

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Навчально-науковий інститут
«Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
 Кафедра _____ АМтаЕТ _____

До захисту допущено
Завідувач кафедри

(підпис)

_____ д.т.н., професор Канюк Г.І.
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

рівень вищої освіти _магістр_____
 спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
 робототехніка
 освітньо-професійна програма _____

тема «Дослідження та оптимізація системи керування вентиляцією
 метрополітену»

Виконав (ла)

студент (ка) групи _ЗЕА-23мг_____
 (шифр групи)

___ **ЩЕНКО Наталія Володимирівна**
 (ім'я, прізвище)

Керівник роботи _к.т.н., Мезеря А.Ю.
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Рецензент роботи _к.т.н., Буданов П.Ф._
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Консультант _____
 (назва розділу)

_____ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
 немає цитат та вилучень з
 праць інших авторів без відповідних
 посилань
 студент(ка) _____
 (підпис)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Навчально-науковий інститут****«Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна**

Кафедра __АМтаЕТ__

Спеціальність _174_

Освітньо-професійна програма _магістр_

ЗАТВЕРДЖУЮ**Завідувач кафедри**

(підпис)

д.т.н., професор Канюк Г.І. __

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ**на кваліфікаційну роботу****_____ рівня вищої освіти**студенту (ці) __ **ІЩЕНКО Наталія Володимирівна** __

(ім'я, прізвище)

1. Тема _____ Дослідження та оптимізація системи керування вентиляцією метрополітену

затверджена наказом по академії №_4801-5/3704_ від «21»_11_ 2024р.

2. Термін здачі закінченої роботи «_28_»_11_ 2024__р.**3. Вихідні дані до роботи _____ Існуючі схеми автоматичного керування вентиляцією метрополітену та їх конструкції, методи керування, математичні моделі _____****4. Зміст роботи (перелік питань, які належить розробити):**

____ Аналіз сучасного обладнання метрополітену, аналіз недоліків та переваг існуючих систем керування вентиляцією метрополітену. Дослідження режимів роботи вентиляції метрополітену, дослідження перспективних напрямків розвитку, висновки

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Актуальність теми, існуюче обладнання вентиляції метрополітену, недоліки та переваги існуючих систем керування вентиляцією, порівняльний аналіз систем керування, висновки.

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 14 » 09 2024 р.

Керівник

 (підпис) _____ Мезеря А.Ю. _____
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

 (підпис) _____ Іщенко Н.В. _____
(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Аналіз існуючих систем керування	14.10-28.10	виконано
2	Аналіз характеристик систем керування в різних режимах роботи	28.10-05.11	виконано
3	Порівняльний аналіз	05.11-14.11	виконано
4	Експериментальні дослідження	14.11-28.11	виконано
5	Висновки	28.11	виконано

Студент (ка)

 (підпис)

_____ Іщенко Н.В.
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

 (підпис)

_____ Ключка Є.П. _____
(ім'я, прізвище)

Зміст

Вступ	6
1.1. Постановка задачі	8
1.2 Класифікація систем кондиціювання та вентиляції	12
1.3 Опис системи вентиляції у метрополітені	13
1.4 Вимоги до вентиляційної установки	15
1.5 Розробка технічного завдання	16
Розділ 2. Аналіз особливостей перебігу перехідних газодинамічних процесів у повітряних потоках вентиляційних шахт	18
2.1 Методи розрахунку нестационарних режимів вентиляції	20
2.2 Провітрювання вентиляційних шахт в аварійних умовах	25
Розділ 3. Математичне моделювання нестационарних процесів вентиляції тунельних виробок	34
3.1 Вимоги до математичної моделі нестационарної аеродинаміки в тунельних виробках	34
3.2 Диференціальні рівняння нестационарної газової динаміки у мережі виробок	36
3.3 Моделювання перенесення тепла у стінках тунельних вентиляційних шахт	42
3.4 Математична модель нестационарних процесів у перетинах вентиляційних шахт	43
3.5 Початкові та граничні умови	45
3.6 Алгоритм та метод вирішення системи рівнянь задачі тунельної аеродинаміки у мережі виробок вентиляційної шахти	46

Розділ 4. Моделювання нестаціонарних процесів вентиляції мережі виробок вентиляційних шахт	53
4.1 Розрахунок перенесення повітря в мережі виробок на прикладі модельної ділянки вентиляційної шахти	54
4.2 Моделювання провітрювання глухого кута тунельним вентилятором	58
4.3 Чисельне моделювання провітрювання тунельного глухого кута в двомірній постановці	61
4.4 Моделювання процесів перенесення вуглекислого газу при реверсі вентилятора провітрювання	66
Розділ 5. Розрахунок та вибір елементів системи управління	70
5.1 Розрахунок та вибір двигуна	70
5.2 Вибір шафи автоматичного керування вентиляторами	74
5.3 Вибір датчика для контролю швидкості та інтенсивності циркуляції потоку повітря	78
5.4 Вибір датчика для контролю температури та вологості	80
5.5 Вибір датчика для оцінки рівня концентрації шкідливих речовин ..	82
5.6 Система керування вентиляційними агрегатами	83
Основними перевагами систем автоматичного керування вентиляторами є:	84
Розділ 6. Дослідження динаміки системи керування	86
Висновки	96
Список використаних джерел	97

Вступ

Однією з основних систем, що відповідають за життєзабезпечення метрополітену, є система вентиляції станцій та тунелів. Вона підтримує мікроклімат, що задовольняє гігієнічним вимогам, створює необхідні режими провітрювання, а при необхідності димовидалення.

Дихати в метро стає все важче. Це помічають усі.

У електродвигунах поїздів підземки згорають мільйони кіловат електрики. Майже стільки ж енергії витрачають пасажирів – це тепло наших тіл та дихання. Коли зводили метрополітен, не розраховували на сучасний пасажиропотік.

Пропускна спроможність становила близько 1 млн. чоловік на день. Зараз щодня в метро спускається близько 4 млн. А через два – три роки ця цифра може зрости до 5 – 6 млн. Крім того, багато пасажирів навіть не здогадуються, що кожні 11 – 12 метрів спуску ескалатором підвищують артеріальний тиск на цілу одиницю. Найважче тим, у кого воно гранично високе.

Усередині вагона пасажирів дихають повітрям, яке йде туди на ходу вагона через вентиляційні ґрати та розтруби на даху. Щоб нормально все провітрювалося, швидкість має бути щонайменше 60 кілометрів на годину. Але проблема в тому, що при перенаселенні вагона його на всіх не вистачає, особливо при русі в годину пік, коли вагон рідко набирає потрібну для провітрювання швидкість. Коли поїзд стоїть, жодної вентиляції взагалі немає. Пасажирів починають хвилюватися і витікають ще більше тепла та вуглекислого газу. Отже, люди ще більше задихаються.

Об'єктом оптимізації є система управління вентиляційної мережі Харківського метрополітену.

Мета роботи - вибір комплексу технічних засобів системи управління вентиляційної мережі з метою підтримки мікроклімату на станціях та в тунелі.

В процесі роботи виконано розрахунок та вибір елементів системи керування вентиляційною мережею. Виконано математичне моделювання системи керування.

Результат оптимізації - покращення мікроклімату на станції та в електропоїзді, що знаходиться у тунелі.

Досягнення цієї мети під час дослідження вирішуються такими **задачами**:

1. літературний огляд джерел з питання автоматизації систем вентиляції метрополітену;
2. аналіз існуючих рішень щодо керування систем вентиляції метрополітену;
3. побудова математичної моделі системи вентиляції метрополітену;
4. дослідження роботи виконавчих механізмів на основі розроблених моделей.

Об'єктом роботи є процес роботи системи вентиляції метрополітену.

Предметом роботи є способи підвищення показників якості систем керування вентиляцією метрополітену.

Практична значимість роботи полягає у підвищенні показників якості регулювання систем вентиляції метрополітену.

Наукова новизна:

1. Отримали подальший розвиток методи регулювання систем вентиляції метрополітену
2. Удосконалено математичні моделі системи вентиляції метрополітену
3. Підвищені показники якості регулювання систем вентиляції метрополітену.

Ключові слова: оптимізація, вентиляційна система, метрополітен, повітря, система управління.

Розділ 1. Опис вентиляційної мережі

1.1. Постановка задачі

Є одна незаперечна перевага, яка вигідно відрізняє вітчизняний метрополітен від закордонних, - це сприятливі кліматичні умови на станціях і в тунелях.

Такі комфортні умови для пасажирів та персоналу створює електромеханічна служба. .

Головним завданням вентиляції метрополітену є видалення тепла, що виділяється електропоїздами, різними електродвигунами та приладами освітлення, пасажирами [1].

Частково це тепло поглинається навколишнім ґрунтом. Якщо надлишок тепла не видаляти, ґрунт поступово прогріватиметься, підвищиться температура повітря в тунелях та на станціях. Ось чому протягом години повітря у тунелях кілька разів замінюється. Установки тунельної вентиляції переробляють понад 50 млн. м³/год.

Як же працює метрополітенівська «фабрика повітря»?

Подача і видалення повітря проводиться через вентиляційні шахти, що спеціально споруджуються, які повідомляються з перегінними станційними тунелями по повітроводах. Повітроводи - це самі тунелі, або спеціальні канали, розташовані біля склепіння станційних або ескалаторних тунелів.

Схема вентиляційних пристроїв залежить від глибини закладання тунелів. Так, на першій черзі будівництва метрополітену було застосовано штучне провітрювання станцій і природне провітрювання тунелів за рахунок поршнеподібної дії поїздів і температурних перепадів між повітрям, що виходить і входить в тунель.

Вентиляційні шахти розташовувалися по всій довжині перегону, на відстані

один від одного. Здавалося б, що більше, то краще. Але вийшло навпаки. Велика кількість вентиляційних шахт створювало значні будівельні труднощі та не давало належного ефекту.

Згодом ряд шахт природної вентиляції довелося реконструювати та встановити у них вентилятори. Надалі почали застосовувати лише штучну припливно-витяжну вентиляцію, коли всі шахти обладнуються вентиляторами.

Принцип роботи вентиляційних систем досить простий: у теплу пору року повітря забирається з поверхні і через вентиляційні шахти подається на станції, завдяки чому там підтримується прохолодніше повітря. Видаляється повітря через вентиляційні шахти, що розташовані на перегонах.

У холодну пору року повітря забирається з поверхні через шахти на перегонах, шляхом його підігрівається за рахунок тепла, що виділяється в тунелях електропоїздами, і на станції надходить теплішим, а видаляється станційними шахтами.

На поверхні вхід і вихід повітря здійснюється через вентиляційні кіоски, від місця розташування яких залежить якість повітря, що подається в тунелі та на станції. Проектувальники прагнуть розмістити вентиляційні кіоски у місцях, де більше зелені.

Повітря з поверхні проходить каналом і стовбуром шахти, а потім вентиляторами подається на станцію або в тунель.

Конструкція вентиляторів дозволяє змінювати напрямок подачі повітря, тобто в одну пору року працювати на подачу, а в іншу - на витяжку.

Вентиляція підземної магістралі створює найкращі умови роботи обслуговуючого персоналу. Службові та виробничі приміщення, що знаходяться під землею, не мають природного обміну повітря, потребують штучної вентиляції. Повітря їм береться, зазвичай, з тунелів. При цьому він попередньо очищається у фільтрах, а за необхідності охолоджується або підігрівається. З

приміщень його випускають у тунель, під час руху поїзда, на значній відстані від місць, де «свіжий» забирається з поверхні.

Машинні зали ескалаторів обладнані припливно-витяжними системами вентиляції, які повітря надходить безпосередньо з поверхні.

Кожна група службових та виробничих приміщень має свою вентиляційну камеру.

Контроль за параметрами повітря - одна з найсерйозніших проблем, що розв'язується колективом електромеханічної служби. така система складна та малоефективна. До того ж не завжди можна вжити оперативних заходів у випадках відхилення від норми. параметрів повітря.

На допомогу прийшла автоматика.

У місцях контролю параметрів повітря встановлюють спеціальні датчики. Вони передають сигнали на телеметричну апаратуру релейне приміщення станцій, потім ця інформація надходить до диспетчера на цифровий прилад, що показує фізичні одиниці вимірювання. Одночасно інформація надходить на телетайп і далі ЕОМ для статистичної обробки.

Зараз у системі використовуються лише датчики температури та вологості повітря.

Комплекс пристроїв телемеханіки та телевимірювання становить значний інтерес: можна повністю перейти на автоматизоване керування вентиляцією метрополітену. Підвищиться оперативність, точність та якість вимірювань, зменшиться трудомісткість їх виконання, а головне, постійно автоматично підтримуватиметься певний режим вентиляції, який, економно витрачаючи електроенергію та трудові ресурси, забезпечить встановлені параметри якості повітря.

У процесі вивчення існуючих методів та підходів опису нестационарних процесів у вентиляції метрополітену встановлено наступне:

. Єдиним варіантом існуючим стаціонарним методам розрахунку вентиляції тунелю та станцій метро є метод розрахунку, заснований на вирішенні нестационарних рівнянь газової динаміки.

На сьогоднішній день не розглянуто переважно перехідні процеси, пов'язані зі зміною газодинамічних параметрів вентиляційного потоку в тунелі при виникненні пожежі.

Не в повному обсязі вивчено перебіг нестационарних процесів у межах групи тунельних вентиляційних шахт, що знаходяться в тунелі під різними кутами у вертикальній площині, що дозволяє врахувати додатковий вплив на перехідний процес сил плавучості за зміни щільності вентиляційного потоку в умовах пожежі або підвищеного виділення вуглекислого газу.

Метою даної роботи є розробка газодинамічного підходу, що дозволяє аналізувати та досліджувати нестационарні аеродинамічні та перехідні газодинамічні процеси вентиляції тунелів та станцій для організації ефективного управління провітрюванням.

Вирішуватимуться такі завдання:

- розробка математичної моделі нестационарних процесів вентиляції тунелю з урахуванням потоку маси та енергії з поверхні тунельних виробок;
- розробка програмного комплексу та чисельного методу, що створюють багатопараметричне моделювання газодинамічних перехідних процесів у тунельних виробках з урахуванням тепломасообміну, вентиляційних споруд, вентиляторів місцевого та тунельного провітрювання. За результатами чисельного експерименту встановити особливості впливу прогріву і прискорення повітря при його русі, а також теплової депресії, що формується на розвиток перехідного процесу вентиляції тунелю;
- провести чисельне моделювання процесів перенесення вуглекислого газу в мережі вентиляційних шахт при реверсі тунельного вентилятора,

перерозподіл потоків повітряної суміші при роботі вентиляційної шахти та витіснення повітряної суміші з тунельного глухого кута шляхом подачі свіжого повітря в тунель.

1.2 Класифікація систем кондиціонування та вентиляції

Кондиціонування повітря - це створення та автоматична підтримка (регулювання) у закритих приміщеннях всіх або окремих параметрів (температури, вологості, чистоти, швидкості руху повітря) на певному рівні з метою забезпечення оптимальних метеорологічних умов, найбільш сприятливих для самопочуття людей або ведення технологічного процесу.]

Кондиціонування повітря здійснюється комплексом технічних засобів, що називається системою кондиціонування повітря (ВКВ). До складу ВКВ входять технічні засоби забору повітря, підготовки, тобто. надання необхідних кондицій (фільтри, теплообмінники, зволожувачі або осушувачі повітря), переміщення (вентилятори) та його розподілу, а також засоби холодо- та тепlopостачання, автоматики, дистанційного керування та контролю. ВКВ великих громадських, адміністративних та виробничих будівель обслуговуються, як правило, комплексними автоматизованими системами управління.

Автоматизована система кондиціонування підтримує заданий стан повітря у приміщенні незалежно від коливань параметрів довкілля (атмосферних умов).

Основне обладнання системи кондиціонування для підготовки та переміщення повітря агрегується (компонується в єдиному корпусі) в апарат, який називається кондиціонером. У багатьох випадках всі технічні засоби для кондиціонування повітря скомпоновані в одному блоці або в двох блоках, і тоді поняття "ВКВ" та "кондиціонер" є однозначними.

Перш ніж перейти до класифікації систем кондиціонування, слід зазначити,

що загальноприйнятої класифікації ВКВ досі не існує і пов'язано це з багатоваріантністю принципів схем, технічних та функціональних характеристик, що залежать не тільки від технічних можливостей самих систем, а й від об'єктів застосування (приміщень, що кондиціонуються)).

Сучасні системи кондиціонування можуть бути класифіковані за такими ознаками:

- за основним призначенням (об'єктом застосування): комфортні та технологічні;
- за принципом розташування кондиціонера по відношенню до приміщення, що обслуговується: центральні та місцеві;
- за наявністю власного джерела тепла і холоду, що входить до конструкції кондиціонера: автономні та неавтономні;
- за принципом дії: прямооточні, рециркуляційні та комбіновані;
- за способом регулювання вихідних параметрів кондиціонованого повітря: з якісним (однотрубним) та кількісним (двотрубним) регулюванням;
- за ступенем забезпечення метеорологічних умов в приміщенні, що обслуговується: першого, другого і третього класу;
- за кількістю приміщень (локальних зон), що обслуговуються: однострункові та багаторічкові;
- по тиску, що розвивається вентиляторами кондиціонерів: низького, середнього та високого тиску.

1.3 Опис системи вентиляції у метрополітені

Для забезпечення основного принципу вентиляції споруд метрополітену, що полягає у підтримці в допустимих межах параметрів та складу повітря, необхідно подавати чисте повітря до місць найбільшого скупчення пасажирів та тривалого перебування обслуговуючого персоналу з подальшим розподілом

повітря по всіх тунелях [3].

На рис. 1.1 представлено схему процесу вентиляції.

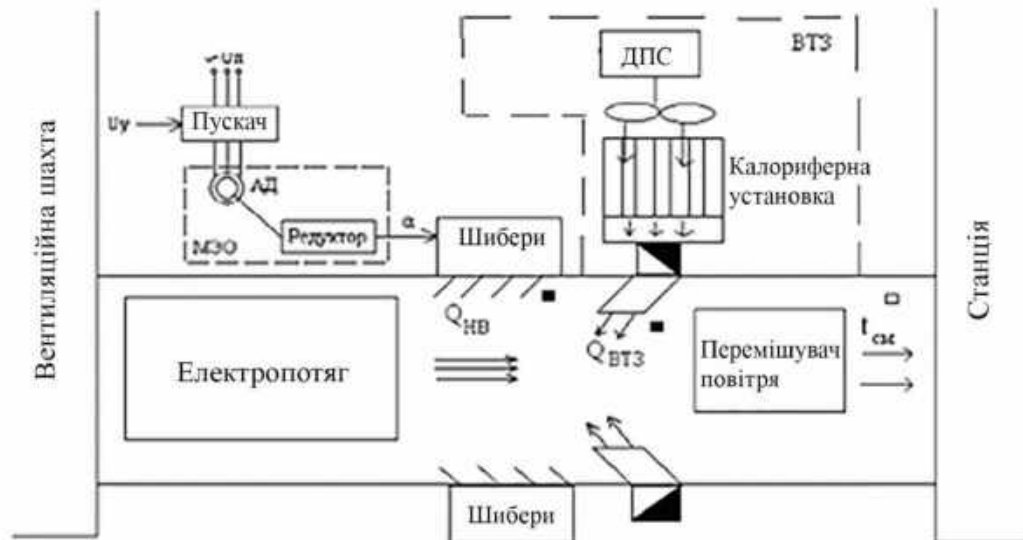


Рисунок 1.1 – Схема процесу вентиляції

На рис. 1.1 прийнято такі позначення: ■ - місця встановлення датчиків витрати повітря, □ - місце розташування датчика температури; $Q_{втз}$ - витрата повітря, що нагнітається вентилятором повітряно-теплової завіси, $Q_{нв}$ - витрата зовнішнього повітря, що надходить через шибери в тунель, $t_{см}$ - температура змішаного повітря, що надходить на платформу станції, ДПС - двигун постійного струму.

Так, наприклад, вентиляція метрополітену в зимовий період здійснюється за рахунок поршневої дії поїздів у тунелях та за рахунок природної тяги. При цьому на крайніх станціях лінії метрополітену (на тупикових станціях та станціях поблизу виходу в атмосферу) може скластися несприятлива ситуація, за якої спільна дія природної тяги та поршневої дії поїздів спричинить переохолодження пасажирських приміщень станції холодним атмосферним повітрям. Зниження загальної кількості холодного повітря, що надходить на станцію, можливе за

допомогою підвищення аеродинамічного опору на шляхах руху холодного атмосферного повітря. При підвищенні аеродинамічного опору знижується витрата повітря через ділянку тунелю незалежно від того, яким джерелом тиску (поршневою дією поїздів або природною тягою) він ініціюється. Підвищення опору можливе внаслідок установки на ділянці вентиляційна шахта - платформа так званих шиберів: конструкцій з листового металу або листів азбоцементу, що є діафрагмою, що зменшують площу живого перерізу тунелю для проходу повітря і істотно підвищують аеродинамічний опір ділянки тунелю. Шибери встановлюються в тунелях з відривом (2.5 - 3.5) м - за такої відстані опір окремого шибера максимально. Розміри внутрішнього отвору для проходу повітря обмежені габаритними розмірами поїзда для безпеки руху метропоїздів.

За допомогою рухомих шиберів можна керувати надходженням холодного зовнішнього повітря в тунель. Далі холодне повітря з метромосту поєднується з гарячим повітрям, що йде з повітряно-теплової завіси (ВТЗ). ВТЗ зменшує проникнення холодного повітря із тунелю на станцію. Температура отриманої суміші реєструється датчиком температури, розташованому у тунелі. Ця температура має становити $+10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за п.3.1 Санітарних правил 2.5.1337-03 "Санітарні правила експлуатації метрополітенів" від 30.06.2003.

Вважаючи температуру зовнішнього повітря та температуру теплоносія ВТЗ величинами постійними, необхідно керувати витратою зовнішнього повітря (за допомогою керованих шиберів) перетурю повітря з ВТЗ величинами постійними, необхідно керувати витратою зовнішнього повітря та) та витратою повітря ВТЗ (змінюючи продуктивність вентилятора повітряно-теплової завіси) підтримки температури на платформі станції на необхідному рівні.

