

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Дементьєв Сергій Юрійович**

УДК 618.31.05

**КОНТРОЛЬ ВИТРАТ ПОВІТРЯ В КАНАЛАХ ІЗ ВЕЛИКИМ ПОПЕРЕЧНИМ  
ПЕРЕРІЗОМ**

Спеціальність 05.11.13 - Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця - 2009

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
**Кветний Роман Наумович**,  
Вінницький національний технічний університет, завідувач  
кафедри автоматики та інформаційно-виміральної  
техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Квасніков Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет, завідувач кафедри  
інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор, **Осадчук**  
**Володимир Степанович**,  
Вінницький національний технічний університет, завідувач  
кафедри електроніки

Захист відбудеться " 13 " 03 2009 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розіслано " 12 " 02 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Павлов С. В.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Процеси перебігу газів займають важливе місце в життєдіяльності людини. Це зумовлюється тим, що наша планета оточена газовим простором. У промисловості, сільському господарстві, енергетиці та в інших областях для роботи різноманітних механічних, пневматичних та інших пристроїв використовуються гази, у тому числі повітря, тому є таким важливим забезпечити його вимірювання і контроль. Відповідно постійно існує задача створення надійних і точних приладів контролю витрат газів. Для контролю використання газів у більшості країн Європи все більше використовуються лічильники повітря із відносно похибкою від 0,5 до 1 відсотка. Впровадження таких лічильників в Україні стримується внаслідок їх високої вартості, а також відсутності робочих еталонів для перевірки лічильників (витратомірів) на великі об'ємні витрати.

Гірничо-видобувна промисловість України, особливо видобуток залізної руди та кам'яного вугілля, складає сьогодні важливу частку національної економіки. При видобутку руди та вугілля потрібно здійснювати примусову вентиляцію шахт, що знаходяться на глибині більше 1000 метрів. При цьому потрібно контролювати витрату повітря, яке надходить у шахту, та визначати його об'єм при стандартних умовах. Існуючі методи контролю базуються на визначенні витрат за потужністю нагнітальних вентиляторів, або за допомогою вимірювання депресії у вентиляційному каналі – такі підходи не забезпечують достатньої точності.

З метою удосконалення вузлів обліку, підвищення рівня достовірності показань вимірювання об'єму газу для забезпечення ефективності його використання потрібно створювати сучасні прилади для вимірювального контролю газів та підвищувати точність вимірювання, шляхом впровадження сучасних технологій та вдосконаленням існуючих методів контролю.

Україна займає одну з провідних позицій в науковому світі серед розробників первинних перетворювачів та методів контролю витрат газів завдяки роботам відомих науковців Беляєва М.М., Володарського Є.Т., Кремлевського П.П., Кухарчука В.В., Лобачева П.В., Осадчука В.С., Пістуна Є.П., Поджаренка В.О., Цейтлина Ю.А. та інших.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2005-2008рр. за планами наукових робіт кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки ВНТУ та ПП «Енергооблік-сервіс» на замовлення ВАТ «Суша балка» м. Кривий Ріг. Дослідження також відповідають пріоритетним науковим напрямкам України. Програмі розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу на період до 2011 року, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 28 липня 2004 р. №967, та програмі розвитку промисловості України на 2003-2011 роки відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 28 липня 2003 р. № 1174.

**Мета і завдання дослідження.** Підвищення вірогідності вимірювального контролю витрат повітря у каналах із великим поперечним перерізом шляхом вдосконалення методу максимальної швидкості та засобу вимірювання на основі напірної трубки.

Відповідно поставленій меті потрібно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів вимірювання витрат газів та вибрати напрямок досліджень;
- дослідити фізичні характеристики, особливості контролю у вентиляційному каналі шахти;
- проаналізувати існуючі прилади контролю витрати газів;
- розробити математичну модель та визначити метод вимірювання миттєвої витрати повітря у вентиляційному каналі;
- обґрунтувати вибір первинних вимірювальних перетворювачів для контролю витрати повітря;
- розробити первинний перетворювач для контролю швидкості потоку повітря у каналі;
- розробити структурну схему та алгоритм роботи приладу контролю витрати повітря;

- вдосконалити метрологічне забезпечення для градуювання первинного перетворювача швидкості потоку повітря.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірюваного контролю витрат повітря у каналах із великим поперечним перерізом.

