції зі струминними елементами регулювання : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 : захищена 15.02.07 : затв. 24.05.12 / Андрійчук Костянтин Миколайович. – М., 2007. – 156 с.- Бібліогр.: с.134-146. – 04200201565.
9. Андрійчук К. Н. Математическое моделирование аэродинамических характеристик элементов и систем вентиляции / К. Н. Андрійчук, Н.Д. Андрійчук. – Луганск: Издательство ВНУ им. В. Даля, 2005. – 88 с.
10. Андрійчук К.Н. Обобщенная математическая модель аэродинамических характеристик приточно-вытяжной вентиляционной системы / Збірник наукових праць Луганського національного аграрного



університету. – Луганськ – 2005, № 49 (82). – с. 106 – 110.

11. Арсирий В.А., Ярошевский В.П. Неравнозначность влияния сопротивлений на параметры аэродинамической системы в зонах избыточного давления и разрежения / В.А. Арсирий., В.П. Ярошевский // Праці Одеського політехнічного університету. Енергетика. Теплотехніка. Електротехніка. Вип. 1(35), Одесская государственная академия строительства и архитектуры. 2011. - С. 74 – 77.

12. Беккер А. Библиотека климатехники. Системы вентиляции / Беккер А. – М.: Техносфера, Евроклимат, 2005. – 232 с.

13. Богуславский Л.Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. Пособие / Богуславский Л.Д., Ливчак В.И., Титов В.П. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.

14. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента / Бродский В.З.. – М.: Наука, 1976. – 274 с.

15. Бутаков С.Е. Воздухопроводы и вентиляторы. Аэродинамика вентиляторных установок / Бутаков С.Е. – М.: Машгиз, 1958.

16. Вахвахов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок / Вахвахов Г.Г. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.

17. Вахвахов Г. Г. Работа вентиляторов в сети / Вахвахов Г.Г. – М.: Стройиздат, 1975. – 101 с.

18. Ведомственные нормы технологического проектирования свеклосахарных заводов: ВНТП 03 – 91. – М.: Гипросахпром, 1991. – 357 с.

19. Ведомственные нормы технологического проектирования заводов и пунктов послеуборочной обработки и хранения продовольственного, фуражного зерна и семян зерновых, зернобобовых, масличных культур и трав: ВНТП 16-88. – М.: Госагропром СССР, 1988. – 45 с.

20. Вентилювання приміщень. Навчальний посібник / С.С. Жуковський, О.Т. Возняк, О.М. Довбуш, З.С. Люльчак. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. – 476 с. (ISBN 978-966-553-645-1).

21. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний: ГОСТ 10921–90. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 35 с.
22. Вентиляторы радиальные и осевые. Размеры и параметры: ГОСТ 10616-90. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 14 с.
23. Виноградов Б.С. Прикладная газовая динамика / Виноградов Б.С. – М.: Университет дружбы народов им. Патрис Лумумбы, 1965. – 348 с.
24. Внутренние санитарно-технические системы: СНиП 3.05.01-85. – М.: Минстрой России, 1985. – 30 с.
25. Возняк О.Т. Особливості зворотного потоку при подачі повітря плоскими настільними струминами / Возняк О.Т. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 8. – К.: КНУБА, 2005. С. 3 – 11.
26. Возняк О.Т. Основи наукових досліджень / О.Т. Возняк, В.М. Желих, Ю. С. Юркевич. - Львів: видавництво НУ«ЛП», 2007. – 62 с.
27. Возняк О.Т. Повітророзподільник із взаємодією зустрічних не співвісних плоских струмин в приміщеннях ювелірного заводу / Возняк О.Т., Миронюк Х.В., Сухолова І.Є. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 12. – К.: КНУБА, 2008. С. 3 – 10.
28. Гулай Б.І. Підвищення ефективності вентиляційних систем вирівнюванням нагнітального потоку радіального вентилятора : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 : захищена 24.05.12 : затв. 24.05.12 / Гулай Богдан Іванович. – Д., 2012. – 195 с.- Бібліогр.: с.173-187. – 04200201565.
29. Гусенцова Я.А. Оптимизация технико-экономических характеристик вентиляционных систем / Я. А. Гусенцова, К. Н. Андрійчук, М. Д. Андрійчук. - Луганск: Видавництво СНУ ім. В. Даля, 2005. - 52 с.
30. Гусенцова Я. А. Системы вентиляции (технико-экономические характеристики) / Я. А. Гусенцова, К. Н. Андрійчук, М. Д. Андрійчук.- Луганск: Видавництво СНУ ім. В. Даля, 2005.-32 с.