1.4 Вимоги до вентиляційної установки

При оптимізації системи тунельної вентиляції слід враховувати нормовані

параметри мікроклімату та складу повітря у спорудах:

- нормовані метеорологічні умови міста;
- гідрогеологічні умови залягання лінії;
- наявність термальних та сірчистих вод у навколишніх ґрунтах;
- виділення радону, метану та інших газів з навколишніх ґрунтів;
- переважання кількості припливного повітря над видаленим на 15 - 20%;
- забезпечення не менше ніж триразового повітрообміну за годину за внутрішнім обсягом пасажирських та інших приміщень, що обслуговуються тунельною вентиляцією;
- подачу зовнішнього повітря щонайменше 30 м³/год, а години пік - щонайменше 50 м³/год на одного пасажира;
- річний тепловий баланс, що забезпечує допустимі параметри температури та відносної вологості повітря при мінімальному зростанні температури навколишніх ґрунтів;
- димовидалення під час пожежі на станції або в тунелі;
- вплив негативних факторів, що виникають за прогнозованих надзвичайних ситуацій техногенного та іншого характеру;
- застосування пристроїв для зниження шуму та вібрації, що виникають при роботі вентиляційних агрегатів;
- застосування заходів щодо зниження впливу ефекту «дуття», що виникає під час руху поїздів.

1.5 Розробка технічного завдання

1. Замовник: харківський метрополітен

Організація-виконавець: відділ із забезпечення вентиляції метрополітену

Вимоги до технічної продукції

1. Структура та склад обладнання визначені цим технічним завданням та

можуть уточнюватися в процесі виконання роботи.

.2. Вимоги до елементів автоматизації

.2.1. Шафа автоматичного керування вентиляторами.

.2.2. Облік оборотності режиму (зимовий, літній, аварійний під час пожежі).

.3. Вимоги до автоматизації системи керування

.3.1 Переважна кількість припливного повітря над видаленим на 15 - 20%

.3.2 Подача зовнішнього повітря не менше 30 м³/год, а в години пік - не менше 50 м³/год на одного пасажера

.3.3 Димовидалення при пожежі на станції або в тунелі

.3.4. Річний тепловий баланс, що забезпечує допустимі параметри температури та відносної вологості повітря за мінімального зростання температури навколишніх ґрунтів.

. Структура вентиляційного пристрою

.1.1 Шибєрний апарат

.1.2. Нерухомий спрямовуючий апарат - ребра

.1.3. Комплектний перетворювач частоти.

.1.4. Електродвигун приводу.

. Структура системи управління

.1. Керуючий пристрій - шафа автоматичного керування

.1.1. Датчик для контролю швидкості та інтенсивності циркуляції потоку повітря

.1.2 Датчик для оцінки рівня концентрації шкідливих речовин у повітряному середовищі

.2 Панель оператора

.3. Функції комп'ютерної системи керування

Розділ 2. Аналіз особливостей перебігу перехідних газодинамічних процесів у повітряних потоках вентиляційних шахт

Головним завданням тунельної вентиляції є стійкий розподіл повітря по тунельних виробках у кількостях, достатніх для підтримки санітарно-гігієнічних умов праці та пасажирів. Це досягається розстановкою у виробках різного роду регулюючих вентиляційних споруд та підтримкою за їх допомогою певних значень депресії, витрат повітря, концентрації вуглекислого газу та температури відповідно до режимів роботи вентиляторів провітрювання.

Однак через зміну барометричного тиску у виробках, циклічності роботи, зупинки вентиляторів місцевого провітрювання, відкриття-зачинення дверей у вентиляційних спорудах розподіл параметрів повітряного потоку порушується і у вентиляційній мережі виникає перехідний процес з одного стаціонарного газодинамічного стану в інший. При цьому спостерігається різна інерційність перехідних процесів за окремими параметрами зміни кількості повітря. Для вентиляційних шахт тривалість перехідних процесів може змінюватися від кількох хвилин до кількох діб. Більш короточасні перехідні процеси у виробках, більш тривалі у вироблених просторах [4].

Як показали численні шахтні спостереження, найчастіше зустрічаються два типи перехідних процесів: монотонні та екстремальні. Екстремальним називається процес, за якого зміна умов пов'язана з переходом концентрації газу (Газовиділення) через точку екстремуму (максимуму або мінімуму) Перехідний процес може бути комбінованим, тобто монотонним по концентрації газу і екстремальним по газовиділенню або навпаки. різким (ступінчастим) або плавним. ступінь зміни концентрації та газовиділення;

Дуже часто причиною різкого підвищення концентрації вуглекислого газу в тунельній виробці є наявність в ній куполів, шарових скупчень або контакт

вироблення зі слабким або зовсім не омивається повітрям виробленим простором. Чим більший обсяг цих резервуарів, тим вищий сплеск концентрації вуглекислого газу, тим небезпечніше виникнення екстремального перехідного процесу.

Концентрація вуглекислого газу на вентиляційних шахтах у точках екстремуму перехідних процесів може відрізнятися від початкового рівня в 4-5 разів. Причому рівень збільшення концентрації газу і газовиділення зазвичай вище, ніж рівень їх зменшення. Протилежна ситуація - зменшення концентрації вуглекислого газу вентиляційних струменях спостерігається при зменшенні виділення вуглекислого газу. Тривалість цього перехідного процесу та величини нижньої межі до якого зменшується концентрація вуглекислого газу мають важливе значення при гасінні підземних пожеж. Знання цих величин дає можливість не лише зменшити подачу повітря на аварійну ділянку, а й проводити необхідний перерозподіл повітря, що подається в тунельні виробки [5].

Після запуску вентиляції припливу завжди відновлюється нормальний (початковий) режим провітрювання шахти і проводиться необхідний перерозподіл витрат повітря. Якщо це пов'язано зі збільшенням дебіту повітря в тунельних виробках ділянки, то відбувається, як правило, тимчасове різке збільшення надходження вуглекислого газу з виробленого простору і, як наслідок, тимчасове збільшення концентрації вуглекислого газу вихідної струмені повітря.

Дуже небезпечні перехідні процеси, що виникають у разі порушення провітрювання тунельних виробок під час пожежі. Так при пожежах у тунелі генеруються потужні внутрішні джерела тяги здатні подолати натиск вентиляторів провітрювання та змінити напрямок потоку у виробках аварійної ділянки. При цьому параметри вентиляційного потоку можуть суттєво

змінюватись у бік їх зменшення або збільшення. При виникненні складних перехідних процесів, що ще більшою мірою дезорганізує провітрювання шахти, сприяє виникненню ситуацій та ускладнює ведення аварійно-рятувальних робіт [6].

Слід зазначити, що на шахтах зміна будь-якого вентиляційного режиму завжди супроводжується перехідним процесом та зміною вмісту вуглекислого газу у вентиляційних струменях. А це може спричинити порушення стійкості провітрювання.

Таким чином, перехідні процеси, що виникають при зміні розподілу повітря в тунельних виробках, негативно впливають на загальний стан безпеки вентиляційних шахт.

Серед методів, здатних надати необхідну інформацію про закономірності протікання нестационарних газодинамічних процесів у вентиляційній мережі шахти, найбільш перспективним є метод математичного моделювання. Розробка адекватної математичної моделі та ефективної методики розрахунку, що надають широкі можливості для проведення параметричних досліджень поведінки вентиляційної мережі на перехідних режимах, незважаючи на безперечну актуальність досі не здійснено в повному обсязі.

Тому необхідно подальше вивчення перехідних процесів та вдосконалення існуючих методів розрахунку нестационарних режимів провітрювання. Для практичних цілей результат цих досліджень важливий і як інструмент, що забезпечує прогноз зміни газодинамічної ситуації в тунельних виробках при аваріях, і як можливість впливу на характер перебігу перехідного процесу засобами вентиляції.

2.1 Методи розрахунку нестационарних режимів вентиляції

Вирішення задач тунельної вентиляції вже давно стало неможливим без

використання спеціалізованого програмного забезпечення. З впровадженням у промисловість обчислювальної техніки розроблено цілу низку програмних комплексів та автоматизованих робочих місць, які дозволяють проводити розрахунок повітророзподілу в тунельних виробках на основі вирішення мережного вентиляційного завдання. Як правило, використовується метод Андріяшева-Кроса [7], що базується на теорії графів. Для покращення збіжності необхідне попереднє сортування масиву гілок у порядку зростання їх аеродинамічних опорів, побудова дерева мінімальних опорів та визначення лінійно незалежних контурів. Цей метод забезпечує хорошу збіжність за умови послідовного зменшення нев'язки депресії в контурах. Однак у випадку, коли джерела тяги задані напірною характеристикою довільного вигляду, коли їх багато і в мережі присутні аеродинамічні опори великих розмірів, збіжність методу стає незадовільною, нев'язка зменшується повільно, іноді починає осцилювати близько певного значення, не зменшуючись [8]. Це призводить до того, що розрахунок складних вентиляційних мереж методом Андріяшева-Кроса стає важкоздійсненним, якщо взагалі можливим [7]. Тому поруч із відомими методами контурного рішення мережевої вентиляційної завдання практичне застосування знайшли такі методи: Ньютона, контурних витрат і вузлових депресій [8].

Однак, як зазначено в роботі [8], всі існуючі програмні комплекси, які застосовуються для оцінки стійкості вентиляційних струменів при появі аварійних джерел тяги, як і способи стабілізації повітряних потоків недосконалі, тому обрані аварійні вентиляційні режими не завжди ефективні. Справді джерелом тяги, здатним перекинути вентиляційний струмінь при пожежі, є теплова депресія. Розрахунок ж стійкості провітрювання на ЕОМ нині на вентиляційних шахтах проводиться у разі програмі, описує стаціонарні процеси з допомогою методу опосередкованих характеристик. Розрахунок проводиться наступним

чином. Спочатку розраховується природний повітророзподіл за виробленням мережі. Потім в аварійну гілку вводиться теплова депресія, величина якої визначається за розрахунковою максимальною температурою в осередку пожежі. Розрахунок розподілу повітря повторюється і виявляються гілки, в яких перекидається струмінь. Аналогічно визначають ефективність заходів щодо підвищення стійкості провітрювання. В результаті отримуємо інформацію про стан вентиляційної мережі наприкінці перехідного процесу у припущенні, що температура у вогнищі пожежі не змінюється, а аварійна ситуація стабілізувалася. А сам перехідний процес, який у наведеному прикладі може тривати кілька годин і більше, не розраховується. Багаторазове застосування алгоритму стаціонарного розподілу повітря [9] для опису перехідного процесу (аналогія методу зміни стаціонарних станів) є некоректним і не вирішує проблему.

Крім того, підходи, що застосовуються для опису провітрювання шахт, часто невірно описують дійсне протікання газодинамічних процесів у складних мережах тунельних виробок. Дійсно, основу цих підходів покладено закон збереження об'ємних витрат повітря, тому густина і температура потоку вважаються постійними, а гідростатичний тиск не враховується. Не враховується зміна параметрів потоку за довжиною виробок. В результаті методи розрахунку вентиляції, що широко застосовуються в даний час, не описують цілий ряд якісних і кількісних змін в мережі, пов'язаних з тепло і масообмінними процесами. У той же час ці процеси відрізняються тимчасовою та просторовою різномасштабністю, загальною детермінованістю на тлі стохастичної мінливості та цілим рядом інших специфічних особливостей. Тому більш точного описи перехідних процесів необхідний розрахунок зміни у часі температури і газового складу тунельної атмосфери.

Необхідність розробки та впровадження в практику нових методів

розрахунку перехідних процесів диктується оснащенням вентиляційних шахт метрополітену, що проводиться в даний час, сучасним високопродуктивним обладнанням.

У зв'язку з цим підкреслюється виникнення актуальної науково-технічної проблеми прогнозу передаварійної ситуації за сукупного впливу всіх перерахованих вище процесів. Причому одним із головних методів прогнозу передаварійних ситуацій авторами пропонується математичне моделювання всіх процесів, що взаємодіють, як на стадії розробки проектної документації, так і при експлуатації шахти.

Висунуті в [10] положення добре узгоджуються з результатами аналізу стану промислової безпеки, що склалася в останні роки на вентиляційних шахтах метрополітену, підприємства метрополітену.

Єдиною альтернативою існуючим стаціонарним методам розрахунку вентиляції шахти є газодинамічний метод розрахунку провітрювання шахт, що ґрунтується на вирішенні нестационарних рівнянь газової динаміки. Запропонований та реалізований у роботах [11, 12, 13-16], він дозволяє розраховувати перехідні газодинамічні процеси та аналізувати динамічну ситуацію в різних точках вентиляційної мережі шахти. Порівняно із застосовуваними на шахтах способами вирішення вентиляційних завдань газодинамічний підхід є принципово новим.

Великий внесок у вивчення перехідних аерогазодинамічних процесів у шахтній вентиляційній мережі, пояснення їхньої фізичної, сутності, розробку математичних моделей цих процесів з їх подальшою чисельною реалізацією на першому етапі досліджень у 60-70-ті роки XX століття, внесли роботи Ф.А. Абрамова [17, 18], В.А. Бойка [19]; Л.П. Фельдмана, А.І. Слепцова, В.А. Святого [20], І.Є. Болбат, В.І. Лебедева [21] та ін. Ці дослідження було розгорнуто у зв'язку з розробкою та впровадженням на вентиляційних шахтах автоматизованих

систем управління вентиляцією. Саме в цей час в інститутах гірничого профілю стали з'являтися перші цифрові електронно-обчислювальні машини, на яких вже можна було розраховувати перехідні процеси, нехай і спрощені постановки.

Поява персональних комп'ютерів у 80-ті роки ХХ століття дозволило Н.Н. Петрову в Інституті гірничої справи СО РАН (м. Новосибірськ) перейти до складніших постановок та чисельних розрахунків перехідних процесів у вентиляції. Так їм за основу було взято систему нестационарних газодинамічних рівнянь із монографії І.А. Чарного [22], що описує рух реальної рідини в трубах і спрощена у разі руху газу з малими дозвуковими швидкостями. Прийнята математична модель не враховувала конвективні члени та гідростатичний тиск газу через малу зміну щільності. Не враховувалося і зміна енергії газу під час його руху вздовж виробітку. Для опису теплообміну повітряного потоку в горизонтальному циліндричному виробленні взята система рівнянь. Масоперенос описувався рівнянням поздовжньої турбулентної дифузії. На графі вентиляційної мережі ставилися додаткові умови примикання та балансні співвідношення потоків тепла, маси тощо. у вузлах графа. Система рівнянь апроксимувалась неявною різницевою схемою і вирішувалася методом параметричної прогонки. Розрахунки проводилися на спеціальному аналого-цифровому обчислювальному комплексі ІГД СО РАН [13]. Запропонований підхід показав свою працездатність і активно використовувався щодо перехідних процесів у тунелях Новосибірського метрополітену.

Величезні обчислювальні можливості сучасних персональних комп'ютерів дозволили розпочати розробку математичних моделей вже максимально наближених до реального об'єкта, що враховують розподілений характер параметрів мережі, інерційні та пружні властивості повітря. У кандидатській дисертації В.В. Ващилова [23] розроблено математичну модель з урахуванням можливості моделювання нестационарної аерогазодинаміки всіх виробок

сучасної шахти. Завдання провітрювання було зведено до чисельного вирішення систем нестационарних газодинамічних рівнянь кожної гілки пов'язаного орієнтованого графа і стикуванням отриманих рішень у його вузлах. Однак, на відміну від попередньої моделі, враховувалися конвективні члени, гідростатичний тиск, тертя газу об стінки та зміна його енергії під час руху вздовж вироблення. Представлена нестационарна газодинамічна модель та методика розрахунку дозволили провести чисельне моделювання двох перехідних процесів та отримати низку цікавих результатів. Дослідження проводилося на прикладі максимально спрощеної моделі шахти, щоб вивчити перебіг перехідного процесу в наскрізному виробленні в «чистому» вигляді, виключивши вплив інших виробок розгалуженої вентиляційної мережі шахти.

Однак набагато важливіше досліджувати перебіг нестационарних процесів у межах групи дільничних виробок, орієнтованих у просторі під різними кутами у вертикальній площині. Це дозволить врахувати додатковий вплив на перехідний процес сил плавучості за зміни щільності вентиляційного потоку в умовах пожежі або підвищеного виділення вуглекислого газу. Практично не вивчені нестационарні процеси під час провітрювання підготовчих виробок.

2.2 Провітрювання вентиляційних шахт в аварійних умовах

Більшість аварій супроводжується виведенням з ладу окремих вентиляційних споруд, що регулюють розподіл повітря по тунельних виробках. А це завжди призводить до зміни початкового режиму провітрювання шахти, роблячи його нестійким та небезпечним через можливе накопичення вуглекислого газу у виробках, у яких скоротилося надходження повітря. При пожежах у неприпустимих кількостях з'являються отруйні (СО та інших.) чи непридатні для дихання гази (CH_4 , CO_2). Тому для порятунку людей та швидкого виведення їх на поверхню необхідно застосовувати спеціальні режими

провітрювання аварійної ділянки або всієї шахти загалом. На цьому етапі вентиляційний режим повинен забезпечувати безпеку рятувальних робіт і мати вже іншу мету локалізацію вогнища пожежі, боротьбу з тепловою депресією тощо.

Класифікація аварійних режимів провітрювання. Усі аварійні режими провітрювання можна розділити на дві категорії:

Вентиляційні режими, що забезпечують безпечний вихід людей з аварійної ділянки або всієї шахти на поверхню та спрямовані на запобігання або зменшення поширення продуктів горіння на інші виробки;

Вентиляційні режими, що забезпечують виконання першочергових заходів щодо ліквідації аварії;

Вентиляційні режими першої категорії передбачаються заздалегідь та описані у плані ліквідації аварій. У виняткових випадках, не передбачених планом ліквідації аварії, вибір аварійного режиму першої категорії доводиться проводити відповідальному керівнику ліквідації аварії у стислі терміни. Як правило, це збереження нормального режиму вентиляції провітрювання або реверсування вентиляційних струменів.

Вентиляційні режими другої категорії передбачаються оперативними планами входу до ведення рятувальних робіт. Вони відрізняються великою різноманітністю та розробляються виходячи з конкретної обстановки з метою недопущення розповсюдження пожежі на сусідні ділянки виробок, сприяння ефективному застосуванню засобів пожежогасіння, швидкій та безпечній ліквідації аварії. До цих режимів належать [24]:

- збереження нормального вентиляційного режиму провітрювання;
- зміна витрати повітря за окремими виробками рахунок його перерозподілу;
- реверсування вентиляційних струменів шахтою або на окремій ділянці;

- ізоляція аварійної ділянки;
- перехід від реверсивного режиму до нормального;
- закорочування вентиляційних струменів;
- нульовий режим провітрювання (при зупинці вентилятора).

Великий інтерес для дослідження становлять два аварійні режими провітрювання, застосуванню яких передують найскладніші і найменш вивчені перехідні процеси. Це вентиляційний режим при пожежі в тунельній виробці та реверсивний режим провітрювання.

Вентиляційний режим при пожежі в тунельному виробленні. На відміну від природної тяги теплова депресія при пожежі в похилому або вертикальному виробленні завжди має локальний характер. При пожежі в горизонтальному виробленні теплова депресія може проявити себе, якщо нагріті пожежні гази потрапляють у похилий або вертикальний виробіток. У вугільній промисловості використовують методи оцінки впливу пожежі на режим провітрювання. Розраховується величина критичної депресії, при перевищенні якої відбувається перекидання вентиляційних струменів. Однак ці оцінки поширюються лише на вироблення, в яких діє теплова депресія. Використання їх у програмному комплексі «Руднична аерологія» дозволяє розрахувати режим провітрювання, що встановлюється в мережі в результаті джерела теплової депресії, що стаціонарно діє. Однак у більшості випадків необхідно мати більш детальну картину перебігу перехідного процесу для розуміння кінцевого стану режиму провітрювання, яке буває важко зрозумілим з позицій стаціонарного підходу, що використовується в даний час. Переваги нестаціонарного підходу при моделюванні пожежі в мережі гірничих виробок продемонстровано у роботах [25] шляхом порівняння результатів розрахунків, отриманих за допомогою програмних комплексів «Руднична аерологія» [26] та «Нестаціонарна вентиляція». Було показано, що завдання миттєвого розвитку вогнища пожежі,

як це здійснюється в [25], не відображає просторово-часову зміну перебігу повітря в мережі виробок. Крім зміни напрямку руху потоку в окремих виробках, можливе утворення рециркуляційних контурів із суттєвим збільшенням у них витрати повітря. Розрахунки показали, що при заданні поступового розвитку вогнища пожежі зміна розподілу повітря в прилеглих виробках визначається його розмірами. Причому швидкість та напрямок розвитку вогнища пожежі залежить від напрямку перебігу повітря у зоні пожежі, тобто. необхідно враховувати просторово-часову динаміку його розвитку. Найбільш точно такі процеси описуються нестационарними фізико-математичними моделями з урахуванням рівнянь газової динаміки [16].

Реверсивний режим провітрювання. Одним із найбільш складних і відповідальних вентиляційних маневрів, що кардинально змінює режим провітрювання тунельних виробок при виникненні в них пожежі, є загальношахтне реверсування, при якому проводиться зміна напрямку руху вентиляційних струменів за допомогою вентиляторних установок [5]. Відповідно до регламенту на цю процедуру має відводитися 10 хв, протягом яких у тунельних виробках відбувається не лише зміна витрати повітря, температури, газового складу та барометричного тиску, а й напрямки його руху. Як було вперше зазначено у роботах [27,28], при реверсії на 10-20% збільшується аеродинамічний опір виробок. Відзначено також, що великий вплив на процес реверсування впливає на природну тягу, величина якої може досягати 30 % від депресії вентиляторів. Висловлювалася рекомендація враховувати підйомну силу, що створюється різницею питомої ваги повітря та вуглекислого газу при переході до реверсивного режиму провітрювання. Перехідний процес, що виникає при реверсуванні, завжди супроводжується різким збільшенням вмісту вуглекислого газу в шахтній атмосфері.

Найбільш повний систематизований аналіз експериментальних

досліджень реверсування вентиляційних струменів та зворотного переходу від реверсивного режиму провітрювання до нормального для вентиляційних шахт Донбасу було проведено у ВНДІГД (м. Донецьк) С.М. Осиповим. Виконані ним аналітичні розробки довели до номограм, які дозволяли швидко проводити необхідні газодинамічні розрахунки навіть у ході ліквідації аварій. Так, максимальну концентрацію вуглекислого газу в реверсивному вентиляційному струмені при перехідному режимі провітрювання пропонується обчислювати за таким співвідношенням:

$$c_{\max} = c_n \left(1 + \frac{1-C}{\frac{Q_p}{Q_n}} \right)^{30},$$

де c_n - концентрація вуглекислого газу у вихідному струмені ділянки перед реверсуванням, %; $c_{\max}$ - максимальна концентрація вуглекислого газу в реверсивному вентиляційному струмені, %; Q_p - витрата повітря у вихідному струмені ділянки в реверсивному режимі, м³ / с; Q_n - витрата повітря перед реверсуванням, м³ / с; C - емпіричний коефіцієнт.