**Предметом дослідження** є методи та засоби контролю витрат повітря у вентиляційному каналі шахти.

**Методи досліджень** базуються на використанні:

- рівнянь математичної фізики для розроблення математичних моделей;
- основних положень і теорій руху газів в закритих каналах для побудови моделі визначення середньої швидкості;
- оброблення статистичних даних експериментів при випробовуваннях приладу;
- обчислювальних методів для створення спрощених рівнянь визначення параметрів на основі табличних даних;
- теорії ймовірності для оцінки невизначеності вимірювання та вірогідності контролю.

**Наукова новизна одержаних результатів** складається з таких запропонованих, або отриманих в результаті дослідження автором пунктів:

1. Удосконалено математичну модель вимірювання витрат повітря, яка враховує підвищену вологість, шорсткість стінок каналу та характер потоку повітря, що дозволило підвищити точність вимірювання витрат, спростити визначення коефіцієнта стисливості та динамічної в'язкості повітря і підвищити вірогідність контролю до значення 0,953.
2. Удосконалено метод контролю витрат повітря у каналах із великим поперечним перерізом, який відрізняється тим, що як первинний вимірювальний перетворювач запропоновано єдину напірну трубку з індивідуальним коефіцієнтом градуювання, що дозволило механічно не змінювати переріз вентиляційного каналу та забезпечити вимірювання швидкості повітря із похибкою, яка не перевищує 0,5%.
3. Вперше запропоновано метод автоматизованого градуювання і повірки напірних трубок на атестованій повірочній установці УПЛГ-2500, який дозволяє виконувати градуювання та повірку напірних трубок тими ж засобами, що й при повірці механічних лічильників природного газу.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- запропоновано спосіб роботи обчислювача для вимірювального контролю витрат повітря, який на відміну від аналогів дозволяє автоматично визначати прямий та зворотній напрямку руху потоку повітря у вентиляційному каналі шахти.
- розроблено та впроваджено прилад контролю витрат повітря із покращеними метрологічними характеристиками (невизначеність вимірювання становить 0,0183, а вірогідність контролю дорівнює 0,953);
- розроблено прилад, який у поєднанні з атестованою повірочною установкою УПЛГ-2500 дозволяє виконувати градуювання та повірку напірних трубок тими ж апаратними засобами, що й при повірці механічних лічильників природного газу;
- розроблено первинний вимірювальний перетворювач – напірну трубку з підвищеною чутливістю та можливістю визначення напрямку руху потоку повітря;
- розроблено пакети прикладних програм для математичного середовища MathCAD, які дозволяють виконувати розрахунки та моделювати характеристики повітря у каналах із великим поперечним перерізом.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, що опубліковані у співавторстві здобувачу належать такі ідеї та розробки:

- методика визначення коефіцієнта напірної трубки [3];
- структура та алгоритм роботи пристрою для забезпечення його інформаційної надійності [6];
- формула розрахунку параметрів для елементів вводу даних [13];

- характеристики можливих режимів роботи пристрою, а також алгоритм роботи пристрою вимірювання швидкості повітря [14].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, що розглядаються у даній роботі, пройшли апробацію на таких науково-технічних конференціях: I Міжнародної конференції „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” (м. Вінниця, 2005); IV Міжнародній науково-практичній конференції „Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” (м. Хмельницький, 2005); II науково-технічній конференції з міжнародною участю „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (м. Кременчук, 2006); XIII Міжнародній конференції з автоматичного управління „Автоматика-2006” (м. Вінниця, 2006); III-й Міжнародній науково-технічній конференції "Датчики, прилади і системи - 2007" (м. Черкаси 2007);

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 14 праць, в тому числі 8 статей надруковано у фахових виданнях, затверджених ВАК України, 4 публікації у збірках матеріалів та тез доповідей та 2 патентах України на корисну модель.

**Структура то об’єм дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг наукової роботи 162 сторінок, з яких основний зміст викладено на 119 сторінках друкованого тексту. Наукова робота містить 13 таблиць та 43 рисунка. Список використаних джерел складається з 137 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність задач, що вирішуються в дисертаційній роботі, визначено об’єкт і предмет дослідження. Зазначено зв’язок роботи з науковими планами і темами, сформульовані мета і задачі роботи. Визначено методи дослідження, їх наукова новизна, а також практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено порівняльний аналіз та подано систематизацію методів та засобів контролю витрати повітря які теоретично можливо застосувати для даної задачі. Це зроблено з метою виявлення доцільності застосування кожного з них при автоматизованому контролі витрати повітря в реальному часі.