31. Довгалюк В.Б. Розрахункова модель неізотермічної струмини, що насталяється на опуклу циліндричну поверхню / В.Б. Довгалюк, В.О. Мілейковський // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 12. – К.: КНУБА, 2008. С. 11 – 32.

32. Донин Л.С. Справочник по вентиляции в пищевой промышленности / Донин Л.С.. – М.: Издательство «Пищевая промышленность». 1977. – 352 с.

33. Донин Л.С. Справочник по вентиляции, кондиционированию и теплоснабжению предприятий пищевой промышленности / Донин Л.С. – М.: Издательство «Пищевая промышленность», 1968. – 286 с.

34. Дорожовець М. М. Опрацювання результатів вимірювань : навч. посіб. / Дорожовець М. М. – Львів : Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2007. – 624 с.

35. Экк Б. Проектирование и эксплуатация центробежных и осевых вентиляторов / Экк Б. - М.: ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1959. - 566с.

36. Жуковський С.С. Аеродинаміка вентиляції: Навчальний посібник / С.С. Жуковський, В.Й. Лабай. – Львів: видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. – 372 с.

37. Журавлев Б.А. Наладка и регулирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Справочное пособие. Под ред. Б.А. Журавлева / Журавлев Б.А., Загальський Г.Я., Овчинников П.А. и др. – М.: Стройиздат, 1980. – 448 с.

38. Загузов И.С. Математические модели в аэрогидромеханике. Часть I. Учебное пособие. Изд./ И.С. Загузов, К.А. Поляков. – Самара: Самарский университет, 2001. – 88 с.

39. Загузов И.С. Математические модели в аэрогидромеханике. Часть II. Учебное пособие. Изд./ И.С. Загузов, К.А. Поляков. – Самара: Самарский университет, 2002. – 97 с.

40. Зайцев О.Н. Влияние прецессии и нутации вихрового ядра на устойчивость закрученного потока газа / Зайцев О.Н. // Вентиляція,

освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 8. – К.: КНУБА, 2005. С. 12 – 15.

41. Зайцев О.Н. Исследования динамических характеристик при взаимодействии встречно-смещенных закрученнях газовых струй / Зайцев О.Н. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 8. – К.: КНУБА, 2005. С. 16 – 19.

42. Зінич П.Л. Вентиляція громадський будівель. Навчальний посібник / Зінич П.Л.. – К.:КНУБА, 2002. – 256 с.

43. Идельчик И. Е. Гидравлическим сопротивления / Идельчик И. Е. - М.: ГосЭнергоИздат, 1954. – 314 с.

44. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М.О.Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. / И.Е. Идельчик – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

45. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия. Межгосударственный стандарт: ГОСТ 8.563.1-97 - ГСОЕИ. – РФ: Госстандарт России, 1997. – 63 с.

46. Каталог вентиляционного оборудования Systemair. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.systemair-ukraine.com>.

47. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л.: Энергоамотиздат, 1983. – 320с.

48. Логачев И.Н. Аэродинамические основы аспирации / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 659 с.

49. Малкін Е.С. Особливості нерівномірного розподілу повітряного потоку в трубному пучку / Малкін Е.С., Чепурна Н.В., Кириченко М.А. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 16. – К.: КНУБА, 2012. С. 17 – 19.

50. Методы аэродинамических испытаний: ГОСТ 12.3.018-79. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.

51. Мілейковський В.О. Геометричний аналіз розширення та згасання вільних плоских струмин / Мілейковський В.О. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 16. – К.: КНУБА, 2012. С. 3 – 8.

52. Мілейковський В.О. Дослідження втрат тиску в повітророзподільниках з тангенціальними випусками повітря / Мілейковський В.О. // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. Вип. 8. – К.: КНУБА, 2005. С. 33 – 39.

53. Митюшкин Ю.И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн А.П. – В.: Универсум, 2002. – 145с. – ISBN 966-641-051-6.

54. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 38 с.

55. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 114с.

56. Нормы технологического проектирования предприятий малой мощности по производству растительных масел из семян подсолнечника и рапса методом пресования: ВНТП 20м – 93. – М.: НПО «Масложирпром», 1993. – 68 с.

57. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013 – Київ: Мінрегіон України, 2013. – 141 с.