Незважаючи на простоту отриманих у співвідношеннях результатів, дослідження С.М. Осипова не втратили актуальності й у наші дні. Підтвердженням цьому можуть бути роботи [29,30], в яких було досліджено в нестационарній постановці зміна газодинамічних параметрів вентиляційного потоку при його реверсуванні в мережі простої конфігурації у двох вертикальних стовбурах, збитих горизонтальним виробленням з розподіленим джерелом виділення вуглекислого газу. Розрахунок перехідного режиму починався у момент вимкнення вентилятора. У наступні 60 секунд відбувалася його плавна зупинка, а потім 490 секунд виробітку знаходилися за відсутності джерела тяги. Далі вентилятор включався в реверсивному режимі і протягом 50 секунд виводився на максимальну продуктивність (90% продуктивності в нормальному режимі). Розрахунок показав, що при відключенні вентилятора у виробленні відбувається плавне збільшення концентрації вуглекислого газу і повільний винос його в попередньому напрямку зумовлений присутністю невеликої природної тяги, викликаній присутністю вуглекислого газу у вертикальному стовбурі. Протягом часу, коли вентилятор був зупинений і вироблення не провітрювалися, спостерігалася формування області з високим вмістом

вуглекислого газу у виробленні і прилеглої до неї області конвективного винесення вуглекислого газу з невисокою концентрацією. При включенні вентилятора в реверсивному режимі відбувається досить швидко винесення повітряної суміші з області з концентрацією вуглекислого газу. Оскільки ця суміш другий раз проходить по виробленню з інтенсивним виділенням вуглекислого газу, то концентрація вуглекислого газу в струмені, що виходить з цієї вироблення, може в 2-3 рази перевищувати початкову.

Слід зазначити, деякі закономірності перебігу, змодельованого в [29,30] перехідного процесу збіглися з результатами, представленими у роботі [5]. До того ж газодинамічний підхід дав багато нової інформації. Показавши, що перехід до аварійних режимів необхідно розраховувати у нестационарній постановці з обов'язковим врахуванням тепломасообмінних процесів та просторової топології всієї мережі тунельних виробок.

Аварійні режими провітрювання виїмкової ділянки. У роботі [5] показано, що при переході з нормального режиму провітрювання на аварійний та наступних вентиляційних маневрах вплив на інтенсивність виділення вуглекислого газу з виробленого простору надають наступні фактори:

- різка зміна барометричного тиску за невеликий проміжок часу;
- зміна витрати повітря;
- зміна напрямку руху вентиляційного струменя (при реверсуванні);
- депресія природної тяги, що формується за рахунок різниці питомих ваг газоповітряних сумішей у тунелі та виробленому просторі (відмінності у вмісті вуглекислого газу, температури та перепаду геодезичних висот відкатного та вентиляційного горизонтів).

Ці чинники, зазвичай, впливають одночасно. Однак за певних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов можливий переважний вплив одного або декількох факторів над іншими. Тому будь-які зміни вентиляційного режиму

провітрювання дільниці виїмки супроводжуються складними перехідними процесами, аналіз яких досі проводився на рівні аналітичних оцінок або епізодичних шахтних спостережень.

Слід зазначити особливу актуальність вивчення різних вентиляційних режимів з урахуванням роботи вентиляційних систем, тобто. в умовах так званої комбінованої схеми провітрювання виробок виїмкового дільницях штучно формованими витоками повітря через вироблений простір [31,32]. Така схема провітрювання, що позиціонується як основний спосіб перерозподілу потоків вуглекислого газу, часто застосовується з порушенням вимог «Посібника з проектування вентиляції шахт» [33]. Тому дуже перспективним видається з погляду, моделювання роботи вентиляційної установки газодинамічними методами в нестационарній постановці.

Розгазування тупикових виробок на вентиляційних шахтах є одним із важливих та першочергових заходів при веденні рятувальних робіт у тупикових виробках з порушенням провітрювання (зупинка вентилятора, вихід з ладу вентиляційного обладнання та ін.). Здійснення цього заходу дозволяє знизити температуру та задимленість у виробленні.

Питанням загазування тупикових виробок як при працюючому вентиляторі місцевого провітрювання, так і при зупиненому присвячено достатню кількість досліджень [5,34]. У ряді робіт [5] розглянуто особливий вид конвективних потоків, які виникають у глухих виробках у разі зупинки вентилятора місцевого провітрювання.

Перші роботи з вивчення розгазування тупикових виробок, розпочаті в ВостНДІ, КузНДУІ та КНДУІ в 1968-69 рр., завершилися створенням апарату «КАМА», що здійснює автоматичне розгазування шляхом регулювання продуктивності вентилятора місцевого провітрювання. Було встановлено, що «хмара» повітряної суміші, що виходить із загазованого тупикового вироблення,

має випадковий градієнт концентрації вуглекислого газу, як поздовжніх, так і поперечних перерізах. Чисельне моделювання динаміки процесу розгазування тупикової виробітку з використанням звичайних диференціальних рівнянь методом Ейлера було проведено в роботі [35]. Однак усі дослідження процесу розгазування тупикових виробок належали до нормальних технологічних режимів роботи шахти, коли відбуваються випадкові загазування виробок до концентрацій вуглекислого газу понад 1%. Питання ж розгазування при тривалих зупинках вентиляторів не вивчалось. Тому цікавить чисельне моделювання розгазування тупикової вироблення в нестационарній постановці.

Розділ 3. Математичне моделювання нестационарних процесів вентиляції тунельних виробок

Вентиляція в тунельних виробках застосовується для очищення повітряного середовища з метою створення умов для пасажирів та нормальної роботи людей, а також для видалення скупчень вуглекислого газу. Методи проектування вентиляційних шахт, що застосовуються нині, враховують велику кількість факторів, що впливають на склад та чистоту атмосфери шахти. Особлива увага звертається на аеродинамічні зв'язки різних ділянок тунельних виробок. З урахуванням вимірів дисперсії та концентрації вуглекислого газу сучасні методи проектування дозволяють створювати схеми та режими вентиляції, що забезпечують підтримку в тунельних виробках складу атмосфери, регламентованого нормативними документами [13].

Разом з тим в умовах нестационарних процесів, що виникають при пожежах, при змінах режимів вентиляції і т.д. при нестационарній аеродинамічній обстановці стають особливо важливими. нестационарних математичних моделей вентиляції, що можуть прогнозувати розвиток у часі нестационарних процесів та забезпечити тим самим можливість керування цими процесами.

3.1 Вимоги до математичної моделі нестационарної аеродинаміки в тунельних виробках

Питання математичного моделювання вентиляції шахт вирішуються в гірничій науці з урахуванням багатьох факторів, що впливають на опір руху повітря та виділення вуглекислого газу. У постановці нестационарного завдання ми не приділятимемо їх обговоренню значної уваги. Так як ці фактори включаються до математичної моделі, нестационарної газової динаміки так само як і до стаціонарного завдання. Мета цього розділу сформулювати вимоги до

математичної моделі нестационарної вентиляції шахт та відповідно до них зробити висновки про роль та способи обліку зовнішніх процесів, що впливають на нестационарний перебіг повітря та вуглекислого газу в тунельних виробках. При вентиляції мережі тунельних виробок можна виділити дві характерні швидкості поширення збурень різних типів:

Швидкість вентиляційного потоку у виробках становить 1-4 м/с. різних опорів значно більше. Така оцінка може бути отримана з чисельного вирішення аеродинамічного завдання. перебігу атмосфери в мережі виробок, де в якості початкової умови вносити збурення.

Збурення складу тунельної атмосфери переносяться з потоком зі швидкістю провітрювання, що становить шахтах 1-4 м/с. Склад тунельної атмосфери може змінюватись за рахунок зміни вмісту газових домішок, запиленості, температури. Такі збурення виносяться із мережі виробок шахти протягом багатьох годин. Періодична дія таких збурень призведе до того, що вони в мережі виробок існуватимуть практично завжди.

Математична модель нестационарної аеродинаміки вентиляційної шахти повинна використовуватися для швидкого прогнозування аеродинамічної картини в мережі виробок і для оперативного управління аеродинамікою провітрювання з використанням штатних пристроїв управління вентиляцією. Модель має давати адекватну інформацію про поширення шкідливих та небезпечних домішок атмосфери. Ця інформація повинна бути отримана з чисельного рішення математичної моделі швидко, щоб був час для прийняття управлінських рішень.

Тому формульована математична модель ґрунтується на припущеннях про одновимірний рух газу в прямолінійних виробках, повному і миттєвому перемішуванні потоків у вузлах сполучення прямолінійних виробок, ефекти турбулентної в'язкості та теплопровідності враховуються в рівняннях у правих

частинах з використанням інтегральних коефіцієнтів. У математичній моделі також необхідно враховувати ефекти природної конвекції неізотермічного газу при його русі в похилих виробках. тунельної атмосфери в мережі виробок необхідно враховувати в математичній моделі теплообмін тунельної атмосфери зі стінками виробок, а також зміна температури стінок при теплообміні. природно конвективному руху, який також необхідно враховувати у математичній моделі.

У зв'язку з вищевикладеним сформулюємо математичну модель нестационарних аеродинамічних процесів з урахуванням обумовлених фізичних явищ.

3.2 Диференціальні рівняння нестационарної газової динаміки у мережі виробок

Через необхідність забезпечення швидких розрахунків для моделювання аеродинаміки тунельної атмосфери в прямолінійних ділянках тунельних виробок вентиляційної шахти будемо застосовувати найпростіші квазіодномірні рівняння газової динаміки. Так як зі стінок тунельних виробок у вироблення може надходити вуглекислий газ, необхідно використовувати квазіодномірні рівняння, записані з урахуванням потоку маси і енергії зі стінок каналу .

Сформулюємо основні припущення, що закладаються у математичну модель.

Рух газу в мережі виробок моделюватимемо нестационарними рівняннями газової динаміки.

Мережа виробок шахти є системою прямолінійних каналів (гілок), що мають перетину, розгалуження, повороти, виходи на поверхню (сполучення або вузли).

Рух повітря у прямолінійних виробках описується рівняннями газової

динаміки у квазіоднорічному наближенні.

При русі газу в похилих виробках враховується вплив сили тяжіння.

Параметри вуглекислого газу в об'ємах сполучення визначаються із законів збереження маси та енергії.

Прихід вуглекислого газу повітряний потік, продуктів згоряння під час пожежі у виробленні моделюється правими частинами рівняння газовой динаміки.

Теплообмін між газовою фазою та стінками виробок описується законом Ньютона для теплообміну та враховується в рівнянні для повної енергії газу правими частинами.

Зміна температури стінок виробок визначається рішенням рівняння перенесення тепла (теплопровідності) в стінці. Записана з урахуванням зроблених припущень система рівнянь має вигляд:

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}, (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u^2}{\partial x} + s \frac{\partial p}{\partial x} = \Pi \tau_w - s \rho g \sin \gamma, (3.2)$$

$$\frac{\partial \rho s \left(e + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \rho s \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial x} = \Pi \dot{m} H - \Pi \alpha (T - T_w) - s \rho u g \sin \gamma, (3.3)$$

де (3.1) - рівняння нерозривності, (3.2) - рівняння руху, (3.3) - рівняння енергії. ρ – щільність газу; u – швидкість; p – тиск; e – внутрішня енергія одиниці маси газу; T – температура газу; T_w – температура стінки; $\dot{m}$ – масовий приплив газу з одиниці поверхні стінки; H – ентальпія одиниці маси припливу; $s(x)$ – перетин виробітку; Π – її периметр; g – прискорення сили тяжіння; γ – кут нахилу виробітку до горизонту; τ_w – напруження тертя на межі виробітку; a –

коефіцієнт тепловіддачі.

Конкретизуємо величини m і H умов гірничих виробок. У відсутності пожежі припускати, що $\dot{m} = \dot{m}_{CH_4}$, де $\dot{m}_{CH_4}$ - маса вуглекислого газу, що надходить з одиниці поверхні виробітку в одиницю часу. У разі горіння вуглекислого газу виконується закон збереження числа атомів

$$\left(2 - \frac{3M}{2}\right)O_2 + CH_4 = 2H_2O + 3MCO + (1 - 3M)CO_2 \quad (3.4)$$

де $3M$ - частка вуглецю, що згорає.

Припустимо, що вся маса газоповітряної суміші, що надходить зі стінок виробітку, миттєво згорає. Позначимо через M_{CH_4} , молекулярна вага вуглекислого газу. Тоді з одиниці площі виробітку в одиницю часу надходитиме

кількість молей вуглекислого газу, що дорівнює $\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}$.

При згорянні цього вуглекислого газу утворюється $2\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}$ молей води, $3M\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}$ молей чадного газу, $(1 - 3M)\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}$ молей двоокису вуглецю і вигорить $\left(2 - \frac{3M}{2}\right)\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}$ молей кисню. Помножуючи числа молей на молекулярні ваги відповідних речовин, знайдемо масу газів, що надходять при згорянні газоповітряної суміші:

$$\left[2M_{H_2O} + 3MM_{CO} + (1 - 3M)M_{CO_2} - \left(2 - \frac{3M}{2}\right)M_{O_2}\right]\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}. \quad (3.5)$$

Так як вода може конденсуватися на стінках вироблення, то частина води залишатиме газову фазу. Позначивши через $\dot{m}_{H_2O}$ масову швидкість конденсації води остаточно напишемо

$$\dot{W}_u = \left[2M_{H_2O} + 3M_{CO} + (1-3M)M_{CO_2} - \left(2 - \frac{3M}{2} \right) M_{O_2} \right] \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} - \dot{m}_{H_2O} \quad (3.6)$$

У разі горіння за допомогою аналогічних міркувань знайдемо для швидкості надходження у потік вираз

$$\dot{W}_c = \left[3\gamma M_{CO} + (1-3\gamma)M_{CO_2} - \left(1 - \frac{3\lambda}{2} \right) M_{O_2} \right] \frac{\dot{m}_c}{M_c}, \quad (3.7)$$

де $\dot{m}_c$ - масова швидкість вигорання вугілля, що припадає на одиницю поверхні вироблення, M_c - молекулярна вага вуглецю, 3γ - Частка вуглецю згоряючого.

$$\dot{m} = \dot{m}_m + \dot{m}_c. \quad (3.8)$$

Ентальпії згорання газоповітряної суміші H_m і H_c можуть бути знайдені із термодинамічних розрахунків. Тоді величину $\dot{m}H$ у правій частині рівняння енергії (3.3) можна записати у вигляді:

$$\dot{m}H = \dot{m}_m H_m + \dot{m}_c H_c \quad (3.9)$$

Оскільки склад газів змінний, необхідно записати також рівняння збереження його компонент. При цьому через нехтування дифузії маса кожного компонента в одиниці обсягу задовольнятиме рівняння, аналогічне (3.1). Зокрема, у відсутності пожежі для маси вуглекислого газу в одиниці обсягу суміші матимемо:

$$\frac{\partial sm_{CH_4}}{\partial t} + \frac{\partial sum_{CH_4}}{\partial x} = \Pi \dot{m}_{CH_4} \quad (3.10)$$

Поділивши це рівняння на M_{CH_4} отримаємо для числа молей вуглекислого газу N_{CH_4} в одиниці обсягу суміші рівняння:

$$\frac{\partial s N_{CH_4}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{CH_4})}{\partial x} = \Pi \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} \quad (3.11)$$

У разі пожежі для числа молей інших газів аналогічно отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s N_{H_2O}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{H_2O})}{\partial x} &= 2 \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} - \frac{\dot{m}_{H_2O}}{M_{H_2O}}, \\ \frac{\partial s N_{CO}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{CO})}{\partial x} &= 3M \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} + 3\gamma \frac{\dot{m}_c}{M_c}, \\ \frac{\partial s N_{CO_2}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{CO_2})}{\partial x} &= (1-3M) \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} + (1-3\gamma) \frac{\dot{m}_c}{M_c}, \\ \frac{\partial s N_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{O_2})}{\partial x} &= \left(2 - \frac{3M}{2}\right) \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} - \left(1 - \frac{3\gamma}{2}\right) \frac{\dot{m}_c}{M_c}, \\ \frac{\partial s N_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{O_2})}{\partial x} &= -\left(2 - \frac{3M}{2}\right) \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} - \left(1 - \frac{3\gamma}{2}\right) \frac{\dot{m}_c}{M_c}, \\ \frac{\partial s N_{N_2}}{\partial t} + \frac{\partial (su N_{N_2})}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Отримана система замикається рівнянням стану суміші ідеальних газів:

$$p = (N_{CH_4} + N_{N_2} + N_{O_2} + N_{H_2O} + N_{CO} + N_{CO_2}) RT. \quad (3.13)$$

За відсутності горіння за наявності тільки газоповітряної суміші у складі повітря рівняння (3.11) можна переписати у вигляді

$$p = (N_{CH_4} + N_{возд}) RT.$$

У випадку пожежі на щільність повітря і природну конвекцію, що виникає, більшою мірою впливає його температура. вуглекислого газу та концентрацію шкідливих домішок у вигляді чадного газу. рівнянь (3.1)-(3.3) доповнюється рівняннями для парціальних густин вуглекислого газу та шкідливих домішок:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{CH_4} s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{CH_4} su}{\partial x} &= \Pi \dot{m}_{CH_4}, \\ \frac{\partial \rho_{CO} s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{CO} su}{\partial x} &= \Pi \dot{m}_{CO}, \end{aligned}$$

та рівнянням стану газу:

$$p = \rho RT,$$

де R - постійна газова газової суміші, $R = C_p - C_v$,

$$C_p = c_{pCH_4} \frac{\rho_{CH_4}}{\rho} + c_{pCO} \frac{\rho_{CO}}{\rho} + c_{pгазо} \frac{(\rho - \rho_{CH_4} - \rho_{CO})}{\rho},$$

$$C_v = c_{vCH_4} \frac{\rho_{CH_4}}{\rho} + c_{vCO} \frac{\rho_{CO}}{\rho} + c_{vгазо} \frac{(\rho - \rho_{CH_4} - \rho_{CO})}{\rho}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі обчислюється з урахуванням вільної та вимушеної конвекції газу у виробках за формулами, що враховує нахил виробок:

Для кутів нахилу виробок менше 45° до горизонту:

$$Nu_F = 0.0214 Re^{0.8} Pr^{0.4},$$

$$Nu_N = 0.817 Ra^{0.215} \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-0.382},$$

$$Nu = (Nu_F^3 + Nu_N^3)^{1/3},$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{D_{eqv}},$$

$$Re = \frac{D_{eqv} u \rho}{\mu}, Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, Ra = \frac{g \rho^2 c_p \zeta (T_w - T_g) D_{eqv}^3}{\mu \lambda}$$

де

Для кутів нахилу виробок понад 45° до горизонту:

$$Nu_F = \frac{0.0357 Re Pr^{1/3} (1 + Pr^{-5/6})}{\ln(17 Re)},$$

$$Nu_N = 0.15 Ra^{1/3} \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/27},$$

Якщо потоки вимушеної та природної конвекції спрямовані, то

$$Nu = (Nu_F^3 + Nu_N^3)^{1/3}, \text{ якщо протиспрямовані, то}$$

$$Nu = (Nu_F^3 + Nu_N^3)^{1/3}, \quad \alpha = \frac{Nu \lambda}{D_{eqv}}$$

Позначення: Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля, Ra – число Релея,

Nu – число Нуссельта, D_{eqv} - еквівалентний діаметр вироблення, c_p - питома теплоємність при постійному тиску, ζ - коефіцієнт теплового розширення газу, λ , μ - коефіцієнти теплопровідності та в'язкості газу, α -коефіцієнт тепловіддачі.

3.3 Моделювання перенесення тепла у стінках тунельних вентиляційних шахт

Як зазначалося, теплообмін вентиляційного потоку зі стінками виробок впливає аеродинаміку руху вуглекислого газу. У нестаціонарних умовах вентиляції температура стін також змінюється в часі. Тому для коректного опису нестаціонарної аеродинаміки вентиляції тунельних виробок необхідно розраховувати зміну температури стінок виробок у часі теплообміну вентиляційного потоку зі стінками.

Поле температури в гірській породі може бути визначено з рішення нестаціонарного тривимірного рівняння теплопровідності. Однак найбільший градієнт температури формується в напрямку, перпендикулярному стінкам вироблення. на основі одновимірного рівняння теплопровідності в напрямку перпендикулярному стінці у всіх точках вздовж виробітку:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3.14)$$

З початковими та граничними умовами:

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = \alpha(T_g(x, t) - T(x, 0, t)), \quad \frac{\partial T(x, \infty, t)}{\partial y} = 0, \quad (3.15)$$

де λ -коефіцієнт температуропровідності гірських порід,

$$\chi = \frac{\lambda_n}{c_n \rho_n},$$

λ_n - коефіцієнт теплопровідності, c_n - питома теплоємність, ρ_n - щільність

гірських порід. $T_g(x, t)$ - температура газу; $T(x, 0, t)$ - температура поверхні стінок виробок визначається з рішення рівняння (3.15) з крайовими умовами (3.16). $T(x, 0, t) = T_w$ використовуються в моделі (3.1) - (3.3), (3.12) - (3.14). Тому рівняння (3.1) - (3.3), (3.12)-(3.14) та (3.15)-(3.16) вирішуються спільно.

3.4 Математична модель нестационарних процесів у перетинах вентиляційних шахт

Перетину виробок вентиляційних шахт представимо обсягом заданої величини. В обсягах перетинів відбувається перерозподіл потоків повітря мережею виробок. Вони протікають процеси змішування газових потоків з різною концентрацією домішок. При перебігу та змішуванні характер аеродинамічного перебігу обсягом тривимірний. При перетіканні газу через зони сполучення виробок відбуваються втрати повного тиску [36,37]. Для обліку цих ефектів у розрахунках стаціонарної вентиляції передбачається, що тиск в обсязі постійний, змішування потоків з різними концентраціями домішок відбувається миттєво. Ці ж припущення приймемо в нестационарній моделі та запишемо закони збереження маси та енергії для обсягу сполучення.

На рис 3.1 представлено схематичне зображення вузла з прилеглими до нього виробками. Вважається, що можлива максимальна кількість виробок, що примикають до обсягу вузла – шість.

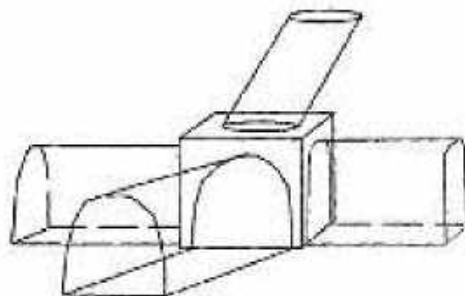


Рисунок. 3.1 Систематичне зображення вузла

Зміна маси газу в часі в об'ємі поєднання виробок V_k визначається потоками маси газу через перерізи виробок, що примикають до вузла:

$$\frac{dM_k}{dt} = \sum_i G_i, \quad (3.17)$$

де $M_k = V_k \rho_k$ - маса газу в обсязі вузла, $G_i = u_i s_i \rho_i$, - прихід ($u_i > 0$) та витрата ($u_i < 0$) маси газу в об'єм V_k , s_i - площа поперечного перерізу вироблення, що примикає до вузла.