Порівнювалися найбільш поширені на сьогодні засоби вимірювання, а саме: витратоміри на основі звужуючих пристроїв, турбінні витратоміри та лічильники, ультразвукові витратоміри, вихрові витратоміри, напірні та усереднюючі трубки. Дані методи базуються на перетвореннях енергії потоку, і на відміну від теплових, міточних, кореляційних та оптичних методів знаходять широке використання, є простими у використанні та мають високу точність (в середньому 0,5-1%), хоча і не завжди є універсальними.

Висвітлено сучасний стан об’єкта дослідження – контроль витрат повітря у вентиляційному каналі гірничодобувної шахти, де на практиці найчастіше використовують ручні анемометри типу АСО-3, МС-13 або АПР-1. Автоматизація вимірювання та контролю практично відсутня, а існуючі засоби не в змозі забезпечити точне вимірювання середньої швидкості потоку що відповідно впливає на визначення витрати об’єму повітря.

Розглянуто особливості контролю та специфіка роботи вентиляційного каналу гірничевидобувної шахти (рис. 1) де потрібно контролювати витрату повітря. Канал насамперед призначений для вентиляції шахти — викачуванні шахтного повітря з шахти на поверхню де присутня висока вологість до 100 відсотків через підхоплення повітрям вологи із забою. Технологією передбачено також реверсивний режим — швидка подача атмосферного повітря в шахту.

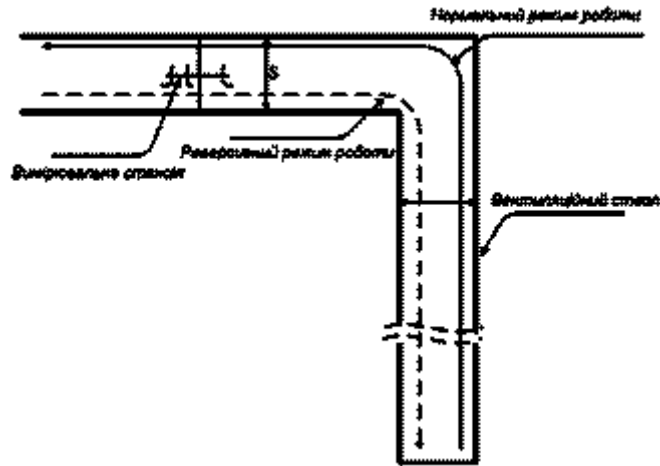


Рис. 1. Схема вентиляційного каналу гірничевидобувної шахти

Поставлено задачі по вимірюванню та контролю витрат повітря у вентиляційних каналах із великим поперечним перерізом, які дозволили розробити точні математичні моделі для визначення коефіцієнта стисливості повітря та його динамічної в'язкості, розробити метод розрахунку середньої швидкості потоку, визначити функціональні блоки приладу контролю та вдосконалити метод вимірювання витрат.

**Другий розділ** присвячено розробці математичних моделей які мають безпосередній вплив на вимірювання миттєвої втрати повітря. Насамперед було побудовано математичні моделі для визначення динамічної в'язкості повітря  $\mu$ , а також коефіцієнту стисливості повітря  $k$ . Динамічна в'язкість враховується при розрахунку числа Рейнольдса. Графіки отриманих залежностей даних коефіцієнтів від впливових параметрів – температури та тиску приведено відповідно на рис. 2 та рис. 3.

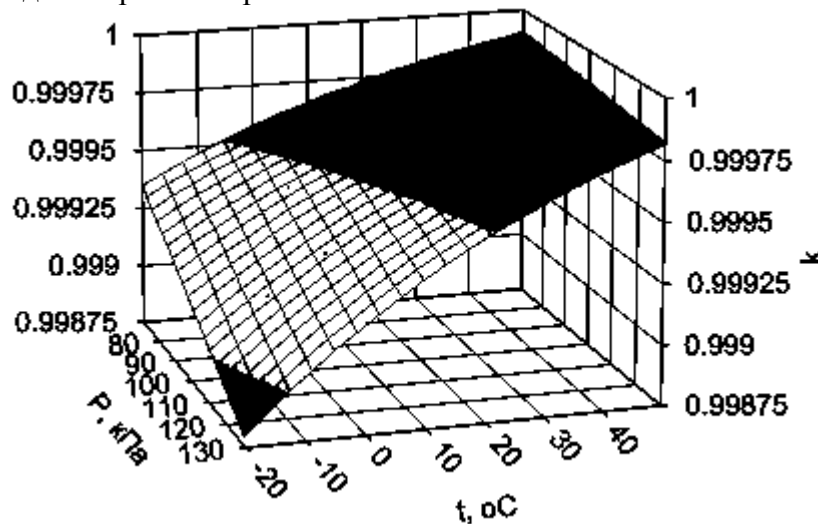


Рис. 2. Графік отриманої залежності коефіцієнта стисливості повітря  $k$  від температури та тиску у каналі