58. Опалення, вентиляція і кондиціонування повітря. Робочі креслення: ДСТУ Б А.2.4-41:2009. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 31 с.

59. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2-х частях. Часть II. Вентиляция. Под редакц. В.Н. Богословского / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.

60. Патент 33043 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u200801268; Заявл. 01.02.2008; Опубл. 10.06.2008, Бюл.№11.

61. Патент 44940 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u200903248; Заявл. 06.04.2009; Опубл. 26.10.2009, Бюл.№20.

62. Патент 52768 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201002050; Заявл. 25.02.2010; Опубл. 10.09.2010, Бюл.№17.

63. Патент 57718 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201009851; Заявл. 09.08.2010; Опубл. 10.03.2011, Бюл.№5.

64. Патент 62410 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201101773; Заявл. 15.02.2011; Опубл. 25.08.2011, Бюл.№16.

65. Патент 66911 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201107809; Заявл. 21.06.2011; Опубл. 25.01.2012, Бюл.№2.

66. Патент 66912 UA, МПК F16K 7/00, B08B 15/00. Дросельний пристрій / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201107810; Заявл. 21.06.2011; Опубл. 25.01.2012, Бюл.№2.

67. Патент 81628 UA, МПК F24F 13/02, F24F 13/08. Регулюючий відвід / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201214504; Заявл. 18.12.2012; Опубл. 10.07.2013, Бюл.№13.

68. Патент 82089 UA, МПК F24F 13/02, F24F 13/08. Регулюючий пристрій прямокутного повітроводу / Степанковський Р.В., Ратушняк Г.С. - № u201214134; Заявл. 11.12.2012; Опубл. 25.07.2013, Бюл.№14.

69. Пономарев В.Б. Аспирация и очистка промышленных выбросов и сбросов: методические указания по курсу «машины и агрегаты предприятий строительных материалов» / В.Б. Пономарев, А.Е. Замураев. - Екатеринбург:

ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет–УПИ», 2007. - 44 с.

70. Правила определения стоимости строительства: ДБН Д.1.1.-1-2000. – Киев, 2001. – 136 с.

71. Правила охорони праці в цукровому виробництві: НПАОП 15.83-1.05-96. – Київ: 1996. – 295 с.

72. Примеры расчетов по гидравлике / Альштуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г., Пальгунов П.П. – М.: Стройиздат, 1977. – 255 с.

73. Ратушняк Г.С. / Моделювання надійності систем теплопостачання на основі лінгвістичної інформації / Г.С. Ратушняк, О.А. Левицький, О.Г., Ратушняк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2004. – №3. – С. 179-192.

74. Ратушняк Г.С. Вдосконалення регулювання аеродинамічних потоків трубопровідних систем /Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – №4, серія «Технічні науки» – С. 26-33.

75. Ратушняк Г.С. Моделювання енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж на основі лінгвістичної інформації / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2012. – Випуск 10, т .2(59), серія «Технічні науки» – С. 155-163.

76. Ратушняк Г.С. Модель багатофакторної оцінки енергоефективності функціонування аеродинамічних мереж / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський, С.В. Савчук // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – №1(12) – С. 95-103.

77. Ратушняк Г.С. Планування багатофакторного експерименту для дослідження регулюючих пристроїв аеродинамічної мережі / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2012. – №2 – С. 99-106.

78. Ратушняк Г.С. Оцінювання надійності функціонування вентиляційних систем за допомогою нейрон-нечітких мереж / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – №1 – С. 51-56.

79. Ратушняк Г.С. Енергоощадні схеми вентиляційних систем з вдосконаленою конструкцією регулюючих пристроїв / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Науково-технічний збірник “Енергоефективність в будівництві та архітектурі”. – Київ, 2013. – Випуск 4. –С. 231-234.

80. Ратушняк Г.С. Оцінка впливу конструкцій регулювальних пристроїв аеродинамічних мереж на їхні коефіцієнти місцевих опорів / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. – Макіївка, 2013. – № 2013-3(101) – С. 3-8.

81. Ратушняк Г.С. Снижение расхода энергии системами вентиляции путем совершенствования аэродинамических свойств фасонных частей / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковский // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – Брест, 2013. – №2(80) – С. 82-85.

82. Ратушняк Г.С. Експериментальні дослідження робочих характеристик регулюючого пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами в системах аспірації підприємств харчової промисловості/ Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2014. – Випуск 1 (84), серія «Технічні науки» – С. 162-169.