Зміна енергії в обсязі вузла запишемо, нехтуючи тепловіддачею та виділенням енергії.

Швидкість зміни внутрішньої енергії газу $E_k = C_v T_k \rho_k$ (T_k - температура газу у вузлі, а C_v - теплоємність газової суміші при постійному обсязі) у вузлі дорівнює сумі потоків в одиницю часу ентальпій газу з виробок, що прилягають до нього. Тоді рівняння для зміни енергії набуває вигляду:

$$V_k \frac{dE_k}{dt} = \sum_i G_i H_i, \quad (3.18)$$

де $H_i = C_{pi} T_i$ - ентальпія газової суміші в виробці, що примикає до вузла і при втіканні газу у вузол або у вузлі при закінченні газу з вузла, C_p - теплоємність газової суміші при постійному тиску.

Аналогічно (3.17) запишемо рівняння для густин компонентів газової суміші:

$$\frac{dM_{CH_4k}}{dt} = \sum_i G_{CH_4i}, \quad M_{CH_4k} = V_k \rho_{CH_4k} \quad (3.19)$$

$$\frac{dM_{COk}}{dt} = \sum_i G_{COi}, \quad M_{COk} = V_k \rho_{COk} \quad (3.20)$$

Рівняння (3.17)-(3.20) дозволяють обчислити в обсязі k-того вузла

газодинамічні параметри ρ_k , ρ_{CH_4k} , ρ_{COk} , Тк. Після цього тиск P_k можна обчислити із рівняння стану ідеального газу (3.14).

$$\begin{aligned} p_k &= \rho_k RT_k, \\ R &= C_{pk} - C_{vk}, \\ C_{pk} &= c_{pCH_4} \frac{\rho_{CH_4k}}{\rho_k} + c_{pCO} \frac{\rho_{COk}}{\rho_k} c_{pгаз} \frac{(\rho - \rho_{CH_4k} - \rho_{COk})}{\rho_k}, \\ C_{vk} &= c_{vCH_4} \frac{\rho_{CH_4k}}{\rho_k} + c_{vCO} \frac{\rho_{COk}}{\rho_k} c_{vгаз} \frac{(\rho - \rho_{CH_4k} - \rho_{COk})}{\rho_k} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Представлена модель розрахунку аеродинамічних параметрів у вузлі ґрунтується на законах збереження маси та енергії. Зміна імпульсу у вузлах не розраховується. Перенесення імпульсу через сполучення визначається завданням граничних умов на межах гілок, що примикають до вузла відповідно до напрямку характеристик. Модель розрахунку параметрів газової суміші у вузлі не дозволяє обчислити втрати повного тиску у місцях сполучення виробок. Однак для обліку втрат повного тиску можна використовувати експериментальні дані [36,37], вводячи поправочні коефіцієнти величини коефіцієнтів опору виробок.

Таким чином, система рівнянь (3.1)-(3.3), (3.12)-(3.14), (3.17)-(3.21) описує нестационарний перебіг суміші газів у виробках з урахуванням тепло та масообміну потоку повітря зі стінками виробок.

3.5 Початкові та граничні умови

Для замикання системи рівнянь (3.1)-(3.3), (3.12)-(3.14), (3.17)-(3.21) математичної моделі необхідно поставити початкові та граничні умови. Граничні умови ставляться залежно від умов кордоні. Якщо межею виробітку (гілки) є стінка, то ставиться умова не протікання. Якщо межею виробітку є вихід вироблення на поверхню в атмосферу, то граничні умови ставляться в залежності від напрямку потоку вуглекислого газу. Якщо на межі вироблення встановлений

працюючий вентилятор провітрювання, то задаються швидкість та ентропія повітря, що втікає у вироблення з вентилятора або швидкість потоку. Як початкові умови задаються поля тиску, температури, швидкості та концентрації вуглекислого газу в тунельній атмосфері.

3.6 Алгоритм та метод вирішення системи рівнянь задачі тунельної аеродинаміки у мережі виробок вентиляційної шахти

Для чисельного розв'язання нестационарних рівнянь газової динаміки використовуються ефективні методи [38-40]. перетинів виробок) вирішувалися методом Ейлера Для вирішення рівняння теплопровідності (3.15) з граничними умовами (3.16) використовувалася неявна апроксимація другої похідної на нерівномірній сітці, в якій крок по простору вглиб стінки збільшувався по геометричній прогресії [4].

Порядок розрахунків був наступним. Спочатку у просторі вентиляційної ділянки задаються початкові умови завдання. На кінцях виробок, де розташовуються вентилятори, задаються граничні умови: під час роботи вентилятора як витяжки задається швидкість потоку повітря; якщо вентилятори включені в режимі нагнітання, задаються швидкість та ентропія повітря, що нагнітається. На кінцях виробок, що вільно виходять в атмосферу, задається атмосферний тиск і у разі потоку, що надходить у вироблення з атмосфери, додатково задається його ентропія. Потім вибирається крок за часом з умови стійкості [38], і обчислюються параметри у вузлах перетину виробок, а також на межах виробок. При цьому для виробок, з яких вуглекислий газ надходить обсяг вузла, використовується тільки тиск у вузлі. Для розрахунків граничних значень у тих виробках, які втікає потік з обсягу вузла, використовується тиск, ентропія і концентрація газів у вузлі. Після обчислення граничних значень потоків маси, імпульсу та енергії, а також потоків маси компонентів газової суміші проводиться

розрахунок параметрів у сполученнях виробок. Потім за схемою розпаду розриву розраховуються газодинамічні параметри в кожному виробленні та концентрації компонентів газової суміші. Після цього крок за часом повторюється. В результаті циклічного повторення цих обчислювальних процедур отримуємо зміну параметрів тунельної атмосфери у всіх точках виробок та їх поєднаннях у часі. При цьому через кілька кроків за часом газодинамічного розрахунку параметрів тунельної атмосфери у виробках проводиться розрахунок розподілу температури углиб стінок виробок.

При розрахунках течії вуглекисло-повітряної суміші у виробках чисельними методами доводиться використовувати досить докладну сітку різницеву. Наприклад, для розрахунку процесів вентиляції в мережі виробок вентиляційних шахт, сумарна довжина яких становить, наприклад 50 км, необхідно мати близько 25000 осередків. Оцінимо характерний час винесення вуглекислого газу у вентиляційному струмені в атмосферу, вважаючи швидкість вентиляційного потоку 1 м/с, довжину шляху вуглекислого газу ~ 5 км. Воно становитиме 5000 с. Для кроку простором $h \sim 2$ м із умови стійкості для явної схеми розв'язання газодинамічного завдання знайдемо крок за часом $\Delta t \sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Поділивши характерний час процесу 5000 с на крок Δt знайдемо число кроків за часом розв'язання задачі, необхідне для отримання рішення задачі, що встановилося 10^6 . Звідси випливає, що при розв'язанні задачі встановленням часу необхідно в просторі часу розрахувати $\sim 10^6 \cdot 2.5 \cdot 10^4 = 2.5 \cdot 10^{10}$ точок. Якщо припустити, що для розрахунку кожної точки потрібно близько 1000 операцій, то для комп'ютера з числом 10^9 операцій за секунду знайдемо час розв'язання задачі $\sim 2.5 \cdot 10^4$ сек. Цей час дорівнює 7 годин. Для проведення багатоваріантних параметричних розрахунків цей час досить великий.

Для створення методу розв'язання задачі, що застосовується для практичних обчислень, потрібні спеціальні прискорені алгоритми. Для

обґрунтування методики прискорення чисельного розв'язання задачі про рух вуглекисло-повітряної суміші у вентиляційному потоці у прямолінійному виробленні проаналізуємо спосіб прискорення чисельного рішення на прикладі розв'язання модельної задачі.

Розглядається одновимірне завдання про витіснення з прямолінійного вироблення постійного перерізу вуглекисло-повітряної суміші повітрям.

Система рівнянь, що описує процес перебігу вуглекисло-повітряної суміші в прямолінійному каналі з приходом маси та ентальпії вуглекислого газу зі стінок запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} &= \Pi \dot{m}_{CH_4} / s, \\ \frac{\partial \rho_{CH_4}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{CH_4} u}{\partial x} &= \Pi \dot{m}_{CH_4} / s, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2 + p}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial \rho(e + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho u(e + u^2/2) + pu]}{\partial x} &= H \Pi \dot{m}_{CH_4} / s, \\ \frac{p}{\rho} &= (\gamma - 1)e, \\ \gamma &= \frac{C_p}{C_v}, \quad C_p = c_{pCH_4} + \frac{\rho_{CH_4}}{\rho} + c_{pвозд} \frac{(\rho - \rho_{CH_4})}{\rho}, \quad C_v = c_{vCH_4} + \frac{\rho_{CH_4}}{\rho} + c_{vвозд} \frac{(\rho - \rho_{CH_4})}{\rho}. \end{aligned} \quad (3.22-3.26)$$

Прийняті позначення описані у п. 3.2.

Як граничні умови на вході (ліворуч) задаються швидкість потоку і ентропія, на виході (праворуч) задається тиск. Як початкові умови для системи рівнянь (3.22)–(3.26) задаються початкові значення тиску, швидкості, щільності, концентрації вуглекислого газу.

Система одновимірних рівнянь нестационарної газової динаміки (3.22)–(3.26) вирішувалася методом С.К. Годунова з реалізацією розпаду довільного

розриву параметрів газу з різними показниками адіабати. Звичайно-різницевий аналог рівнянь (3.22)-(3.26) має вигляд:

$$\begin{aligned} & ((\rho)^{j-1/2} - (\rho)_{j-1/2})\Delta x + (M_j - M_{j-1})\Delta t = \Pi \dot{m}_{CH_4} / s \Delta t \Delta x, \\ & ((\rho_{CH_4})^{j-1/2} - (\rho_{CH_4})_{j-1/2})\Delta x + (M_{CH_4j} - M_{CH_4j-1})\Delta t = \Pi \dot{m}_{CH_4} / s \Delta t \Delta x, \\ & ((\rho u)^{j-1/2} - (\rho u)_{j-1/2})\Delta x + (J_j - J_{j-1})\Delta t = 0, \\ & ((e + u^2/2)^{j-1/2} - (e + u^2/2)_{j-1/2})\Delta x + (E_j - E_{j-1})\Delta t = H \Pi \dot{m}_{CH_4} / s \Delta t \Delta x, \end{aligned} \quad (3.27)$$

де Δx - крок по координаті; Δt - величина кроку за часом; $M = (R \cdot U)$ - потік маси на межі осередку різницевої сітки; $J = (R \cdot U \cdot U + P)$ - потік імпульсу на межі осередку різницевої сітки; $E = (R \cdot U (E + U^2/2) + P \cdot U)$ - потік енергії на межі осередку; $M_{CH_4} = (R_{CH_4} \cdot U)$ - потік маси CO_2 на межі осередку, R , U , P - значення параметрів стану газу на кордоні після розпаду довільного розриву Індекс зверху позначає параметри на верхньому часовому шарі, знизу - на нижньому часовому шарі.

Умовою стійкості рівнянь газової динаміки є виконання умови Куранта, яке

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{\max(|u| + a)}, \quad a = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \text{ швидкість звуку}$$

Розроблений в [38] метод дозволяє використовувати для знаходження значення щільності повітря та вуглекислого газу на верхньому часовому шарі,

$(\rho)^{j-1/2}, (\rho_{CH_4})^{j-1/2}$ збільшений крок у часі $\Delta t^2 = k \Delta t$, де $k \gg 1$. Тому розрахунок рівнянь (3.27), (3.29), (3.30) вестимемо з кроком Δt , а (3.28) з кроком $\Delta t^2 = k \Delta t$. Тиск визначається рівняння стану.

Для перевірки збіжності до стаціонарного вирішення задачі про вентиляцію прямолінійного вироблення з використанням методу прискорення чисельного розрахунку було вирішено модельне завдання. Розглядається

прямолінійне горизонтальне вироблення довжиною 600 метрів. На ділянці 200 метрів у середині каналу виділяється метан із заданим значенням $\dot{m}_{CH_4}$. На лівій межі каналу заданий прихід повітря із заданою швидкістю та ентропією (працює вентилятор), на правій межі задано атмосферний тиск.

Розрахунки проводилися за моделлю (3.22)-(3.26) з використанням методу, описаного вище. У розрахунках варіювалися два параметри чисельної схеми: величина Δt - коефіцієнт у визначенні величини кроку $\Delta t^2 = k \Delta t$ і час від початку процесу, з якого збільшення починає використовуватися, t_k . Результати розрахунків представлені на рисунках 3.2-3.4 у вигляді розподілу концентрації CO_2 в каналі в момент часу 300 секунд від початку процесу, коли перебіг і перенесення CO_2 в каналі встановлюється.

Спочатку було отримано точне стаціонарне рішення без використання процедури прискорення чисельного рішення, представлене на рисю 3.1-3.3 суцільною лінією. $k = 10 \div 25$ $t_k = 100 \div 200c$,

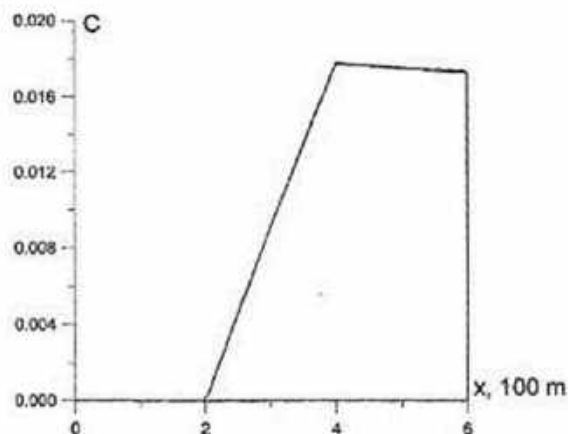


Рисунок 3.2. Стаціонарний розподіл концентрації CO_2 в повітрі - отримано без використання процедури прискорення;

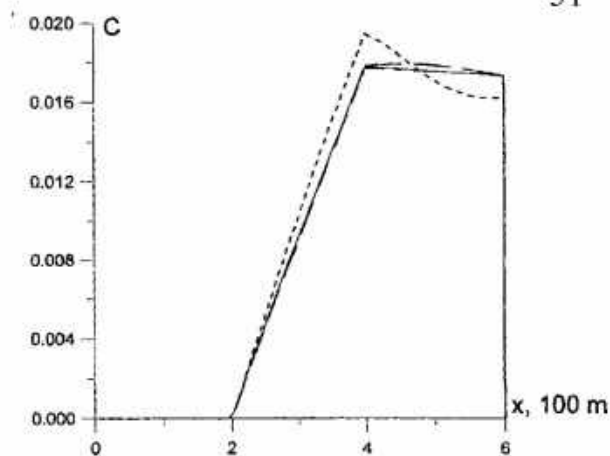


Рисунок. 3.3. Стаціонарний розподіл концентрації CO₂ у повітрі. Суцільна лінія – отримано без використання процедури прискорення; пунктирна – $k = 10$, $t_k = 150$ с, штрихова – $k = 25$, $t_k = 150$ с

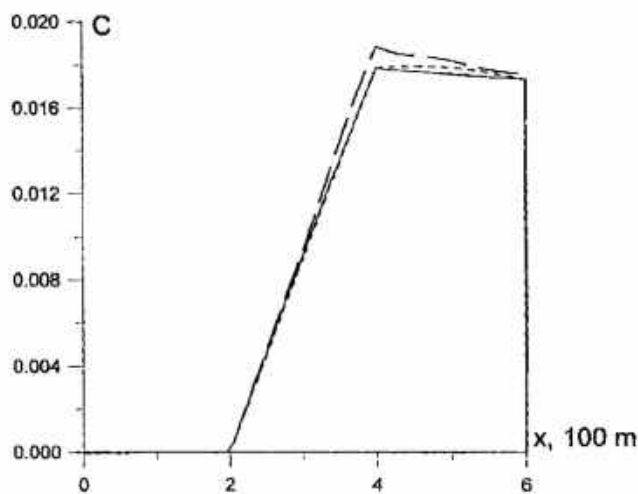


Рисунок. 3.4. Стаціонарний розподіл концентрації CO₂ у повітрі. Суцільна лінія – отримано без використання процедури прискорення; пунктирна - $k = 10$, $t_k = 200$ с, штрихова - $k = 25$, $t_k = 200$ с

З рисунків видно, що при значеннях $t_k=200$ з стаціонарне рішення виходить при будь-яких значеннях з розглянутого інтервалу. Однак при невдалому виборі параметрів k і t_k виходять певні відхилення від точного рішення, збіжність до точного рішення сповільнюється. При детальному розгляді процесу

встановлення стаціонарного перебігу каналі встановлено, що процедуру прискорення чисельного рішення можна включати тоді, коли газодинамічні параметри течії (швидкість і тиск) підійшли близько до свого стаціонарного рішення.

Таким чином, чисельними експериментами показано, що процедура прискорення чисельного розв'язання задач перебігу повітряної суміші прямолінійного вироблення є ефективним способом отримання стаціонарних розподілів концентрації вуглекислого газу.

Розроблено математичну модель нестаціонарних процесів вентиляції тунельних виробок. Математична модель ґрунтується на нестаціонарних рівняннях газової динаміки. Вона враховує виділення вуглекислого газу зі стінок виробок, змінну концентрацію вуглекислого газу, теплообмін газу зі стінками виробок, наявність вентиляційних споруд у виробках та реальні поперечні перерізи виробок, роботу вентилятора провітрювання, виходи в атмосферу.

Розроблено алгоритм чисельного розв'язання системи рівнянь математичної моделі. Чисельне рішення рівнянь газової динаміки ґрунтується на методі С.К. Годунова. Потоки повітря від вентилятора провітрювання та робота вентиляційних установок враховуються в математичній моделі шляхом завдання відповідних умов на входах та виходах виробок.

Для прискорення розрахунку параметрів стану атмосфери у виробках до встановлення стаціонарного їх розподілу реалізовано та апробовано спеціальний алгоритм розрахунку перенесення вуглекислого газу та інших домішок у повітрі.

Розділ 4. Моделювання нестационарних процесів вентиляції мережі виробок вентиляційних шахт

Великий інтерес представляють динамічні процеси вентиляції, що виникають при змінах режимів провітрювання та в аварійній ситуації.

Вентиляційна шахта є розгалуженою мережею каналів з розташованим у них обладнанням, пористих просторів. Для забезпечення нормальної роботи людей безперервно проводиться провітрювання тунельних виробок. Крім того, провітрювання повинне забезпечити безпечну концентрацію вуглекислого газу в рудничній атмосфері та відсутність зон накопичення вуглекислого газу з концентрацією вище за допустиму. Для провітрювання діючих виробок використовуються вентилятори провітрювання, вентилятори місцевого провітрювання.

Провітрювання тунельних виробок було і залишається одним із найважливіших аспектів функціонування вентиляційних шахт. Від якості проектування та роботи вентиляційної системи залежить безпека робіт, можливість розвитку шахти. У періоди аварійного режиму роботи шахти правильне провітрювання виробок є визначальним чинником ліквідації аварії та порятунку людей. Аварійні режими провітрювання є найскладнішими. Вони характеризуються наявністю безлічі перехідних процесів. Найбільш точно такі процеси описуються нестационарними фізико-математичними моделями на основі рівнянь газової динаміки.

Для провітрювання виїмкових ділянок, які є основними джерелами вуглекислого газу та пилу, використовуються різні схеми провітрювання: прямоточна схема з підсвіженням, зворотно-точна схема, комбінована схема [33].

Для розрахунку вентиляції мережі виробок зазвичай використовується

гідравлічний підхід і закони Кірхгофа. Проте результати розрахунків, отримані у межах стаціонарного підходу, який завжди задовольняють потреби практики. Великий інтерес становлять динамічні процеси, що виникають при змінах режимів провітрювання та в аварійній ситуації у разі пожеж.

З метою прогнозування розвитку у часі процесів у виробках необхідно проводити розрахунки аеродинаміки у нестационарній постановці.

4.1 Розрахунок перенесення повітря в мережі виробок на прикладі модельної ділянки вентиляційної шахти

Математичний опис нестационарного перебігу суміші вуглекислого газу та повітря у мережі виробок вентиляційної шахти сформульовано у розділі 3.

На основі моделі (3.1)-(3.3), (3.12)-(3.14), (3.15)-(3.16), (3.17)-(3.21) були проведені розрахунки провітрювання ділянки мережі виробок модельної шахти, представленої на рис. 4.1. Довжина кожної з виробок 200 м, площа поперечного перерізу 10м^2 . На початку виробітку 1-2 на поверхні встановлений вентилятор провітрювання. Вироблення 1-2 вертикальне, інші горизонтальні. На ділянці 3-4 зі стінок виробітку виділяється, метан. Були розраховані два варіанти: за вузлом 3 у виробленні 3-6 відсутня або встановлено вентиляційний шлюз. Результати розрахунків представлені на рис 4.2-4.7 у вигляді розподілу щільності вуглекислого газу в тунельній атмосфері вздовж маршруту 1-2-3-4-5-6-7 (I) та маршруту 1-2-3-6-7 (II) послідовні моменти часу за 60 секунд. Розподіл параметрів, що встановився, виділено товстою сірою лінією.