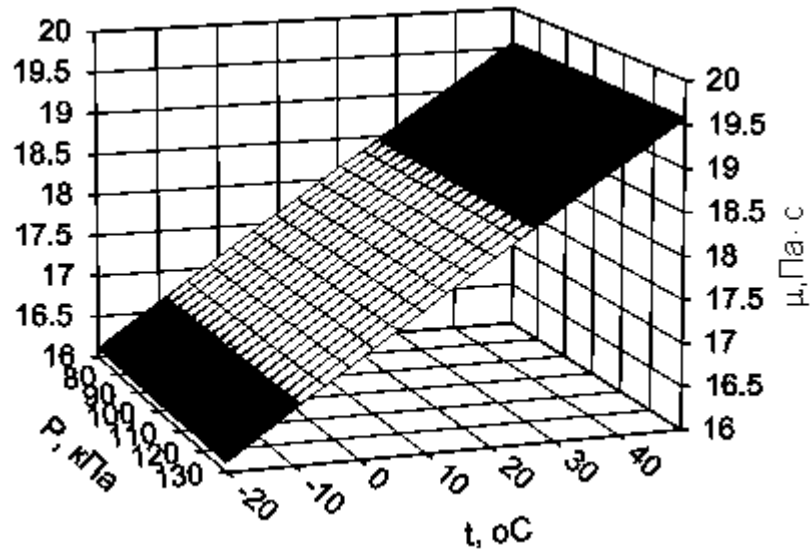


Рис. 3. Графік отриманої залежності коефіцієнта динамічної в'язкості повітря  $\mu$  від температури та тиску у каналі

Математичні моделі будувалися для використання в діапазоні абсолютного тиску  $P_{абс} = 90 \div 130$  кПа та в діапазоні температури  $-20 \div 50$  °С, що відповідають реальним умовам вентиляційного каналу гірничодобувної шахти.

Отримані моделі дозволить не вносити у пам'ять програми велику за обсягом таблицю, інтерполювати точні табличні значення вхідних параметрів до будь-якого проміжного значення температури та тиску, забезпечити високу точність розрахунку параметра. Отримані моделі наведені відповідно у табл. 1 та табл.2.

Таблиця 1

**Математична модель визначення коефіцієнта стисливості повітря**

Параметр	Значення
Модель	$z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx+gx^3+hy^3+ixy^2+jx^{2y}$
<b>x</b>	Абсолютний тиск повітря (кПа)
<b>y</b>	Температура повітря (°С)
A	0,999912452
B	-3,4801e-06
c	-1,7828e-07
D	-2,567e-08
E	-2,2403e-08
F	1,35804e-07
g	7,8125e-11
h	4,48232e-10
i	-7,5298e-10
j	-7,4405e-12

Таблиця 2

**Математична модель визначення динамічної в'язкості повітря**

Параметр	Значення
Модель	$z=a+bx+cy+dy^2$
<b>x</b>	Абсолютний тиск повітря (кПа)

y	Температура повітря (°C)
a	17,11851786
b	0,0001325
c	0,050441369
d	-3,5268e-05

Моделі розроблялися за допомогою програмного забезпечення „TableCurve 3D”. Моделі мають високу точність, коефіцієнт кореляції параметрів в обох моделях близький до одиниці, а сума залишків складає 2,0319805e-10 та 0,000005826. На відміну від табличних значень їх можливо застосувати в автоматизованих системах та приладах контролю витрат повітря.

Зазначено прилади, методи та формули для вимірювання вологості, температури і тиску у вентиляційному каналі для забезпечення надійності роботи приладів та точності. Як вихідний сигнал тиску та температури взято стандартизовані струмові давачі 4-20 мА — це дало можливість просто вибрати, а при потребі виконати заміну давача. Вибір основних давачів із струмовим виходом пояснюється поширеністю останніх.

Аналіз режиму руху повітря, враховуючи коефіцієнт тертя та число Рейнольдса, показав що режим потоку повітря знаходиться в автотельній області турбулентної течії, це дає змогу використовувати лише один градувальний коефіцієнт напірної трубки. Запропоновано формули для визначення густини повітря, які враховують температуру та підвищену вологість повітря у каналі.