83. Ратушняк Г.С. Дослідження впливу регулюючого пристрою з зручнообтічними виконавчими елементами на втрати тиску в коліні вентиляційної мережі / Г.С. Ратушняк, Р.В. Степанковський // Вісник Сумського національного університету. Серія: Будівництво. – 2015. - №2 – С. 37-41.



84. Ратушняк Г.С. Эксплуатация систем теплоснабжения та вентиляції / Г.С. Ратушняк, Г.С. Попова. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 122 с.
85. Ратушняк Г.С. Теоретичні основи технології очищення газових викидів. Навчальний посібник / Ратушняк Г.С. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 96 с.
86. Ротштейн О.П. / Soft Computing в біотехнології: багатофакторний аналіз і діагностика / О.П. Ротштейн, Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Мітюшкін: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 144 с.
87. Ротштейн А.П. / Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. Ротштейн, С. Штовба. – Винница: Континент – ПРИМ, 1997. – 142с.
88. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
89. Рысин С.А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов / Рысин С.А.. – М.: Издательство «Машиностроение», 1964. – 704 с.
90. Рысин С.А. Справочник по вентиляторам / Рысин С.А.. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. – 248 с.
91. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – Київ: Постанова КМУ №42 від 01.12.99. – 10 с.
92. Системы VAV. Руководство. Издательство: SMAУ (издание первое). - Краков, 2009. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ivancovs.com/wp-content/uploads/VAV.pdf>
93. Снижение аэродинамического сопротивления адсорбционных фильтров / В.И. Соколов, А.А. Коваленко, И.Г. Дейнека, А.В. Андрийчук, Н.В. Эглит // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2009. - № 2(132).- С. 371-376.
94. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А. А.–М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

95. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Юрьев А.С., Грачев И.Г., Пирогов С.Ю., Савищенко Н.П. – Санкт-Петербург: АНО НПО «Мир и семья», 2001. – 1154 с.
96. Староверов И.Г. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть II. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Староверов И.Г.. – М.: Стройиздат, 1977. – 502 с.
97. Староверов И.Г. Монтаж вентиляционных систем / Староверов И.Г.– М.: Стройиздат, 1978. – 591 с.
98. Степанковский Р.В. Усовершенствование регулирования расходов рабочей среды аэродинамических систем / Р.В. Степанковский // Молодой ученый. Ежемесячный журнал. – 2013. – №1(48) – С. 18-22.
99. Соколов В. И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем / Соколов В. И. – Луганск: ВУГУ, 1999. - 200 с.
100. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. Пособие для вузов / Талиев В.Н.. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с., ил.
101. Шашкин А.П. Основы прикладной газодинамики. Моделирование газодинамических течений. Учебное пособие для студентов 3-4 курсов ФЛА гидрогазодинамических специальностей / Шашкин А.П. – Новосибирск, 2001. – 91 с.
102. Шевелев Ю.Д. Пространственные задачи вычислительной аэрогидродинамики / Шевелев Ю.Д. – М.: Наука, 1986. – 368 с.
103. Щекин Р.В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга вторая. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Щекин Р.В., Корневский С.М., Бем Г.Е. – К.: Издательство «Будівельник», 1976. – 352 с.
104. Штокман Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Штокман Е.А. – М.: АСВ, 2001. – 564 с.

105. Штокман Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. / Штокман Е.А.. – М.: Агропромиздат, 1989. – 312 с.

106. Умовні графічні зображення і позначки елементів санітарно-технічних систем: ДСТУ Б А.2.4-8:2009. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 15 с.

107. Cebeci T. Analysis of Turbulent Boundary Layers / T. Cebeci, A. M. O. Smith – New York: Academic, 1974.

108. Launder B. E. The Numerical Computation of Turbulent Flows / B. E. Launder, D. B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1974. – Vol. 3. – P. 269 – 289.

109. Patent 7255322 B1, USA, Int. Cl. F16K 7/04. Pinch valve system with extended life / John Tiwet, Rebecca Tiwet. - №11/408,402; Apr. 21.06; Aug. 14.07.

110. Sokolov V., Kuz'menko S., Veligura A. Temporal characteristics of the initial stages diffusion of aerosols in a turbulent flow // ТЕКА Ком. Mot. i Energ. Roln. – OL PAN, 2010, 10B, Lublin, Poland, pp. 178 – 185.

111. SolidWorks. Компьютерное моделирование в современной парактике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.