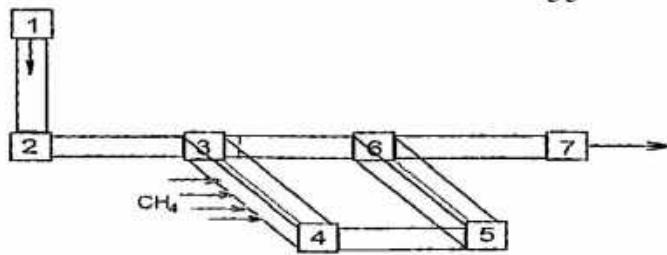


Рисунок 4.1. Ділянка мережі виробок модельної шахти

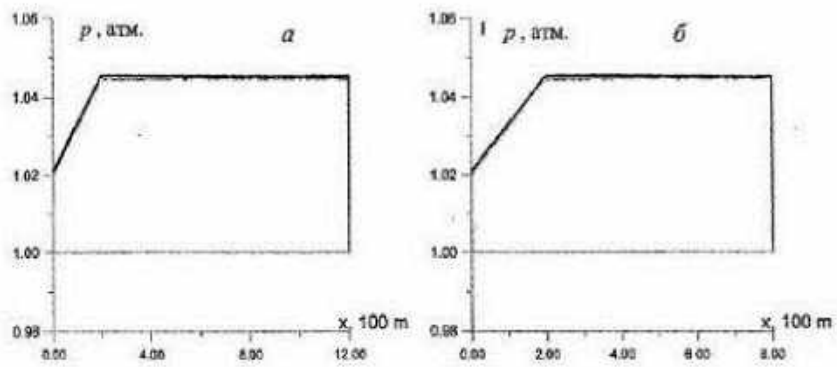


Рисунок 4.2 Розподіл тиску на маршрутах I(а) та II(б) (шлюз не встановлений)

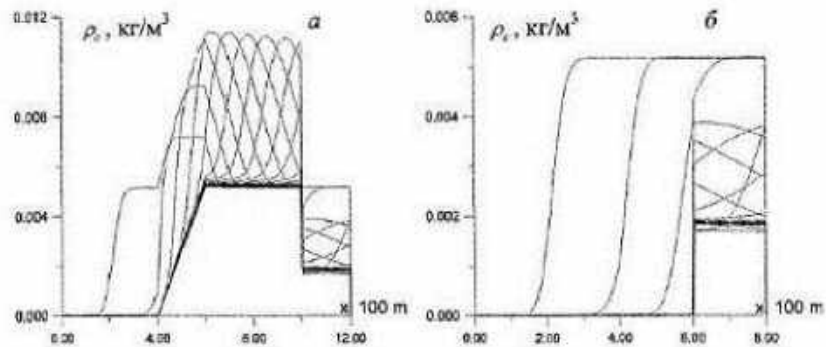


Рисунок 4.3. Розподіл щільності повітря на маршрутах I(а) та II(б) (шлюз не встановлений)

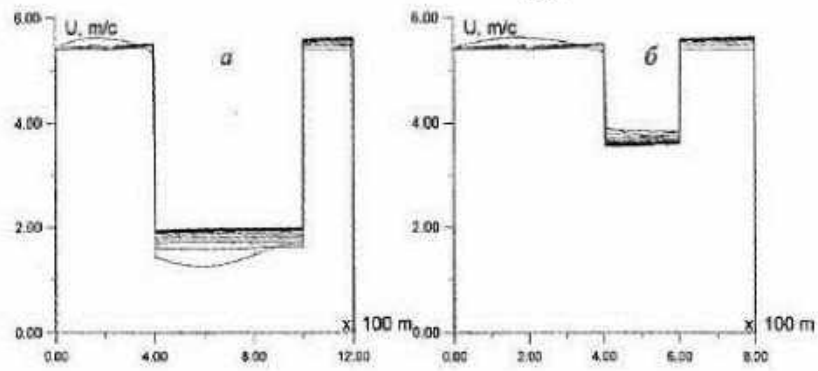


Рисунок 4.4. Швидкість тунельної атмосфери на маршрутах I(а) та II(б) (шлюз немає встановлено)

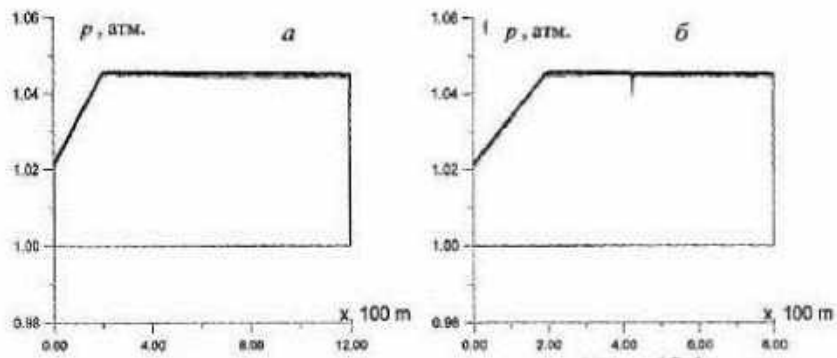


Рисунок 4.5. Розподіл тиску на маршрутах I(а) та II(б) (шлюз встановлений)

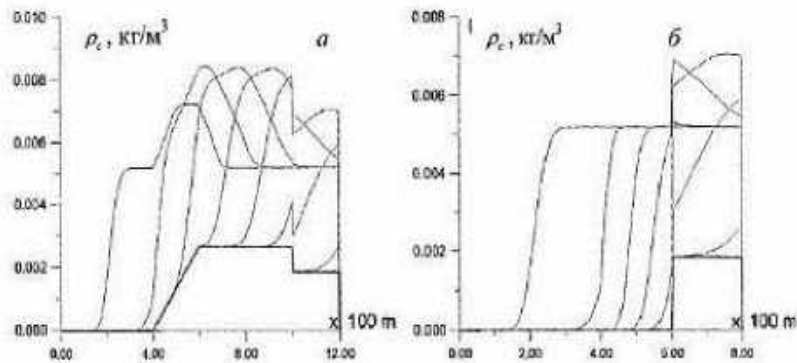


Рисунок 4.6. Розподіл густини повітря на маршрутах I (а) та II (б) (шлюз встановлений)

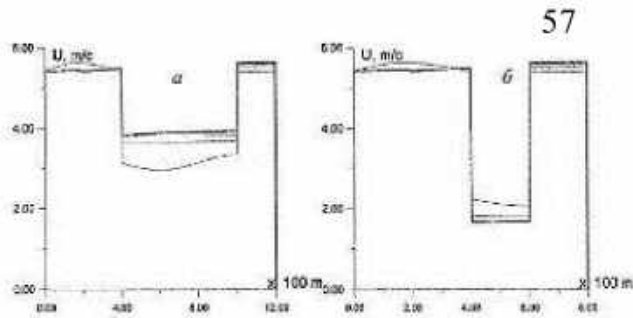


Рисунок 4.7. Швидкість тунельної атмосфери на маршрутах І(а) та ІІ(б) (шлюз встановлений)

Як показали розрахунки, тиск на ділянці мережі виробок досить швидко встановлюється (рис. 4.2, 4.5). Зростання тиску ділянці 1-2 обумовлено гідростатическим тиском стовпа повітря. Відповідно встановлюються розподіли швидкості. У парі 3 відбувається поділ потоку повітря на два; причому більша масова витрата (велика швидкість) спостерігається у виробленні 3-6 (на рис. 4.4). Вуглекислий газ, що виділяється зі стінок вироблення 3-4, зноситься потоком повітря через вироблення за маршрутом 4-5-6-7 і виноситься з аналізованої області мережі виробок. Однак на ділянці 4-5-6 є концентрація вуглекислого газу, що перевищує допустиму $0,0052 \text{ кг/м}^3$ (що відповідає 1,4%) (рис. 4.3).

Було проведено розрахунок варіанта, коли у виробленні 3-6 на відстані 20 метрів від пари сполучення 3 була встановлена вентиляційна перемичка з площею отвору перетином 3 м^2 . Результати розрахунку подано на рисунках 4.5-4.7. При встановленій перемичці у виробленні 3-6 швидкість руху повітря стала меншою в 2 рази, а у виробках на ділянці 3-4-5-6 більше. При цьому концентрація вуглекислого газу у виробках 4-5, 5-6, 6-7 зменшилася та не перевищує допустиму величину (рис. 4.6).

Дійсно, шляхом встановлення вентиляційної перемички у виробках відбувається регулювання розподілу потоків повітря в мережі для забезпечення необхідного провітрювання виробок. Цим досягають зниження вуглекислого

газу в тунельній атмосфері до безпечних концентрацій. В рамках нестационарної моделі вентиляції з розрахунків можна отримати кількісні характеристики концентрації повітря та його розподілу за виробленням.

4.2 Моделювання провітрювання глухого кута тунельним вентилятором

Для визначення параметрів вентилятора та режиму провітрювання існують інженерні методики [4,41]. Однак тимчасові характеристики провітрювання суттєво залежать від газодинаміки та гідродинаміки повітряного потоку в тупиковому виробленні.

Вентилятори провітрювання, встановлюються у виробках. При нагнітальному способі провітрювання тупикової виробки свіже повітря подається за допомогою вентилятора по вентиляційних трубах і витісняє тунельну атмосферу, забруднену вуглекислим газом, що виділився в тунелі і стінок вироблення. Нагнітальний спосіб провітрювання є основним у шахтах України. Є й інші, рідше використовувані, схеми та способи організації провітрювання тупикових виробок.

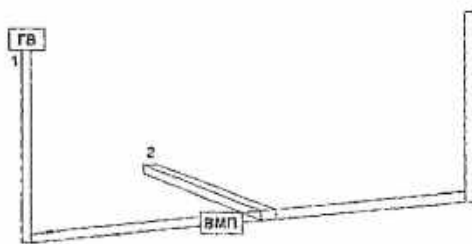


Рисунок 4.8. Ділянка мережі виробок. ГВ – головний вентилятор провітрювання, ВМП – вентилятор місцевого провітрювання. 1 - початок вертикального вироблення, де встановлений ГВ, 2 - тупикова виробка, 3 - вихід в атмосферу

На основі математичної моделі, представленої в главі 3, були проведені

розрахунки провітрювання глухого кута за допомогою вентилятора провітрювання в модельній ділянці мережі виробок, представленою на рис. 4.8. Довжина маршруту 1-3-1000 м, довжина маршруту 2-3 – 700 м. Довжини вертикальних виробок - 100 м, довжина тупикового вироблення 200 м. Площа перерізів виробок було прийнято 10 м^2 .

Передбачалося, що у тупиковому виробленні утворилася підвищена концентрація вуглекислого газу (парціальна щільність CO_2 становить $\rho_{\text{CH}_4}(x) = 0.03$).

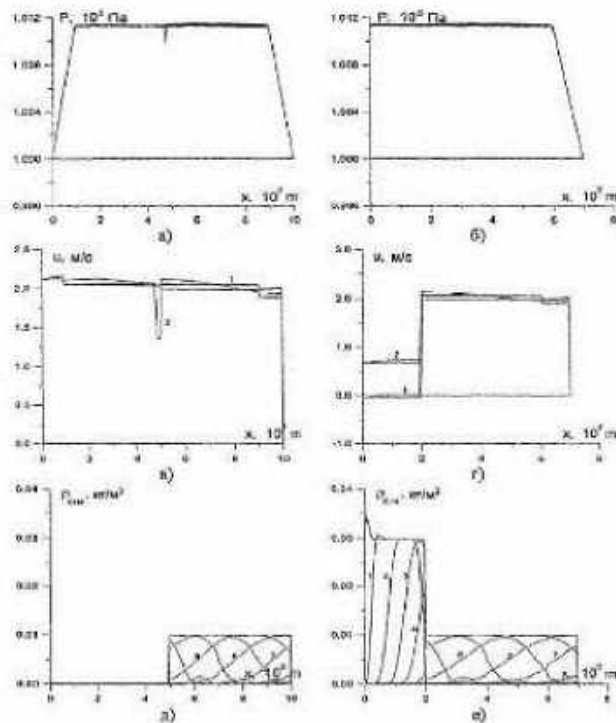


Рисунок 4.9. Розподіл тиску, швидкості, щільності повітря за маршрутом 1-3 (а, в, д) та маршрутом 2-3 (б, г, е). Криві збудовані у послідовні моменти часу через 80 с. $G_{\text{вмп}}=6,25 \text{ м}^3/\text{с}$.

Передбачається, що на маршруті 1-2 реалізовано стаціонарний режим провітрювання. У заданий момент часу в роботу включається вентилятор провітрювання, встановлений у тунелі зі свіжим струменем повітря, на відстані

10 м від сполучення з тупиковим виробленням. Розрахунки проведені для двох величин витрати повітря, що забезпечує вентилятор провітрювання:

$G_{ВМП} = 6.25 \text{ м}^3 / \text{с}$, $G_{ВМП} = 12.5 \text{ м}^3 / \text{с}$. Результати подано на рисунках 4.9-4.10.

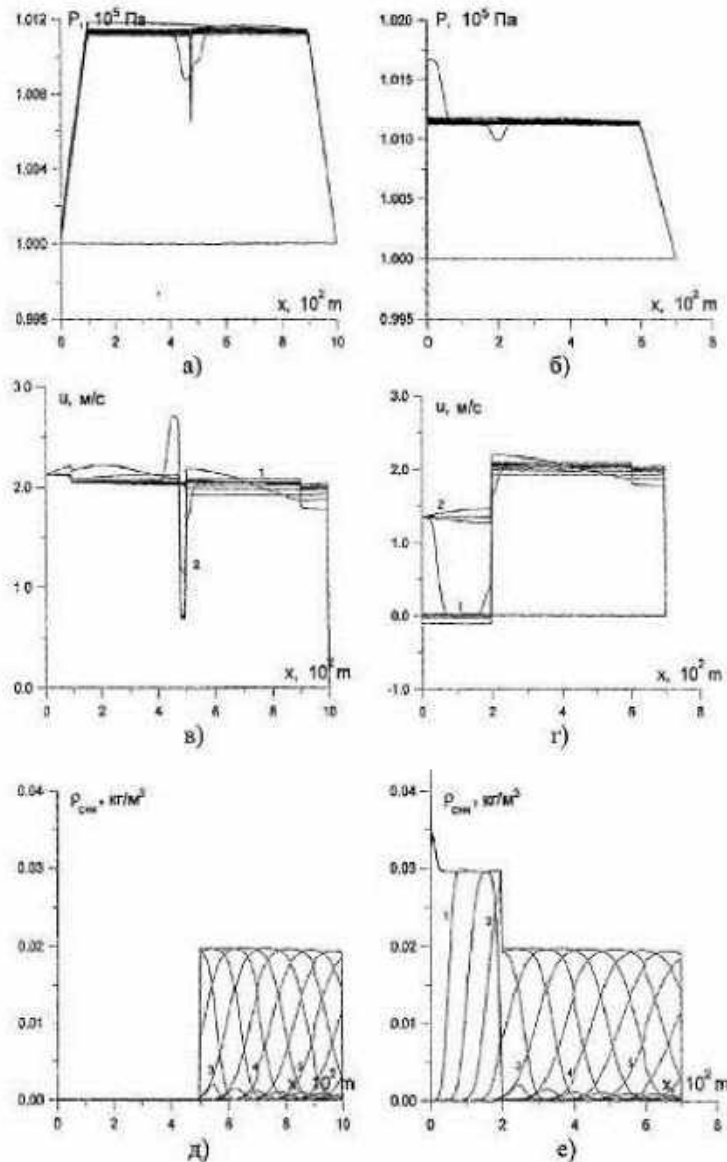


Рисунок 4.10 Розподіл тиску, швидкості, щільності повітря за маршрутом 1-3 (а, в, д) та маршрутом 2-3 (б, г, е). Криві збудовані у послідовні моменти часу через 80 с. $G_{ВМП}=12,5 \text{ м}^3/\text{с}$

Після включення вентилятора провітрювання зменшується швидкість руху

повітря в локальній області між вентилятором провітрювання та гирлом тупикової виробки (рис. 4.9 в), у місці установки вентилятора провітрювання локально знижується тиск (рис. 4.9 а, 4.10а). З тупикового вироблення поступово відбувається витіснення тунельної атмосфери з підвищеним вмістом вуглекислого газу (рис. 4.9, д, е, рис. 4.10 д, е). У зоні сполучення відбувається перемішування газоповітряних мас, з глухого кута до виходу в атмосферу йде вентиляційний струмінь зі зниженою концентрацією кисню. Однак при збільшеному вдвічі витраті повітря через вентилятор провітрювання концентрація вуглекислого газу після сполучення з тупиковим виробленням має велику величину (див. рис. 4.9 та 4.10, д, е).

У випадку, коли продуктивність вентилятора провітрювання більша, ніж величина вентиляційного потоку, що підходить до вентилятора провітрювання, то в локальній області між вентилятором провітрювання і гирлом тупикової вироблення тунельна атмосфера буде рухатися від гирла тупикової вироблення до вентилятора провітрювання. Цей потік містить деяку кількість вуглекислого газу, який знову повертається в тупикову виробку. Тому продуктивність вентилятора провітрювання не повинна бути більше 70% від величини вентиляційного потоку, що підходить до вентилятора провітрювання.

4.3 Чисельне моделювання провітрювання тунельного глухого кута в двомірній постановці

Тимчасові характеристики провітрювання можуть істотно залежати від гідродинаміки течії в тупиковій виробці. Розглянемо особливості аерогазодинаміки витіснення атмосфери глухого кута (повітряної суміші) повітрям від роботи вентилятора провітрювання на прикладі рішення модельної задачі.

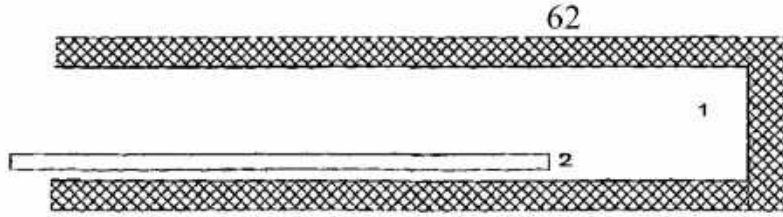


Рисунок 4.11. Схема провітрювання глухого кута: 1 -тупикова вироблення, 2 - трубопровід подачі повітря.

Розглянемо тупикове горизонтальне вироблення довжиною 200 метрів, висотою 4 метри. Вважаючи малою величиною силу тертя газу об стінки вироблення, процес витіснення атмосфери глухого кута і заповнення його повітрям будемо моделювати в плоскій постановці (двовимірне плоске протягом газу) з урахуванням сили тяжіння.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = G \delta(x - x_T),$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_m v}{\partial y} = G_m \delta(x - x_T),$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = I \delta(x - x_T),$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho vu}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} = -g \rho,$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho E v + p v)}{\partial y} = -g \rho v + H \delta(x - x_T),$$

$$P = \rho R T,$$

Початкові умови:

$$\rho(x, y, 0) = \rho_0, \quad \rho_m(x, y, 0) = \rho_{m,0}, \quad u(x, y, 0) = 0, \quad v(x, y, 0) = 0 \quad . \quad \text{Граничні}$$

умови: $p(0, y, t) = p_b, \quad u(L, y, t) = 0, \quad v(x, 0, t) = 0, \quad v(x, h, t) = 0$. Тут t - час, x, y - декартові координати, ρ - щільність, p - тиск, u, v - швидкості, T - температура, R - газова постійна, L - довжина виробітку, h - висота виробітку, g - прискорення сили тяжіння, G, G_m, I, H - прихід маси газу, маси вуглекислого газу, імпульсу та

ентальпії від вентилятора провітрювання, $\delta(x)$ - одинична функція, x - координата положення вихідного перерізу вентиляційного рукава.

Рішення системи рівнянь (4.1) - (4.6) проводилося методом С.К. Годунова [38]. Розрахунки проводилися за швидкості подачі повітря від вентилятора провітрювання, що дорівнює $25 \text{ м}^3/\text{с}$. Подача повітря здійснювалася в координаті, на відстані 25 метрів від торця виробітку на висоті від 0.5 м до 1.0 м від підстави виробітку. Результати розрахунків подано на рисунках 4.12, 4.13.

На рис 4.12 представлені розподіли концентрації домішок тунельної атмосфери на висоті 2 метри від основи виробітку по довжині виробітку в послідовні моменти часу. Видно, що за рахунок припливу свіжого повітря трубопроводом від вентилятора провітрювання утворюється фронт витіснення домішок. І за заданої об'ємної подачі повітря протягом близько 2-3 хвилин відбувається заміщення тунельної атмосфери в безвиході. Заміщення атмосфери відбувається неоднорідним чином.

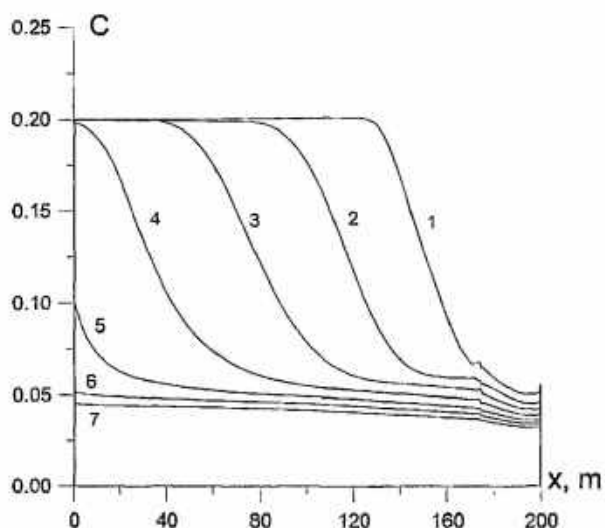
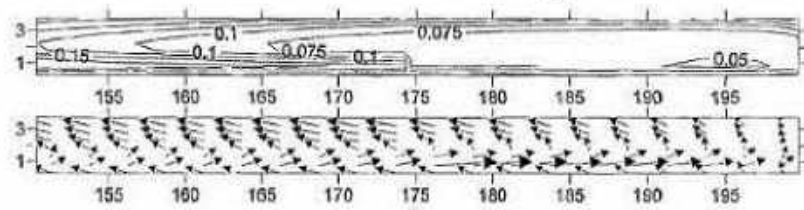
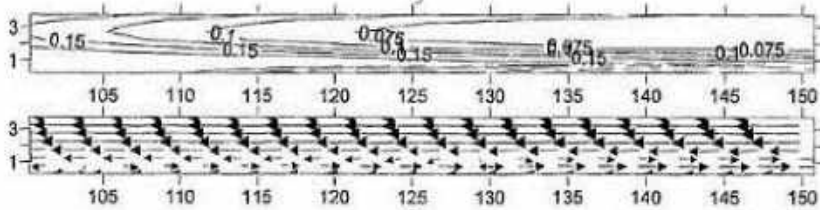


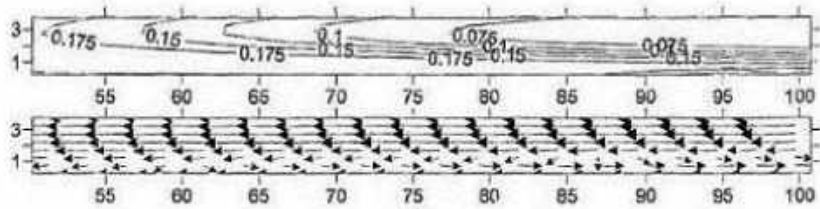
Рисунок 4.12. Розподіл відносної концентрації домішок тунельної атмосфери за довжиною виробітку на висоті 2 м у послідовні моменти часу через 10 с



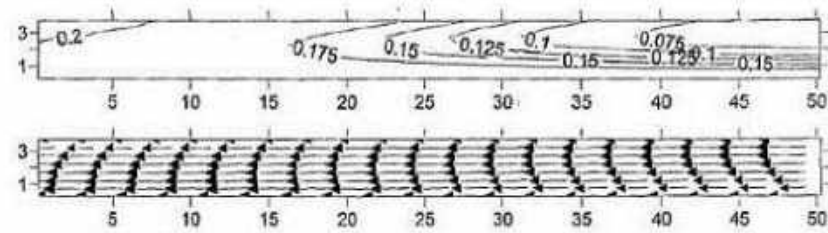
a)



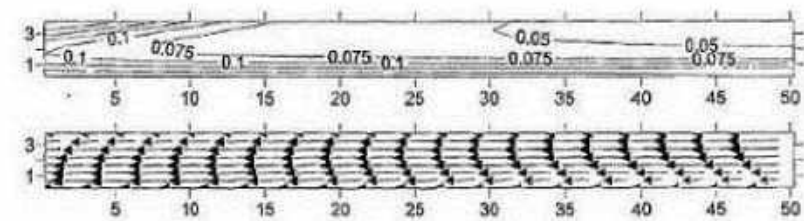
b)



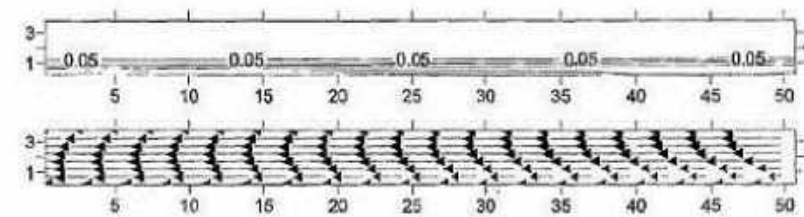
c)



d)



e)



f)

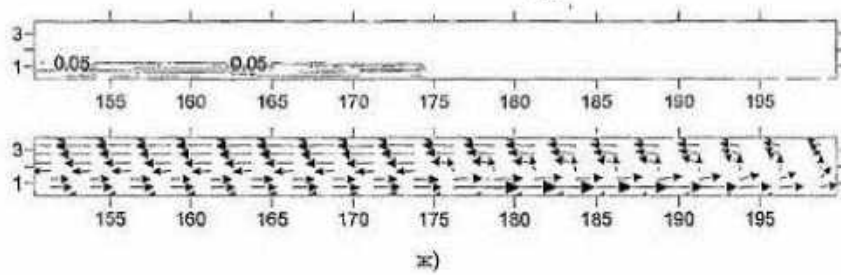


Рисунок 4.13. Поля відносної концентрації вуглекислого газу та вектора швидкості руху повітря у вертикальному перерізі тупикової виробки. а-10 сек, б-20с, -30с, г -40с, д-50, е-70с, ж-70с.