Розроблено модифіковану формулу для розрахунку середньої швидкості у каналі відносно максимальної швидкості на осі каналу, яка враховує високу вологість повітря та шорсткість стінок каналу. Виведено загальну формулу розрахунку миттєвої витрати повітря  $u_{(i)сep}$ , яка дозволила повністю автоматизувати процес вимірювання

$$u_{(i)сep} = u_{max} \frac{n}{n+1} \left( 1 - 11.5 \frac{\mu}{u_{(i-1)сep} R \sqrt{\lambda / 8}} \right) [m/c], \quad (1)$$

де  $u_{max}$  — максимальна швидкість потоку;  
 $R$  — число Рейнольдса;  
 $u_{(i-1)сep}$  — середня швидкість попереднього кроку розрахунку;  
 $n$  — коефіцієнт, що залежить від числа Рейнольдса;  
 $\lambda$  — коефіцієнт гідравлічного тертя потоку.

Початкове значення середньої швидкості може бути дуже наближеним, але через добру збіжність результат отримується за 2-3 ітерації.

У **третьому розділі** приведено вибір та удосконалення методу вимірювання витрати повітря. З переліку найбільш відповідних методів для вимірювання витрати повітря в отворах великого діаметру було вибрано метод вимірювання максимальної швидкості, що забезпечує стабільність ординати точки (завжди жорстко фіксована на геометричній вісі потоку) та незалежність ординати від числа Рейнольдса і характеристик потоку.

Запропоновану авторську конструкцію напірної трубки (НТ) з покращеними метрологічними характеристиками (отримано патент України на корисну модель №28374). НТ завдяки вбудованому контролеру відноситься до класу “інтелектуальних давачів”, вона має підвищену чутливість і дозволяє визначати напрям руху повітря у каналі. Така конструкція перетворювача приведена на рис. 4. Перетворювач містить дві Г-подібних трубки-насадки 11 та 12 розміщених відповідно за прямим та реверсивним потоком повітря у каналі 10, вихідні ділянки яких введені в герметичний корпус 6. Паралельно один до одного



на кінцях трубок-насадок встановлені електромагнітні клапани 7 та 8, герметичний корпус з'єднано трубою 5 із давачем перепаду тиску 1.

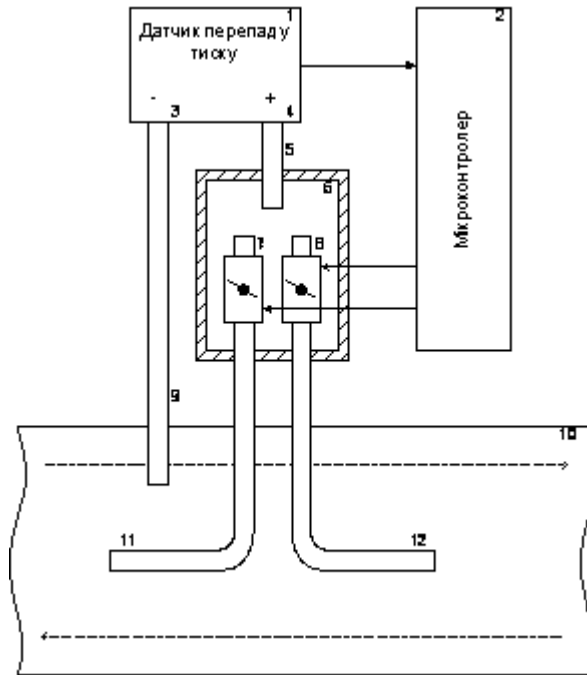


Рис. 4. Структурна схема модифікованого перетворювача швидкість – перепад тиску

Через першу Г-подібну трубку-насадку 11 в нормальному режимі, або через другу Г-подібну трубку-насадку 12 в реверсивному режимі повітря попадає до герметичного корпусу 6 і тисне на “плюсову” камеру 4 давача перепаду тиску 1. На “мінусову” камеру 3 давача перепаду тиску надходить статичний тиск у каналі. За допомогою електромагнітних клапанів 7 та 8 є можливість вибрати джерело повного тиску, отримавши значення перепаду тиску із давача мікроконтролер 2 визначає напрямок руху та швидкість повітря у каналі.

Виведено основне рівняння перетворення швидкості потоку повітря у каналі, відповідно до якого миттєва витрати повітря  $Q$  обчислюється за формулою

$$Q = kS \sqrt{2 \frac{f}{f-1} \frac{P}{\rho} \left[ \left( \frac{P + \Delta P}{P} \right)^{\frac{f-1}{f}} - 1 \right]} \quad [m^3/c], \quad (2)$$

де  $k$  — градувальний коефіцієнт НТ;  
 $S$  — площа поперечного перерізу каналу;  
 $f$  — коефіцієнт адіабати газоподібного середовища;  
 $P$  — абсолютний тиск повітря;  
 $\Delta P$  — перепад тиску на перетворювачі;  
 $\rho$  — густина повітря.

Інтегруючи миттєві об'єми за останнім рівнянням в часі, отримаємо сумарний об'єм потоку повітря у каналі.

Проведений аналіз впливу параметрів на витрату повітря відповідно до математичної моделі показав, що найбільш суттєвим є вплив перепаду тиску (рис. 5) на напірній трубці  $dP$  та абсолютного тиску  $P$  (приблизно по 20%). Вплив температури повітря  $t$  лежить у межах 10%.

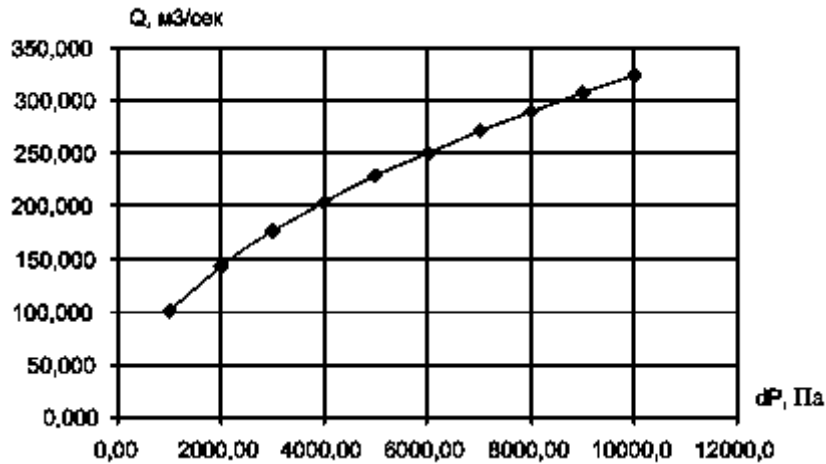


Рис. 5. Залежність витрати повітря від перепаду тиску

Залежність абсолютного тиску та температури носить практично лінійний характер тоді як залежність витрати від перепаду тиску є нелінійною (параболічною). Різниця витрат на всьому діапазоні як температури так і абсолютного тиску склала +21..+22 м<sup>3</sup>/с що відповідає 21% номінальної витрати. Враховуючи те, що давач перепаду тиску перетворює основний параметр в розрахунках — швидкість потоку повітря то залежність витрати від перепаду тиску дуже висока. Окрему увагу слід приділяти процесу вимірювання еквівалентного діаметра каналу тому що його вплив через великий поперечний переріз є дуже суттєвим.

Запропоновано методику, в якій зазначається ступінь впливу кожного з параметрів, та обчислено загальну невизначеність вимірювання витрати повітря, яка становить 0,0183. Причому враховувалась невизначеність вимірювання площі поперечного перерізу, невизначеність вимірювання перепаду тиску на НТ, невизначеність вимірювання абсолютного тиску, барометричного тиску, температури та вологості у каналі.

За побудованими моделями виконано теоретичний розрахунок параметрів об'єкта вимірювального контролю. Вхідними параметрами слугували цифри, які відображають реальну ситуацію в каналі вентиляційної установки ВЦ-5:

- діаметр вентиляційного стволу: 4,5м.
- витрата повітря складає 24,5 м<sup>3</sup>/с.
- статичний тиск (депресія P): 105 кПа.
- температура в каналі 25 °С.
- у каналі присутня висока вологість повітря: 95%.

Після проведених теоретичних розрахунків коефіцієнт стисливості повітря  $K_z$  та його динамічна в'язкість  $\mu$  приймають відповідно значення  $K_z = 0,999648$ ,  $\mu = 1,837 \cdot 10^{-5} [H \cdot c / m^2]$ .

Густина вологого повітря склала  $\rho = 1,237 [кг / м^3]$ .

Значення максимальної швидкості  $V_{max}$  в центрі каналу  $V_{max} = 26,95 [м/с]$ ,

а число Рейнольдса  $Re = 7,419 \cdot 10^6$ . Отримане число Рейнольдса є досить великим, що свідчить про розвинутий турбулентний потік в каналі.

Розрахована середня швидкість в каналі. В якості середньої швидкості першого кроку розрахунку бралася максимальна швидкість, бо формула має добру збіжність і це не впливає на результат  $V_{сер} = 24,693 [м / с]$ .

Розподіл швидкостей в каналі матиме вигляд приведений на рис. 6.