На рис. 4.13 представлені, ізолінії концентрації домішок тунельної атмосфери, в області фронту витіснення і поле швидкостей у цій галузі (на малюнку послідовно представлені ділянки виробітку по 50 м, положення глухого кута відповідає координаті 250 м) в різні моменти часу. Видно, що надходження повітря від вентилятора провітрювання в зоні виходу з тунелю сприяє виникненню циркуляційного руху повітря в області довжиною 50 метрів. Це призводить до підсмоктування тунельної атмосфери в потік повітря з вентилятора провітрювання та їх перемішування. Потік повітря в області тунелю розгортається і переважно у верхній частині виробітку рухається у напрямку до гирла тупикової виробки. При цьому переважно виноситься тунельна атмосфера, що знаходиться вгорі тупикового вироблення. Нижня частина тунельної атмосфери витісняється повільніше через наявність застійних зон у ній.

Слід звернути увагу на те, що структура течії поблизу глухого кута після короткого періоду встановлення практично не змінюється (рис. 4.13 а, ж);

На основі розробленої моделі проведено чисельне моделювання аерогазодинамічних процесів при провітрюванні в тупиковому виробленні. Отримано нестационарну динаміку витіснення тунельної атмосфери, з тупикового вироблення при подачі повітря за допомогою вентилятора

провітрювання. Показано що через природну і вимушену конвекцію перебіг повітря і тунельної атмосфери в тупиковій виробці має складний характер. Саме тому час повного витіснення тунельної атмосфери буде більшим, ніж час, що обчислюється з умови заповнення обсягу вироблення рівним обсягом повітря.

4.4 Моделювання процесів перенесення вуглекислого газу при реверсі вентилятора провітрювання

Розглянуто випадок нормальної роботи вентилятора провітрювання у режимі нагнітання повітря через вентиляційний стовбур у шахту. Згідно з вимогами всі вентиляторні установки (ВУ) повинні мати можливість здійснення реверсу і тоді в цьому випадку, ВУ працюватиме в режимі витяжки тунельної атмосфери (в режимі всмоктування). Реверсування вентиляційного струменя здійснюється для організації безпечної роботи людей та комфортних умов для пасажирів [4]. При реверсуванні відбувається перерозподіл вентиляційних потоків. Моделювання реверсу проведемо з прикладу модельної мережі виробок, представленої на рис. 4.14. Вважаємо, що у виробках 4-5, 5-6 (на рис. 4.14) відбувається приплив повітря у вентиляційний потік. У точці 10 вихід в атмосферу відсутня (точка 10 - глухий кут). Після встановлення стаціонарного провітрювання (у розрахунках встановлення стаціонарного режиму провітрювання у вибраній модельній мережі відбувається за 3000 с) вентилятор провітрювання перетворюється на реверсивний режим. Передбачається, що вентилятор провітрювання забезпечує швидкість потоку повітря в реверсивному режимі таку ж, що у прямому (в розрахунках прийнято 2.07 м/с). Результати розрахунків представлені на рис. 4.20. Тут представлені розподілення швидкості та парціальної щільності повітря у виробках на маршрутах 1-1У (жирна крива 1 на малюнках), розподілення швидкості та парціальної щільності повітря після реверсування вентиляційного струменя (криві 2 на малюнках), проміжні криві

розподілу швидкості та щільності повітря процесі встановлення після реверсування вентилятора провітрювання, побудовані через 400 с.

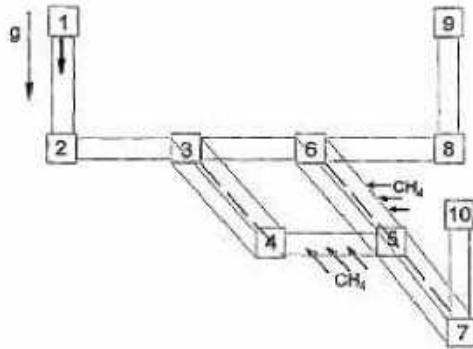
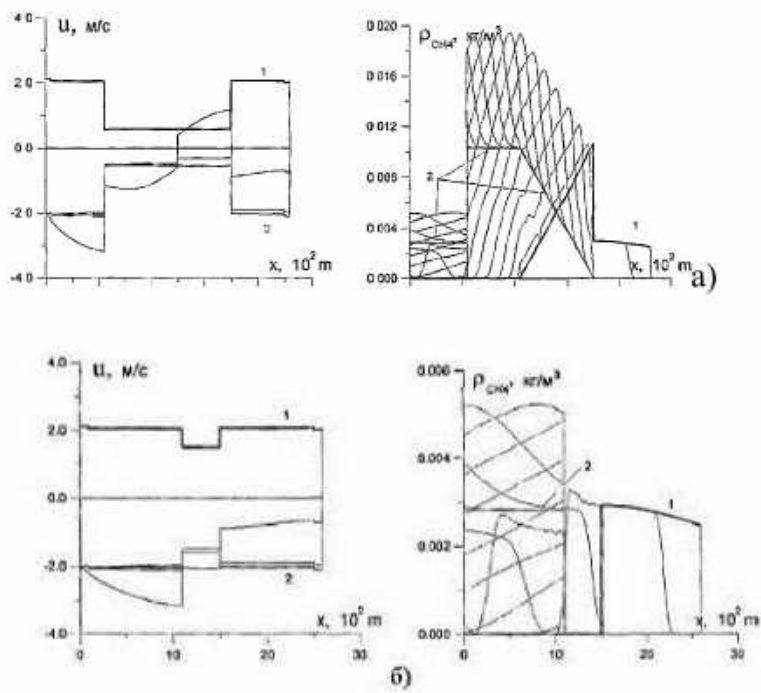


Рисунок 4.14 Схема модельної мережі виробок вентиляційних шахт



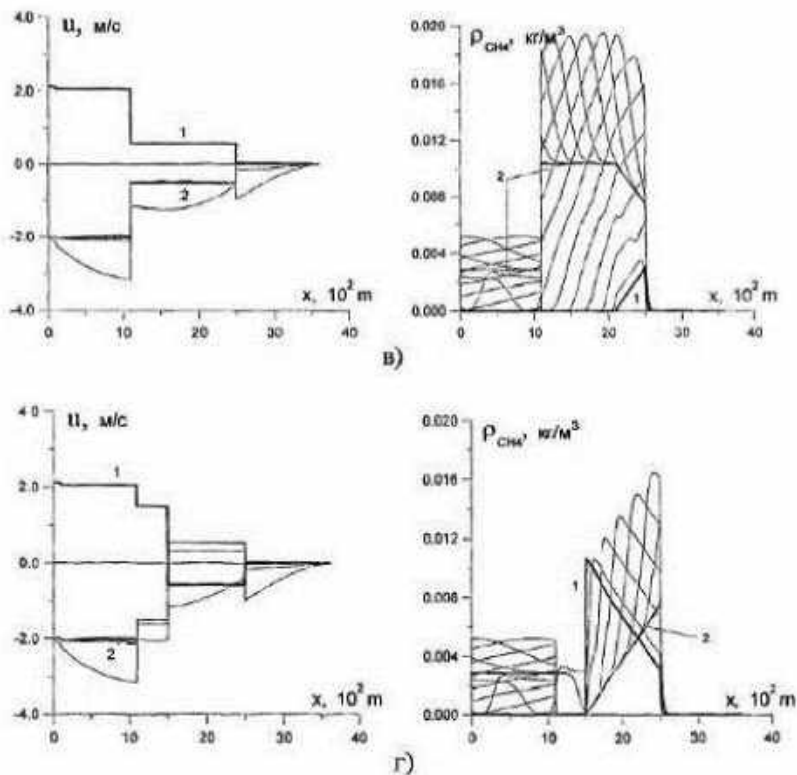


Рисунок 4.20. Розподіли швидкості і парціальної щільності повітря, що встановилися, до реверсування вентилятора провітрювання (криві 1) і після реверсування (криві 2).

Проміжні криві побудовані в моменти часу через 400 с, починаючи з моменту перемикання вентилятора. а) I, б) II, в) III, г) IV. відносно швидко за час 1200-1500 с для обраної мережі виробок. стаціонарного розподілу повітря у виробках відбувається за час набагато більше 6000 с. двічі проходить вироблення, в яких відбувається приплив повітря у вентиляційний потік. реверсуванні у виробленні 3-4 спостерігається підвищена концентрація вуглекислого газу.

Таким чином, проведене моделювання нестационарних процесів перенесення повітря в умовах реверсування вентилятора провітрювання показано, що встановлення стаціонарного режиму руху повітря відбувається у

кілька разів швидше, ніж встановлення стаціонарного розподілу концентрації вуглекислого газу у виробках. У період встановлення стаціонарного розподілу концентрації вуглекислого газу виробках можливе локальне збільшення його концентрації у кілька разів.

На основі розробленої та представленої в розділі 3 математичної моделі нестационарних процесів провітрювання мережі виробок вентиляційних шахт проведено моделювання витіснення вуглекислого газу з виробок модельної мережі.

Розроблено підхід та проведено моделювання провітрювання тупикового вироблення у мережі виробок вентилятором провітрювання.

Проведене чисельне моделювання провітрювання тупикової виробки у двовимірному наближенні, проаналізовано динаміку та структуру течії по довжині вироблення при витісненні повітряної суміші з глухого кута.

Проведено моделювання нестационарних процесів перенесення вуглекислого газу в умовах реверсування вентилятора провітрювання. можливе локальне збільшення його концентрації в декілька разів.

Розроблений підхід дозволяє моделювати нестационарні аерогазодинамічні процеси в мережі виробок вентиляційної шахти;

Розроблена методика для розрахунку нестационарних аерогазодинамічних процесів, вентиляції мережі виробок вентиляційних шахт дозволяє проводити розрахунок нестационарних процесів вентиляції мережі виробок шахт. Вона враховує реальну топологію мережі виробок вентиляційних шахт (довжини та площі поперечного перерізу виробок, змінність площі перерізу виробок, кути нахилу та сполучення виробок, виходи на поверхню) характеристики вентилятора провітрювання; вентилятори місцевого провітрювання; розташування вентиляційних споруд.

Розділ 5. Розрахунок та вибір елементів системи управління

5.1 Розрахунок та вибір двигуна

Вентиляційні мережі метро та тунелів мають порівняно з шахтними вентиляційними мережами значно менший аеродинамічний опір, тому вимоги до вентиляторів метро та тунелів у частині їх коефіцієнтів подачі та тисків істотно відрізняються від шахтних. Однак в основу аеродинамічного розрахунку як шахтних вентиляторів, так і вентиляторів метро покладено один і той же принцип радіальної рівноваги потоку в лопаткових вінцях робочих коліс.

В даний час методи аеродинамічного розрахунку побудовані за принципом забезпечення сталості енергії по висоті лопаток робочого колеса, що зводить до мінімуму втрати тиску в лопатковому вінці. Однак, щоб отримати від такого колеса досить великий статичний тиск, необхідно перекривати центральну частину колеса втулкою великого діаметру ($d = 0,5 - 0,7$), що мало прийнятно для вентиляторів метрополітенів та тунелів, оскільки при цьому знижується коефіцієнт подачі вентиляторів, зменшується корисно використовується площа перерізу їх проточної частини, збільшується масогабаритні показники за рахунок великої втулки та необхідності збільшення діаметра колеса та ін [42].

Очевидно, що для осьових машин метро та тунелів необхідний перехід до принципу забезпечення сталості тиску по висоті лопаток їх робочих коліс, що дозволить знизити діаметр втулок (до $d = 0,3 - 0,4$) та підвищити коефіцієнт подачі вентиляторів при покращенні інших показників.

Отже, теоретичне значення статичного тиску робочого колеса

$$P_{st} = \rho U C_{2U} - 0,5 \rho C_{2U}^2 = const$$

де ρ – щільність повітря; U – окружна швидкість робочого колеса будь-якому довільному радіусі; C_{2U} – швидкість закручування в робочому колесі на

тому ж радіусі.

Замінивши у виразі

$$U = \omega \cdot r$$

де r – поточний радіус; ω – частота обертання колеса.

Приведемо його до вигляду

$$D \cdot C_{2u}^2 - r \cdot C_{2u} + F = 0$$

де D, F – постійні для конкретних умов величини.

Рішення цього квадратного рівняння для робочого колеса діаметром 1800 мм із частотою його обертання 600, 750, 1000 об/хв наведено на малюнку 2.1 порівняно із залежністю $C_{2u} = f(r)$, що відповідає умові радіальної рівноваги потоку в колесі.

На рис. 5.1 показані залежності швидкостей закручування за умови забезпечення сталості тиску $P_{svt} = \text{const}$ по висоті лопаток. $n = 600$ об/хв за умови забезпечення сталості циркуляції.

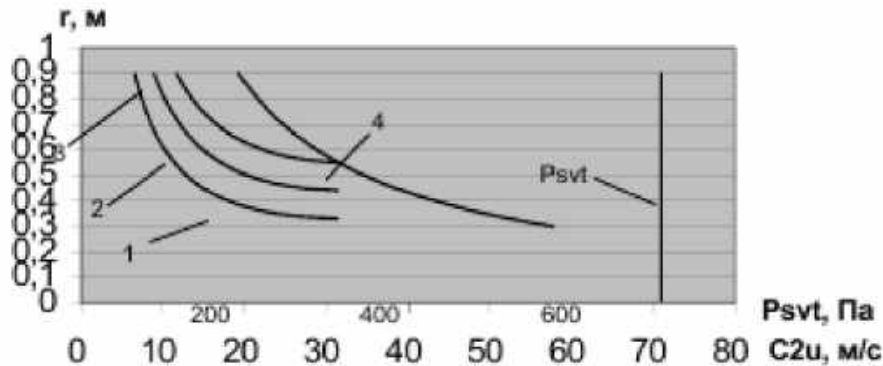


Рисунок 5.1 - Залежність швидкостей закручування

Аналіз залежностей $C_{2u} = f(r)$, що забезпечують $P_{skt} = \text{const}$ за висотою лопаток, вказує на те, що вони суттєво відрізняються від аналогічних залежностей, що забезпечують сталість циркуляції (радіальна рівновага).

Використовуючи отримані залежності можна застосовувати високоекономічні осьові вентилятори, які у повній мірі задовольняють умовам

вентиляції метрополітенів тунелів.

На рис 5.2 представлено функціональну схему вентиляторного агрегату.

На рис 5.2 прийнято такі позначення: 1 - електродвигун приводу; 2 - шиберальний апарат; 3 - нерухомий спрямовуючий апарат - ребра; 4 – робоче колесо (РК); 5 - нерухомий напрямний апарат -ребра; 6 - гальмо стоянки; 7 – комплектний перетворювач частоти; 8 – СУВ система управління вентиляцією.

Потужність на валу вентилятора N_B для будь-якого режиму може бути підрахована за формулою:

$$N_B = \frac{Q_B H_B}{1000 \eta_B} = \frac{110 \cdot 450}{1000 \cdot 0.72} = 68.75, \text{ кВт},$$

де Q_B – продуктивність у розрахунковому режимі, м³/с; H - депресія у тому режимі, Па;

η_B – статичний коефіцієнт корисної дії для цього режиму.

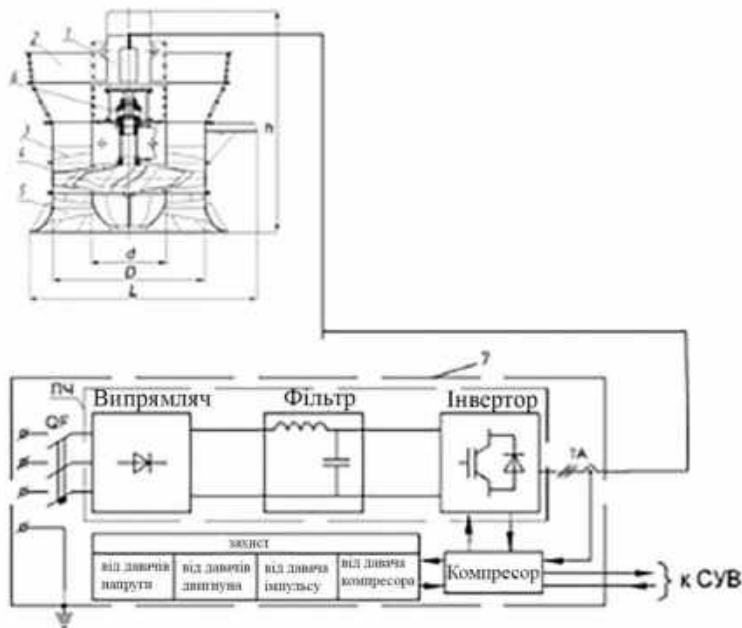


Рисунок 5.2 – функціональна схема вентиляторного агрегату

На підставі розрахунку потужності вибираємо вентиляторний агрегат ВО-21Е. Електродвигун типу АІР355S12 із потужністю 75 кВт.

При роботі вентиляторного агрегату у прямому режимі робоче колесо обертається із частотою від 250 до 500 об/хв. Напрямно-шиберальний апарат відкритий (режим I рис 5.3) при цьому забезпечується подача повітря в межах $Q_n = (64-110)$ м/с (рисунок 5.4) [43].

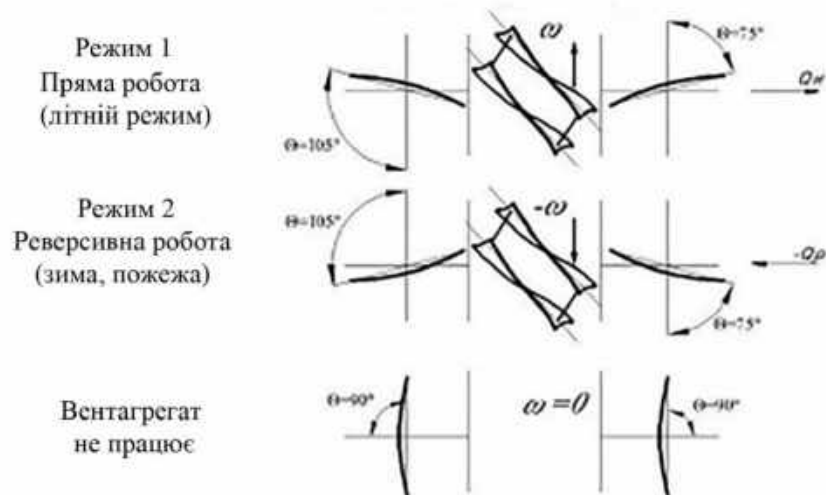


Рисунок 5.3 - Напрямки обертання РК та положення лопаток напрямно-спрямовуюче - шиберуючих апаратів

Для реверсування режиму або переходу на інший режим (літній – зимовий) ротор вентиляторного агрегату обертають у зворотному напрямку $\omega = (250 - 500)$ об/хв (режим II, рисунок 5.3) при цьому забезпечується продуктивність - $Q_p > 0,7 Q_n$ (рис 5.4). При непрацюючому вентиляторі $\omega = 0$ (режим III рис 5.3) шиберуючі апарати закриваються.

Оборотність режиму (зимовий, літній, аварійний при пожежі) виконуються шляхом зміни напрямку обертання робочого колеса, а так само зміною кутів установки спрямовуюче - напрямних апаратів.

Для прямої роботи в номінальному режимі при зміні частоти обертання робочого колеса від 500 об/хв до 250 об/хв продуктивність зміниться від 110 м/с до 26 м/с, а тиск - від 910 Па до 150 Па.

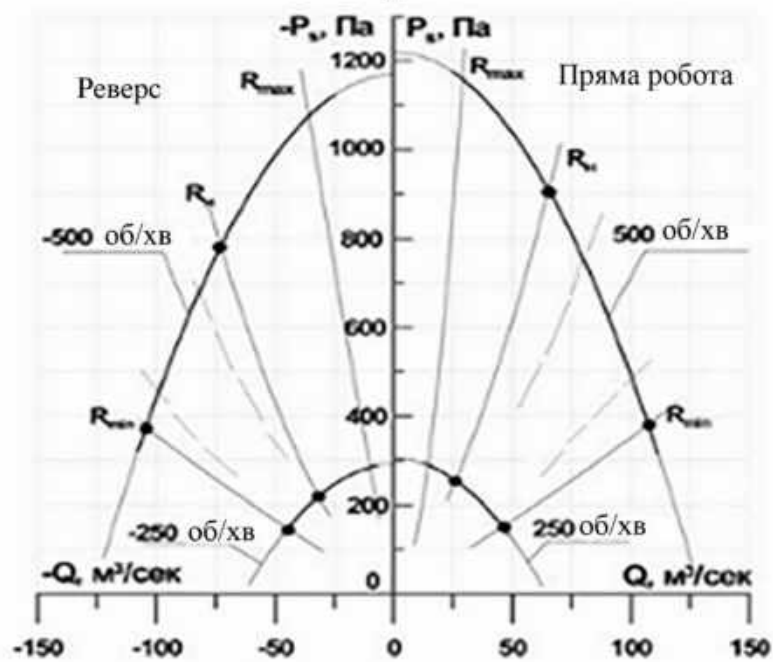


Рисунок 5.4 - Аеродинамічна характеристика

5.2 Вибір шафи автоматичного керування вентиляторами

Шафа автоматичного управління вентиляторами типу ШСАУВ (рисунок 5.5) призначена для управління роботою вентиляторами головного провітрювання метрополітенів та вентиляторами інших об'єктів.