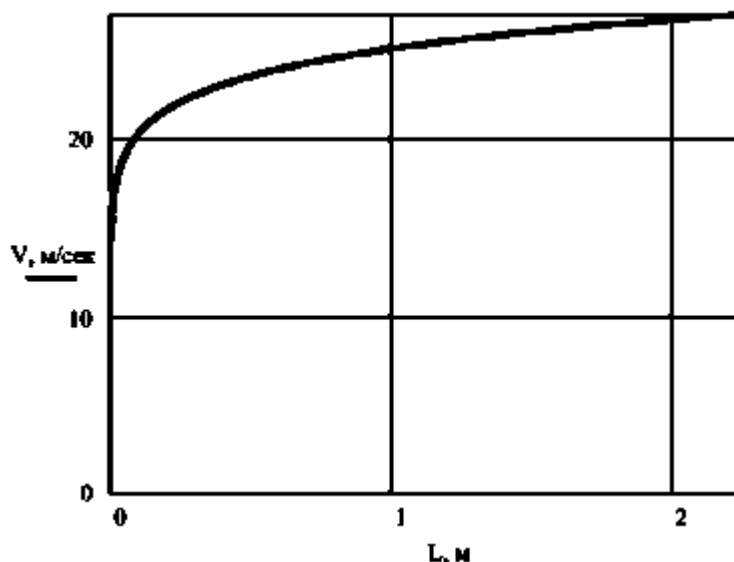


Рис. 6. Розподіл швидкостей в каналі відповідно до запропонованої моделі

Далі розрахувавши площу поперечного перерізу каналу отримано миттєву витрату повітря в даному каналі  $Q = V_{сер} S = 392,72 [m^3/c]$ .

У **четвертому розділі** сформульовано вимоги щодо характеристик та функцій, які мають бути присутні в будь-якому сучасному приладі контролю. До таких характеристик можна віднести забезпечення стабільної точності вимірювання, високої вірогідності контролю параметрів, зручний та зрозумілий інтерфейс роботи в будь-яких режимах, забезпечення приладу стандартними взаємозамінними каналами вводу інформації, можливість роботи приладу у локальній мережі подібних приладів.

Розроблено структурну схему приладу, який складається з таких блоків: мікроконтролер, блоки інтерфейсу RS-232 та RS-485 для роботи в локальній інформаційній мережі, блок астрономічного годинника з автономним живленням, блок енергонезалежної архівної пам'яті великого об'єму (не менше 8 Мбіт), індикатор з малим споживанням енергії, та з можливістю виведення розмірних параметрів, блок клавіатури для програмування приладу, високоточний АЦП для перетворення сигналів з первинних перетворювачів в цифровий код. Автором також запропоновано для подібних пристроїв, де є потреба вводу даних, використовувати оригінальний клавіатурний блок (отримано патент України на корисну модель №24615).

Приведено методику реакції обчислювача витрати на вхідні дані для контролю, які включають сигнали з давачів та дані введені користувачем, а також порядок їх обробки. Вказано межі контролю витрат  $Q_{min}$  та  $Q_{max}$  при виході за які обчислювач сигналізує про аварію, вносить запис в архів аварійних ситуацій, які згодом можливо обробити на комп'ютері. Заданими параметрами є густина повітря  $\rho_p$  у відповідності до його домішок та складу, внутрішній діаметр  $D$  вентиляційного каналу шахти (або приведений діаметр, якщо канал має не круглий поперечний переріз), шорсткість стінок каналу  $k$ , та відносна вологість повітря  $\varphi$ . Програмується також градувальний коефіцієнт перетворювача напірної трубки  $k_{нт}$ .

Оператор також має ввести межі допуску по мінімуму  $Q_{min}$  та максимуму  $Q_{max}$  для контролю витрати повітря в нормальному режимі. Обчислювач витрати в реальному режимі слідкує за знаходженням параметру діапазоні допуску (рис. 7).



Рис. 7. Межі контролю витрати повітря нормального режиму роботи

Значення параметрів  $Q_{min}$  та  $Q_{max}$  неможливо ввести за допустимий діапазон датчика перепаду тиску, який найбільше впливає на зміну витрати повітря. Обчислювач сигналізує про аварію при виході витрати за меж діапазону на інформаційному табло і веде архів аварійних ситуацій, які згодом можливо обробити зчитавши архіви з обчислювача на комп'ютер.

Представлено алгоритм аналізу струмових сигналів уніфікованих давачів та знаходження значення струму  $I_x$  з отриманого АЦП коду  $N_x$  за лінійним законом. Причому діапазон значень струму поділено на логічні зони, які дозволяють проводити діагностику стану давача: нормальний режим, коротке замикання, вимкнений чи в зоні максимуму.