Рисунок 5.5 - ШСАУВ

ШСАУВ забезпечує:

- розгін / зупинка вентилятора із заданим темпом та обмеженням струму
- роботу в режимі з заданою швидкістю обертання,
- зміна швидкості та напрямки обертання вентилятора,
- захист двигуна,
- керування жалюзі.

Працює разом із виконавчими (допоміжними) механізмами, температурними та іншими датчиками керованого вентилятора. Підтримує режими роботи як з одними жалюзі, так і з кількома, містить схему включення обігріву обмоток двигуна.

ШСАУВ можуть встановлюватися у підземних приміщеннях вентиляційних шахт та тунелів метрополітенів та є стійкими до зовнішніх впливів кліматичних факторів у виконанні V категорія розміщення 3 відповідно до ГОСТ 15150.

Переваги використання ШСАУВ

- обмеження пускового струму, струм залежить від темпу розгону вентилятора та моменту навантаження та не перевищує 1,2 номінального;
- керований розгін (зупинка): час розгону (зупинки) регулюється; це дає можливість кілька разів скоротити час переходу з одного режиму до іншого («приплив» - «витяжка», «витяжка» - «приплив»);
- регулювання швидкості обертання вентилятора (сім фіксованих швидкостей, значення яких можна змінювати під час налагодження);
- зміна продуктивності вентилятора без регулювання кута повороту лопаток робочого колеса, що полегшує його обслуговування;
- суттєва економія електричної енергії - при продуктивності 60% від номінальної, кількість електроенергії, що споживається, становить 27% від тієї, яка споживається в нерегульованому режимі;
- можливість включення на двигун вентилятора, що обертається.

Пристрій ШСАУВ

Система автоматичного керування вентиляторами складається з наступних функціональних систем:

- силовий схеми;
- системи оперативного управління, індикації та сигналізації;
- системи контролю та забезпечення вентилятором мікроклімату всередині шафи.

Силова частина ШСАУВ у своєму складі містить пристрій введення, вхідний фільтр, перетворювач частоти, з машинним dU/dt -фільтром, схеми системи управління виконавчими та допоміжними механізмами.

Перетворювач частоти служить живлення двигуна головного приводу вентилятора, забезпечуючи пуск, гальмування, реверс двигуна, обмеження струму (навантаження) двигуна.

Мікропроцесорна система управління перетворювача забезпечує захист:

- від короткого замикання;
- від замикання на землю;
- від навантаження;
- від перенапруг;
- від зниження напруги мережі чи зникнення фази;
- від заклинювання валу двигуна;
- від перегріву перетворювача та двигуна;
- від роботи двигуна із недовантаженням.

Машинний dU/dt -фільтр служить для зняття перенапруг та покращення форми напруги на двигуні.

Схеми управління виконавчими механізмами служать для управління допоміжними приводами вентилятора (жалюзі, лопатки, апарат, що спрямовує та ін), захисту сервоприводів від коротких замикань і перевантаження.

Система оперативного управління, індикації та сигналізації служить для

включення на приплив або на витяжку, відключення вентилятора, для управління жалюзі вентилятора, для сигналізації стану ШСАУВ у місцевому та дистанційному режимах.

Режими роботи

У ШСАУВ передбачено три режими керування вентиляторами:

- дистанційне автоматичне керування (ДАУ);
- місцеве автоматичне керування (МАУ);
- місцеве ручне керування (МУР).

Вибір режиму керування здійснюється перемикачем на три положення, розташованим на поворотній рамі всередині шафи.

В автоматичних режимах (ДАУ, МАУ) здійснюється автоматичне керування механізмами вентиляційної установки (приводом вентилятора та приводом виконавчого механізму).

У режимі МУР здійснюється роздільне керування приводом вентилятора та приводами допоміжних механізмів. Крім того, у режимі МУР можливе завдання швидкості двигуна значення вентилятора від 1 Гц. Все це може бути дуже корисно при проведенні пусконаладжувальних та ремонтних робіт, перевірки механіки двигуна та вентилятора.

Управління вентилятором та сигналізація станів системи автоматичного керування в режимі ДАУ можуть здійснюватися як за допомогою дискретних сигналів (клемники «Телеуправління» та «Телесигналізація»), так і за інтерфейсом CAN. При здійсненні управління та сигналізації за допомогою інтерфейсу CAN відбувається значна економія кабельно-провідникової продукції, т.к. всі ШСАУВ поєднуються в одну мережу, а для зв'язку з ними використовується інтерфейсний кабель (3 провідники).

Основні технічні дані

Основні технічні дані ШСАУВ наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Основні технічні дані ШСАУВ

Наименование параметра	Значение
1. Входное питающее напряжение ($U_{вх}$) трехфазное, с заземленной или изолированной нейтралью, В	$380^{+12}_{-13} \%$
2. Частота входного напряжения, Гц	$50 \pm 2 \%$
3. Периодичность подключения к сети	1 раз в минуту или реже
4. Номинальное выходное напряжение ($U_{ном}$) трехфазное, В	$380 \pm 2 \%$, но не более $U_{вх}$
5. Номинальная частота ($f_{ном}$) выходного напряжения, Гц	$50 \pm 1 \%$
6. Номинальная мощность ($P_{ном}$), управляемых вентиляторов, кВт	от 15 до 160
7. Перегрузка по току	$1,5 I_{ном} - 1 \text{ мин}$ за 10 мин
8. Диапазон регулирования выходного напряжения, В	$0 - U_{вх}$
9. Диапазон регулирования выходной частоты, Гц	0,5 - 50
10. Коэффициент полезного действия, не менее	0,95
11. Коэффициент нелинейных искажений сетевого тока не более	5%
12. Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP54
13. Срок службы не менее, лет	15
14. Среднее время восстановления не более, мин.	40
15. Помехоустойчивость	удовлетворяет всем требованиям стандартов

5.3 Вибір датчика для контролю швидкості та інтенсивності циркуляції потоку повітря

Для контролю швидкості та інтенсивності циркуляції потоку повітря вибираємо термоанемометр серії ТТМ-2 (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 - Термоанемометр серії ТТМ-2

Для регулювання роботи системи вентиляції рекомендується застосування стаціонарних приладів серії ТТМ-2, які оснащені комутаційними пристроями (реле). Ці модифікації термоанемометрів дозволяють здійснювати вимірювання та регулювання швидкості потоку повітря від пристроїв вентиляції одночасно

кількома каналами. Кількість каналів вимірювання та регулювання може бути будь-яким. На основі стаціонарних ТТМ-2 створюються багатосегментні системи контролю швидкості руху повітря на різних ділянках з виведенням всіх параметрів мережі на комп'ютер диспетчерського пункту.

Також для вимірювання швидкості потоку повітря від вентиляційних шахт використовуємо перетворювач швидкості повітряного потоку ТТМ-2-04-02 з цифровим та аналоговим вихідним сигналом (4 - 20, 0 - 5, 0 - 20 мА) (рисунок 5.7).



Рисунок 5.7 - Перетворювач швидкості повітряного потоку ТТМ-2-04-02

Переваги термоанемометрів серії ТТМ-2:

- широкий діапазон вимірюваних швидкостей потоку повітря;
- автоматичний вибір межі вимірів;
- індикація поточних значень параметрів вимірів;
- можливість протоколювання результатів вимірювань з подальшою передачею їх на комп'ютер за RS-232 (для портативних моделей) та RS-232, RS-485, USB (для стаціонарних моделей);
- додаткова індикація температури;
- у приладах передбачено можливість очищення пам'яті, що дозволяє стерти накопичену інформацію з пам'яті;
- наявність функції усереднення показань;

- у стаціонарних моделях можливість перерахунку швидкості потоку у витрату (методом площа-швидкість).

5.4 Вибір датчика для контролю температури та вологості

Для контролю температури та відносної вологості повітря в метрополітені вибираємо термогігрометри серії IBTM-7 (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 - Термогігрометри серії IBTM-7

До переваг термогігрометрів цієї серії відносяться:

- . рідкокристалічна та світлодіодна індикація показань;
- . можливість одночасної індикації 2-х вимірюваних величин на дисплеї;
- . можливість налаштування порогів сигналізації. Пороги – це верхня чи нижня межі допустимої зміни відповідної величини (температури, вологості). При порушенні порогового значення пристрій виявляє цю подію і на індикаторі з'являються символи. При відповідному налаштуванні приладу порушення порогів супроводжується звуковим сигналом;
- . реалізовано автоматичний запис вимірюваних значень в незалежну пам'ять у режимі реального часу. У портативних приладах пам'ять розрахована на 10000 результатів вимірів, у стаціонарних – до 30000 вимірів.
- . налаштування запису, перегляду, збереження даних здійснюється за допомогою програмного забезпечення;
- . реалізовано перерахунок результатів вимірювання вологості до різних

одиниць: % отн. вл., г/м³, 0С т.р., t вл.термометра;

- для всіх портативних приладів передбачена можливість кріплення до стіни;

- портативні прилади серії IBTM-7 характеризує мале енергоспоживання та тривалий час роботи від автономних елементів живлення;

- прилади легко об'єднуються у вимірювальну мережу з однотипних та різнотипних приладів з наступним виведенням параметрів мережі на комп'ютер. Ця можливість реалізується за допомогою спеціального програмного забезпечення NCServer та допоміжного обладнання (адаптерів, перетворювачів інтерфейсів, радіо-модему та ін.).

Побудова вимірювальної мережі на основі портативних термогігрометрів дозволяє не тільки зчитувати з індикатора поточні значення температури та відносної вологості в приміщеннях та тунелях метрополітену, а й у режимі on-line контролювати зміни параметрів мікроклімату на екрані ПК на пункті контролю.

Система на основі портативних приладів може бути організована з термогігрометрів наступних модифікацій:

Портативні термогігрометри IBTM-7M3 (з вбудованим адаптером для об'єднання у вимірювальну мережу). Прилади об'єднуються в мережу за допомогою кабелю між приладами та ПК (рисунок 5.9), сигнал передається через перетворювач ПІ-1М безпосередньо на ПК користувача.

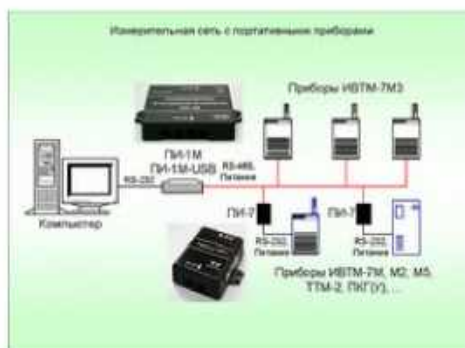


Рисунок 5.9 - Організація мережі між приладами

5.5 Вибір датчика для оцінки рівня концентрації шкідливих речовин

Для оцінки рівня концентрації шкідливих речовин у повітряному середовищі виробничих та пасажирських приміщень, тунелях застосовуються газоаналізатори. Вибираємо газоаналізатори серії ПКГ-4 (рисунок 5.10), які допоможуть оперативно оцінити концентрацію забруднюючих речовин та кисню.



Рисунок 5.10 - Газоаналізатор серії ПКГ-4

Ці прилади сигналізують про перевищення концентрації чадного газу, а також про знижений вміст кисню в повітрі робочої зони.

Переваги газосигналізаторів серії ТГС-3 та газоаналізаторів серій ПКГ-4:
селективність вимірів;

можливість вимірювань у рухомих та нерухомих газових середовищах;

малий час готовності приладу після включення;

реалізовано принцип взаємозамінності перетворювачів різного конструктивного виконання без додаткового перекалібрування приладу;

на корпусі вимірювального блоку стаціонарних приладів серії ПКГ-4 розташований роз'єм для підключення перетворювача тиску;

можливість регулювати (підтримувати на заданому рівні) концентрацію газів за допомогою вбудованих реле;

можливість встановлення двох порогів звукової та світлової сигналізації (верхній та нижній);

реалізована можливість роботи з комп'ютером за інтерфейсами RS-232, RS-485 та USB-портом;

можливість протоколювання результатів вимірів - стаціонарні прилади можуть проводити періодичну автоматичну запис виміряних значень в енергонезалежну пам'ять у режимі реального часу - до 30 000 точок вимірів, портативні - до 10 000 вимірів. Налаштування запису, перегляду, збереження даних здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Програми та їх опис поставляються за спеціальним замовленням;

можливість об'єднання приладів вимірювальну мережу з наступним виведенням параметрів мережі на комп'ютер. Ця можливість реалізується за допомогою спеціального програмного забезпечення та ряду допоміжного обладнання;

наявність у стаціонарних приладів аналогових виходів;

у стаціонарних газоаналізаторів можливість видалення перетворювача від вимірювального блоку приладу на відстань до 1000 м-коду без погіршення метрологічних характеристик.

5.6 Система керування вентиляційними агрегатами

На рис 5.11 представлено функціональну схему системи управління вентиляційними агрегатами.

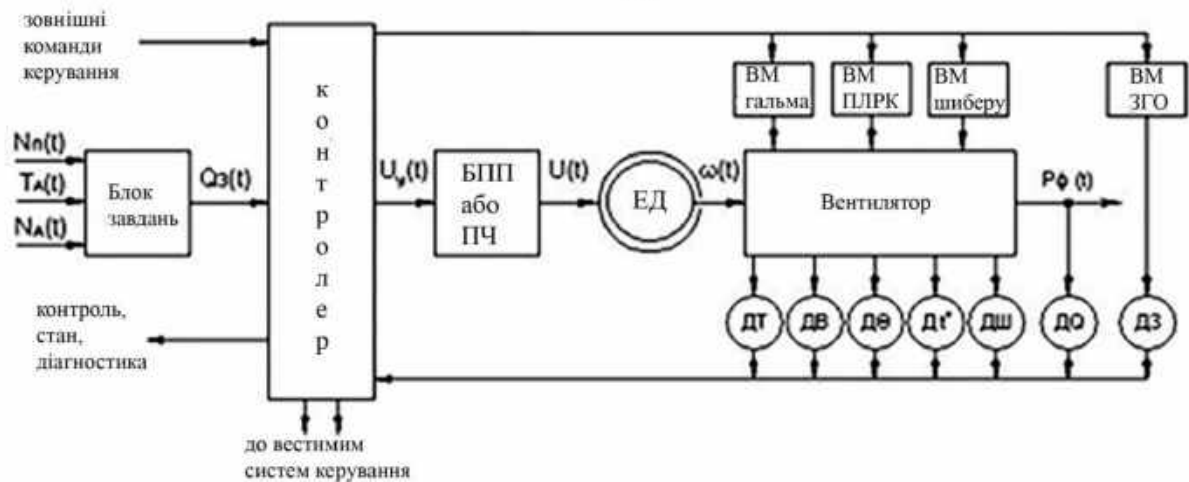


Рисунок 5.11 – Функціональна схема системи управління вентиляторними агрегатами

На рис. 5.11 прийнято такі позначення: $Nn(t)$ - кількість пар поїздів метрополітену, $TA(t)$ - температура атмосферного повітря, $NA(t)$ - кількість поїздів у тунелі, $Q3(t)$ - необхідну кількість повітря, $UY(t)$ - сигнал керування блоком плавного пуску (БПП) або перетворювачем частоти (ПЧ) електродвигуна (ЕД) тунельного вентилятора, $P\phi(t)$ - фактичний динамічний тиск вентилятора; $\dot{I}M$ гальма, $\dot{I}M$ ПЛРК, $\dot{I}M$ шиберу, $\dot{I}M$ ЗГО - виконавчі механізми, відповідно, гальмівного пристрою, повороту на ходу лопаток робочого колеса (при використанні ПЧ не встановлюється), шиберуючого апарату та затвора цивільної оборони; ДТ, ДВ, ДΘ, Дтo, ДШ, ДQ, ДЗ - датчики, відповідно, положення гальмівного пристрою, вібрації підшипників вентилятора, кутового положення лопаток робочого колеса (при використанні ПЧ не встановлюється), температури підшипників вентилятора, положення шиберуючого апарату становища затвора цивільної оборони.

Основними перевагами систем автоматичного керування вентиляторними є:

- застосування сучасних ефективних алгоритмів управління

вентиляторам;

- комплектація систем управління продукцією світових лідерів із виробництва мікропроцесорної та контрольно-вимірювальної техніки;

- можливість вибору найбільш ефективного способу регулювання продуктивності вентилятора (зміна кута установки лопаток робочого колеса, регулювання частоти обертання робочого колеса та ін.);

- модернізація існуючої системи управління вентиляторам та їх електроприводів із можливістю гнучкої зміни технологічних алгоритмів роботи.

Розділ 6. Дослідження динаміки системи керування

На рис 6.1 представлено функціональну схему системи вентиляції:

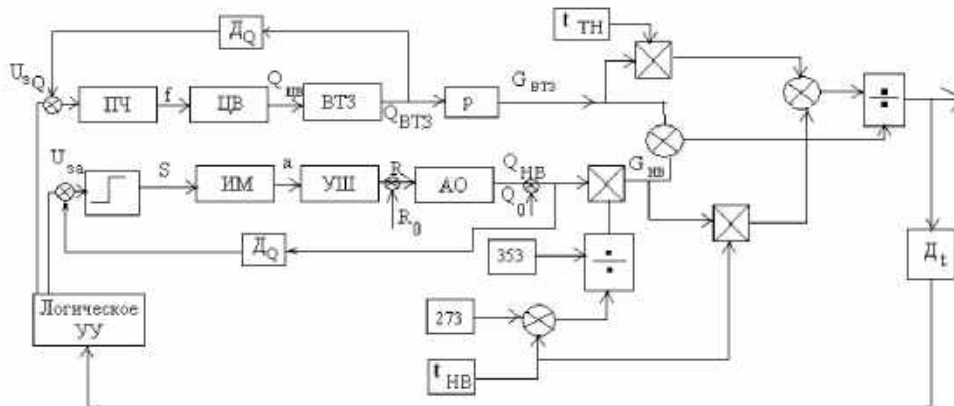


Рисунок 6.1 – Функціональна схема системи вентиляції

Регулятор витрати повітря за сигналом завдання необхідної витрати повітря U_{3Q} і сигналом зворотного зв'язку з датчика витрати повітря U_{Q1} подає команду на перетворювач частоти. Перетворювач частоти змінює частоту обертання валу вентилятора, тим самим регулює витрату повітря $Q(t)$, що подається до ВТЗ. У калориферній установці повітря нагрівається до температури 50°C і надходить у повітряно-теплову завісу [44].

Повітряні завіси відомі в літературі як технологічна конструкція, що обмежує або повністю ліквідує перетікання повітря з одного простору в інший через відкритий отвір, який технологічно не може бути закритий.

Зокрема, в зимовий час повітряними завісами можна значно зменшити і навіть ліквідувати проникнення холодного зовнішнього повітря через відкритий отвір до приміщення.

За схемою дії повітряна завіса є ніби повітряним шибром, що закриває плоским струменем відкритий отвір і тим самим повністю або частково захищає його його зовнішніми потоками повітря.

В окремих випадках при дуже близькому розташуванні (70 м) станції або службових приміщень глухих кутів від порталу для завіси використовується зовнішнє повітря, яке додатково підігрівається.

Повітровипускна щілина є вузьким насадком, спрямованим назустріч потоку зовнішнього повітря під кутом $45^\circ - 30^\circ$ до площини перерізу тунелю, з внутрішніми перегородками на відстані між собою, що дорівнює ширині щілини.

Передачу функцію повітряно-теплової завіси в першому наближенні можна подати у вигляді аперіодичної ланки (рисунк 6.2).

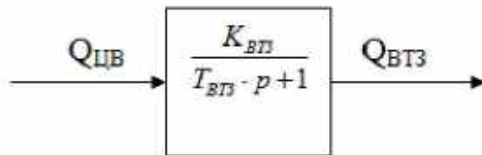


Рисунок 6.2 – Структурна схема ВТЗ

Коефіцієнт передачі КВТЗ розраховується за такою формулою:

$$K_{BTZ} = \frac{Q_{цв}}{Q_{BTZ}}$$

$$K_{BTZ} = \frac{19,4 \frac{M^3}{c}}{19,4 \frac{M^3}{c}} = 1$$

Постійна часу ТВТЗ дорівнює 2 сек.

Передатна функція ПЧ запишеться у такому вигляді:

$$W(p) = K_{пч} \cdot \frac{K_j}{p \cdot T_j + 1}$$

де $K_{пч}$ - Коефіцієнт перетворювача частоти, K_j - коефіцієнт передачі, який характеризує ступінь зміни швидкості вентилятора при зміні частоти струму статора двигуна, T_j - постійна часу, що характеризує інерційність розгону вентилятора.

$K_{ПЧ}$ визначається за співвідношенням:

$$K_{ПЧ} = \frac{f_{\max}}{U_{3f\max}} = \frac{50 \text{ Гц}}{10 \text{ В}} = 5 \frac{\text{Гц}}{\text{В}}$$

$f_{\max}$ - максимальна частота струму статора, $U_{3f\max}$ - максимальна напруга, що подається з пристрою керування.

Розрахуємо K_j за формулою:

$$K_j = \frac{\omega_{В\max}}{f_{\max}}$$

де $\omega_{В\max}$ - максимальна частота обертання вентилятора, яка дорівнює:

$$\omega_{В\max} = 720 \text{ об / мин} = \frac{720 \cdot 6,28}{60} \text{ рад / сек} = 75,36 \text{ рад / сек}$$

Тоді K_j дорівнюватиме:

$$K_j = \frac{75,36 \text{ рад / сек}}{50 \text{ Гц}} = 1,507 \frac{\text{рад} \cdot \text{Гц}}{\text{сек}}$$

Постійна часу T_j визначається за виразом $t_{\text{пр}} = (3 \div 5) T_{\text{пр}}$ виходячи з фактичного часу розгону двигуном вентилятора, який становить $T_{\text{розгін}} = 10$ сек. Тому:

$$T_j = \frac{T_{\text{розгон}}}{t_{\text{пр}}} = \frac{10 \text{ сек}}{3} = 3,33 \text{ сек}, \quad T_j = 3 \text{ сек.}$$

Передатна функція перетворювача частоти подається у вигляді:

$$W(p) = \frac{K_{ПЧ} \cdot K_j}{T_j \cdot p + 1}$$

На рис 6.3 представлена математична модель перетворювача частоти та асинхронного двигуна.

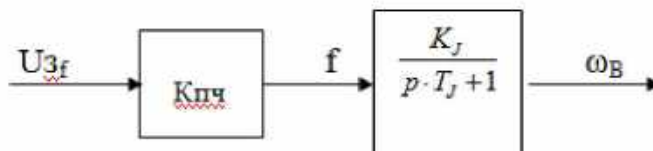


Рисунок 6.3 - Математична модель перетворювача частоти та

асинхронного двигуна.

При регулюванні продуктивності вентилятора об'єктом управління (ОУ) є повітряно-теплова завіса, що регулюється величиною - витрата повітря, регулюючим впливом - частота обертання електродвигуна. За розглянутими вище математичними моделями ланок, що входять до системи управління повітряно-тепловою завісою, складено структурну схему (рисунок 6.4).

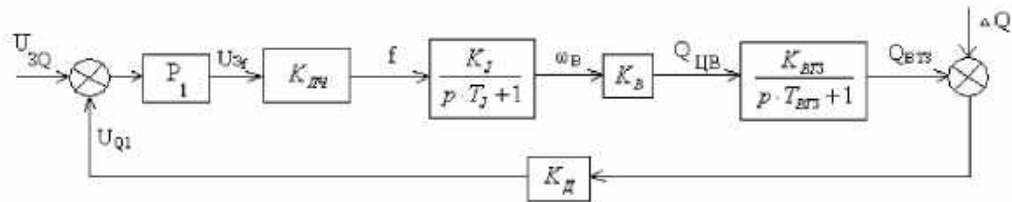


Рисунок 6.4 – Структурна схема САУ ВТЗ

Запишемо передавальні функції для всіх ланок:

$$\begin{cases} W_B(p) = \frac{Q_B(p)}{\omega_B(p)} = K_B; \\ W_{пч}(p) = \frac{f(p)}{U_{3f}(p)} = K_{пч}; \\ W_f(p) = \frac{\omega_B(p)}{f_1(p)} = \frac{K_f}{p \cdot T_f + 1}; \\ W_{вгз}(p) = \frac{K_{вгз}}{p \cdot T_{вгз} + 1}; \\ K_d = \frac{U_{Q1}}{Q_{вгз\max}} \end{cases}$$

$$K_{вгз} = \frac{Q_{лв\max}}{Q_{вгз\max}}$$

Коефіцієнти мають такі значення:

$$K_{пч} = 5 \frac{\Gamma\mu}{B}; \quad K_f = 1,507 \frac{\text{рад} \cdot \Gamma\mu}{\text{сек}}; \quad T_f = 3 \text{ сек};$$

$$K_d = 0,515 \left[\frac{B \cdot c}{M^3} \right]; \quad K_{вгз} = 1; \quad K_B = 1,819 \frac{M^3}{\text{рад}}; \quad T_{вгз} = 2 \text{ сек}$$

Передатна функція (без урахування збурень) має вигляд:

$$W_{oy}(p) = \frac{K_{пч} \cdot K_j \cdot K_B \cdot K_{БТЗ} \cdot K_D}{(p \cdot T_j + 1) \cdot (p \cdot T_{БТЗ} + 1)}$$

Система автоматичного управління шиберами містить такі елементи: регулятор (Р2), виконавчий механізм (ІМ) з безконтактним реверсивним пускачем (ПБР), шибери (УШ), що управляються, аеродинамічний об'єкт, датчик витрати повітря.

Регулятор (Р2) за сигналом завдання необхідного кута нахилу шиберів U_z і сигналу зворотного зв'язку з датчика U_{Q2} подає команду на ПБР на включення ІМ вперед або назад. ПБР формує сигнал керування U_U виконавчим механізмом. ІМ змінює кут повороту шиберів.

При цьому в тунелі змінюється витрата повітря $Q_{НВ}$, що контролюється датчиком витрати повітря. На рис 6.5 представлено функціональну схему САУ УШ.



Рисунок 6.5 – Функціональна схема САУ УШ

Узагальнена математична модель системи управління рухомими шиберами представлена на рис. 6.6.

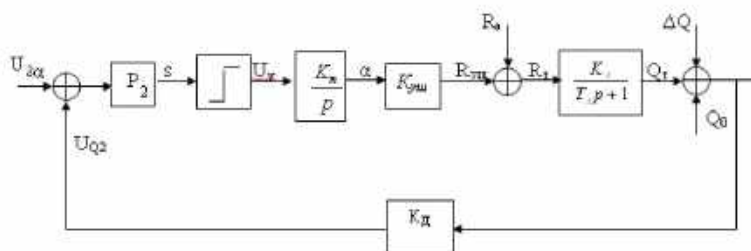


Рисунок 6.6 - Узагальнена математична модель системи керування рухомими шиберами

Розрахунок динаміки проводився в Matlab Simulink.

Дослідження системи без регулятора, математичну модель якої наведено на рис. 6.7.

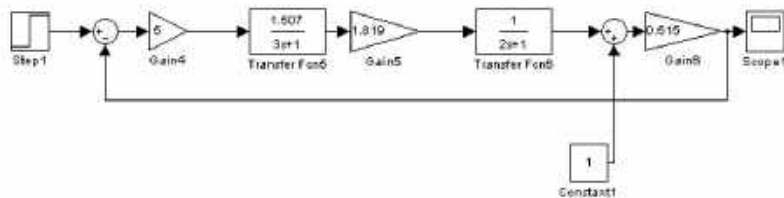


Рисунок 6.7 – Структурна схема системи без регулятора

Результати моделювання представлені на рис 6.8:

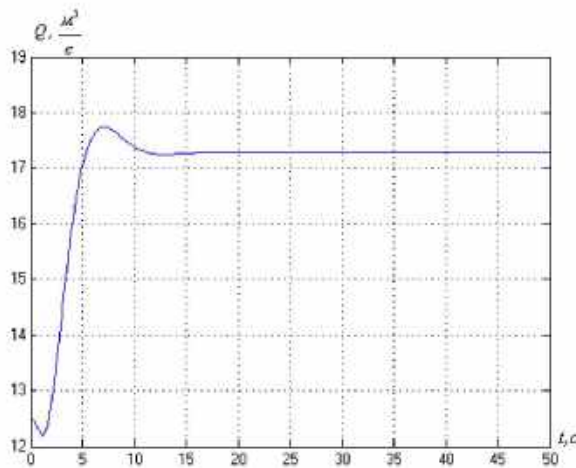


Рисунок 6.8 - Перехідний процес у замкнутій системі без регулятора при постійному впливі, що збурює

При змінному впливі, що обурює, графік перехідного процесу представлений на рис 6.9:

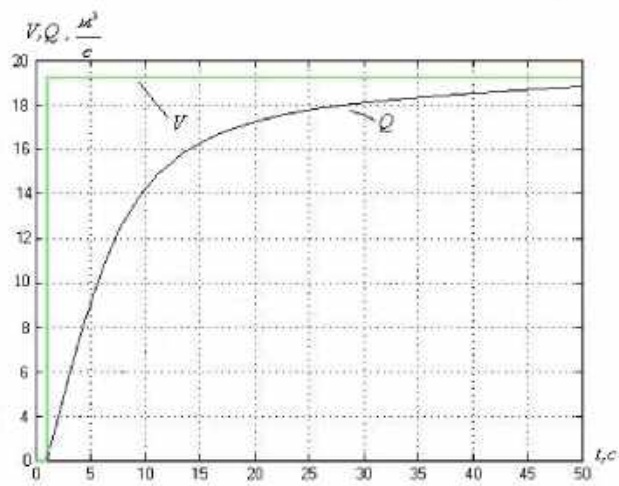


Рисунок 6.11 - Перехідний процес у замкнутій системі з регулятором

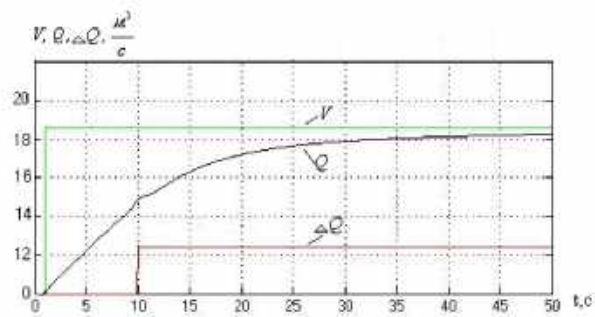


Рисунок 6.12 - Перехідний процес у замкнутій системі з впливом, що збурює, зумовленим поршневим ефектом.

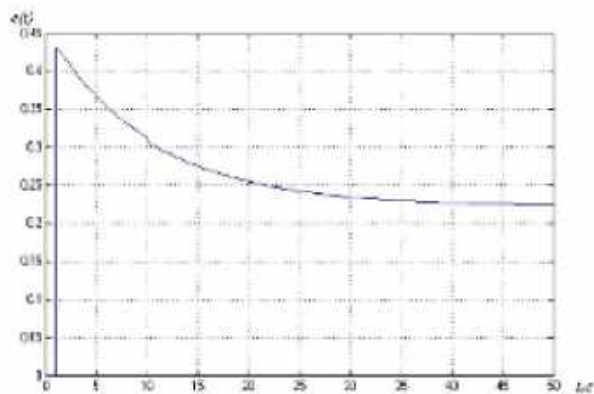


Рисунок 6.13 - Статична помилка у системі

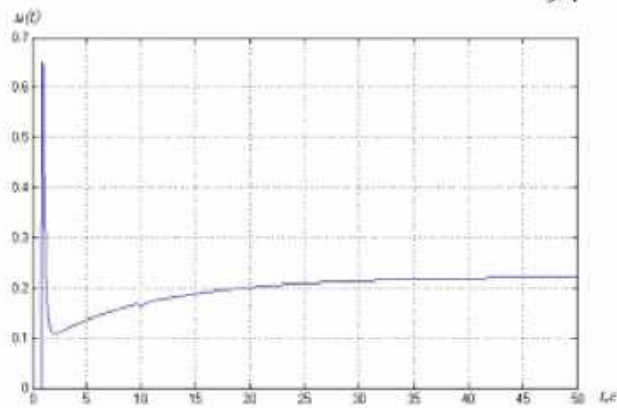


Рисунок 6.14 - Керуючий вплив

З результатів видно, що перехідний процес у замкнутій системі відповідає заданим вимогам.

Результати моделювання перехідних процесів по впливу, що збурює, представлені на рис 6.15 - 6.18.

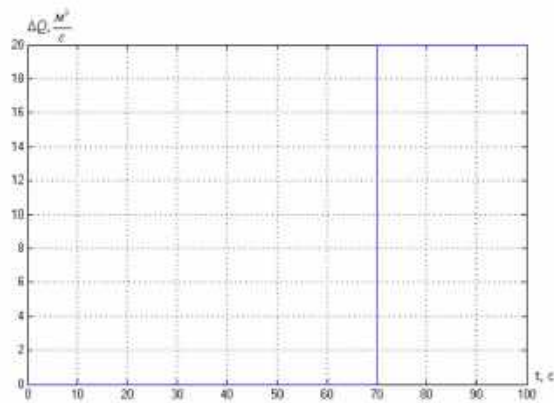


Рисунок 6.15 - Графік впливу, що збурює

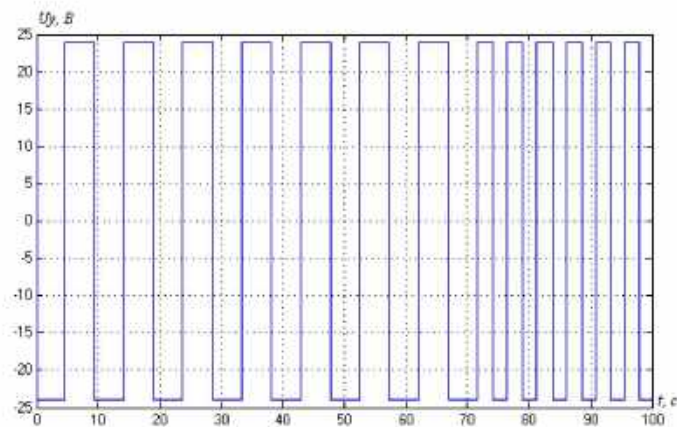


Рисунок 6.16 - Графік впливу, що управляє, при дії збурення

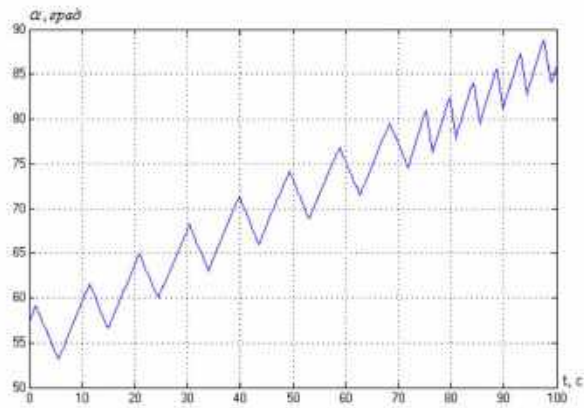


Рисунок 6.17 - Графік кута нахилу шиберів під час збурення

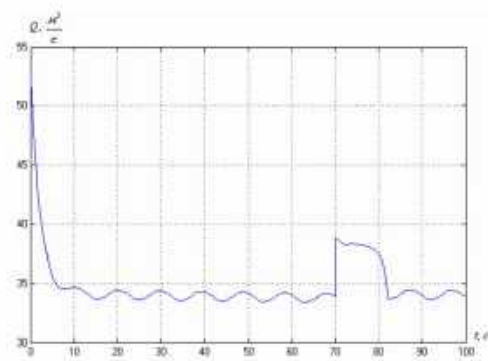


Рисунок 6.18 - Графік витрати повітря на вибраній ділянці вентиляційної мережі метрополітену

Висновки

У магістерській роботі розглянуто особливості вентиляційної мережі Харківського метрополітену, визначено вимоги до мікроклімату.

Здійснено синтез алгоритмів управління витратою повітря у тунелі метрополітену. Синтез системи управління шиберами зроблено з організацією ковзного режиму. Наведено результати чисельного моделювання.

Розраховано та вибрано елементи системи управління вентиляційної установки.

Проведено дослідження динаміки оптимізованої системи вентиляційної установки. Подано поелементний опис системи управління продуктивністю вентилятора повітряно-теплової завіси та системи управління шиберами, встановленими в тунелі метрополітену.

Список використаних джерел

1. Бучма І.М. Мікропроцесорні пристрої Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 236 с.
2. Sushabhan Choudhury. ZigBee and Bluetooth Network based Sensory Data Acquisition System [Електронний ресурс] / Sushabhan Choudhury, Piyush Kuchhal, Rajesh Singh. – doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195 – P. 367-372.
3. Kyung Sup Kwak. An Overview of IEEE 802.15.6 Standard" [Electronic resource] / Kyung Sup Kwak, Sana Ullah, Niamat Ullah // 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010), 7-10 Nov., 2010. – Rome, Italy. – DOI: 10.1109/ISABEL.2010.5702867.
4. Sushabhan Choudhury. ZigBee and Bluetooth Network based Sensory Data Acquisition System [Електронний ресурс] / Sushabhan Choudhury, Piyush Kuchhal, Rajesh Singh. – doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195 –P. 367-372.
5. IEEE 802.11 ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi / Nitsche, T., Cordeiro, C., Flores, A. B., Knightly, E. W., Perahia, E., & Widmer, J. C. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – 52 (12). – Pp. 132-141.
6. IEEE 802.11 ad: A standard for TV white space spectrum sharing / Flores, A. B., Guerra, R. E., Knightly, E. W., Ecclesine, P., & Pandey, S. // IEEE Communications Magazine. – 2013. – 51 (10). – Pp. 92-100.
7. Галай В.М. Теорія оптимальних систем автоматичного керування технологічними процесами: монографія/ В.М.Галай, К.Х.Зеленський, А.М. Сільвестров. – Полтава: ПНТУ, 2009. – 153 с.
8. Жлуктенко В. І. Економетрія/В. І. Жлуктенко, Н.К. Водзянова, С. С. Савіна, О. В. Колодінська (під ред. С. І. Наконечного). – Київ:

Видавництво Європейського університету, 2005. – 550 с.

9. Зеленський К. Х. Комп'ютерні методи прикладної математики / К. Х. Зеленський, В. М. Ігнатенко, О. П. Коц. — Київ: Академперіодика, 2002. – 480 с.
10. Івахненко О. Г. Довгострокове прогнозування та керування скланими системами/О.Г. Івахненко. – Київ: Техніка, 1975. –250 с.
11. Нестеренко О.В., Ковтунець О.В., Фаловський О.О. Інтелектуальні системи і технології. Ввідний курс/ О.В.Нестеренко, О.В. Ковтунець, О.О. Фаловський. – Київ:Національна академія управління, 2017. – 90 с.
12. Островерхов М.Я. Методи дослідження електротехнічних комплексів і систем/М.Я. Островерхов, А.М. Сільвестров, К.Х. Зеленський/К.: ТАЛКОМ, 2019. - 300 с.
13. Самсонов В. В., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання/Київ, НУХТ, 2022. – 385 с.
14. Сільвестров А. М. Багатократно адаптивні системи ідентифікації / А. М. Сільвестров, О. М. Паченко.– К. : Техніка, 1983. – 110 с.
15. Антонюк В. С. Методологія наукових досліджень: Навч. посіб./В.С.Антонюк, Л. Г. Полонський, В. І. Аверченков, Ю. А. Малахов. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2015. – 274 с.
16. Бідюк П.І. Методи прогнозування/П. Бідюк,О. Меньяйленко, О.Половцев. – Т 2. – Луганськ : Альма-матер, 2008. – 305 с.
17. Важинський С.Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень: Навч. посіб. /С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. –260 с.
18. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>
19. Дубовський С.В. Техніко-економічні оцінки перспективних

- природоохоронних технологій теплової енергетики України / С.В. Дубовський, В.С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. –2013. – No 2(33). –С. 49-56.
20. Залознова Ю.С. Економічні та соціальні проблеми розвитку промисловості: монографія / Ю.С. Залознова; НАН України, Інститут економіки промисловості. –Київ, 2017. –288 с.
 21. Іщук С.І., Гладкий О.В. Техніко-економічні основи промислового виробництва: навч. посібник. – К.: Академія, 2011. – 296 с.
 22. Артюх С.Ф. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / С.Ф.Артюх, М.А.Дуель, І.Г.Шелепов. –Харків, "Знання", –2001 р., –416 с.
 23. Дуель М.О. Автоматизовані системи управління технологічними процесами енергоблоків теплових електростанцій (розробка, дослідження, впровадження): автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / М.О. Дуель. –Харків, 1998. –36 с.
 24. Савицький В. Технічні засоби автоматизації. - Львівська політехніка, 2018, -292с.
 25. Ельперін І.В. Автоматизація виробничих процесів. -Ліра-К, 2017, -378с.
 26. Ладанюк А. П.- Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування). Ліра-К, 2016, -312с.
 27. Автоматизація технологічних процесів. Синеглазов В.М., Сергеев І. Ю. - Київ, 2015, -444с.
 28. Автоматизація виробничих процесів. Підручник. Ельперін І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М. -Ліра К, 2017, -378с.
 29. Основи автоматики та автоматизації, Пістун Є.П., Стасюк І.Д. - Львівська

політехніка, 2018, -336с.

30. Теоретичні основи автоматики. Корчемний М.О., Клендій П.Б., Потапенко М.В. -Богдан НК, 2012, -304с.
31. Технології проектування комп'ютерних систем. Б.І. Масловський, В.І. Дрововозов, О.В. Коба. -Київ, 2015, -500с.
32. Обладнання автоматизованого виробництва Бочков В. М., Сілін Р. І., - Львівська політехніка. 2015, -404с.
33. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. - Львівська політехніка, 2020, -220с.

101
ВІДГУК

**наукового керівника кваліфікаційної роботи
рівня вищої освіти “магістр”**

виконаного на тему: **Дослідження та оптимізація системи керування
вентиляцією метрополітену**

студентом (кою) **Іщенко Наталія Володимирівна**

(прізвище, ім'я)

Студент Іщенко Наталія Володимирівна виконала магістерську роботу на тему “Дослідження та оптимізація системи керування вентиляцією метрополітену” повністю відповідно до завдання. Робота присвячена актуальному питанню дослідження та удосконалення систем автоматичного моніторингу та прогнозування та дослідженню питання їх ефективності в різних режимах роботи. Студент Іщенко Наталія Володимирівна працювала над роботою систематично, докладно вивчав рекомендуєму літературу, і правильно застосовував отримані знання.. Всі елементи схем в записці відповідають вимогам до розмірів умовних графічних позначень в електричних системах.

Робота має практичну значимість та наукову цінність

У цілому робота виконана грамотно, акуратно, основні цілі роботи досягнуті, а поставлені завдання виконані. Робота заслуговує оцінки “відмінно”.

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ к.т.н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

Андрій МЕЗЕРЯ

(ім'я, прізвище)

РЕЦЕНЗІЯ**на кваліфікаційну роботу****“Магістр” рівня вищої освіти**

виконаний(у) на тему: **Дослідження та оптимізація системи керування вентиляцією метрополітену**

студентом (кою) **Іщенко Наталія Володимирівна** _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

Студент Іщенко Наталія Володимирівна виконала магістерську роботу на тему “Дослідження та оптимізація системи керування вентиляцією метрополітену” повністю відповідно до завдання.

В роботі проведено дослідження та удосконалення систем автоматичного керування вентиляцією метрополітену. В якості об'єкта обрано харківський метрополітен, що особливо актуально в умовах воєнного стану. Визначені основні фактори, які впливають на якість вентиляції та показники якості систем керування. Визначені недоліки застосування систем керування вентиляцією метрополітену, а також критерії їх ефективного використання.

Робота присвячена актуальному питанню підвищення ефективності систем керування. Це питання має високу практичну значимість, тому що енергозбереження та надійність є на сьогодні основним напрямком розвитку України. Вирішення цього питання дозволяє не тільки заощаджувати кошти на додатковому виробництві електроенергії, но і поліпшити умови санітарно-гігієнічних умов на станціях метрополітену.

Робота має практичну значимість та наукову цінність.

Робота виконана на актуальну тему і відбиває високу інженерну підготовку автора.

Па роботі є наступні зауваження:

Варто розглянути питання якості повітря та вплив зміни щільності на показники якості регулювання

У цілому робота виконана акуратно, грамотно та заслуговує оцінки «відмінно».

Рецензент

К.Т.Н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

Павло БУДАНОВ

(ім'я, прізвище)