Розроблено алгоритм функціонування програмного забезпечення, який здійснює контроль коректності даних, програмування параметрів приладу, перегляд поточної інформації по запиту користувача і забезпечує зв'язок з персональним комп'ютером за допомогою послідовного.

Запропоновано градуовально-повірочний прилад (ГПП) для напірних трубок, який адаптовано для роботи разом з еталонною повірочною установкою (ЕПУ) УПЛГ-2500 для повірки механічних лічильників газу. ГПП має вигляд функціонально завершеного мікроконтролерного блоку, який отримує потрібні для розрахунку витрати газу дані від стандартних струмових давачів тиску, температури та перепаду тиску на НТ. ГПП розраховує витрату та об'єм газу в робочих та нормальних умовах відповідно до математичної моделі вимірювання витрати газу (рис. 8).

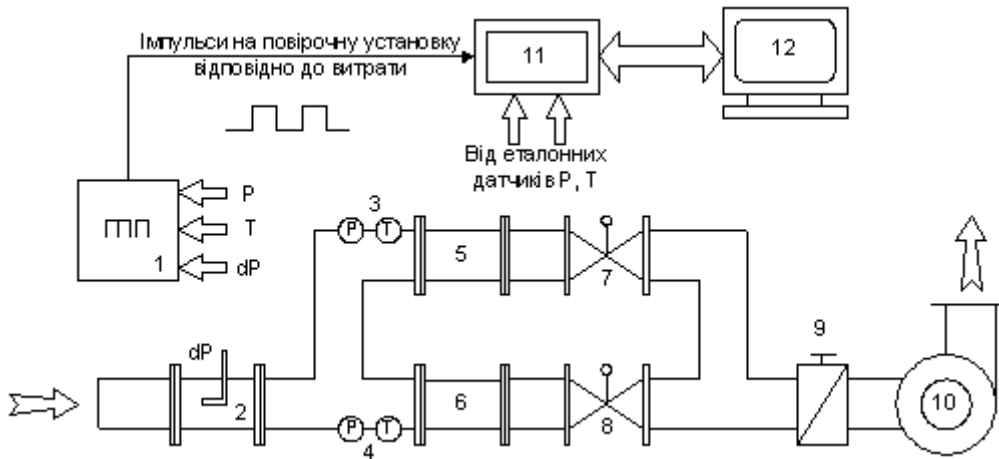


Рис. 8. Схема під'єднання ГПП до установки УПЛГ-2500:

- 1 – градуювально-повірочний прилад;
- 2 – напірна трубка, що градуюється;
- 3,4 – датчики тиску, температури;
- 5,6 – робочі еталони об'єму;
- 7,8 – засувки;
- 9 – регулятор витрати;
- 10 – вентилятор;
- 11 – пульт керування;
- 12 – комп'ютер.

Імпульси з генератора 1111 поступають на імпульсний вхід повірочної установки УПЛГ-2500 імітуючи роботу лічильного механізму механічного лічильника газу. ГПП постійно розраховує миттєву витрату газу та розраховує частоту  $F_{out}$ , за якою генератор формує імпульси

$$F_{out} = Q \cdot N_p / 3600 \text{ [Гц]}, \quad (3)$$

де  $N_p$  — кількість імпульсів на  $1 \text{ м}^3$  газу „віртуального” механічного лічильника, який ГПП імітує. В кожному новому циклі роботи ГПП визначає нову частоту та подає відповідні команди на генератор для корекції вихідної частоти  $F_{out}$ . Результатом градуювання напірної трубки буде розраховані середні значення сумарного об'єму газу за допомогою ГПП ( $Q_{HT}$ ) та за допомогою ЕПУ ( $Q_{em}$ ). Розділивши середні значення сумарного об'єму  $Q_{em}$  на  $Q_{HT}$  отримаємо шуканий коефіцієнт  $k$  градуювання напірної трубки, який зазвичай близький до одиниці

$$k = \frac{Q_{em}}{Q_{HT}}. \quad (4)$$

Використовуючи ГПП в парі з ЕПУ можливо не тільки виконати повірку вимірального перетворювача на базі НТ, але й провести градуювання напірної трубки будь-якої конструкції.

У результаті поставлених лабораторних експериментів на перерізах з малим діаметром (до  $0,2 \text{ м}^2$ ) було отримано значення відносних похибок за якими побудовано криву зміни похибки (рис. 9). Фактично ця крива відображає залежність похибки від середньої швидкості потоку повітря.

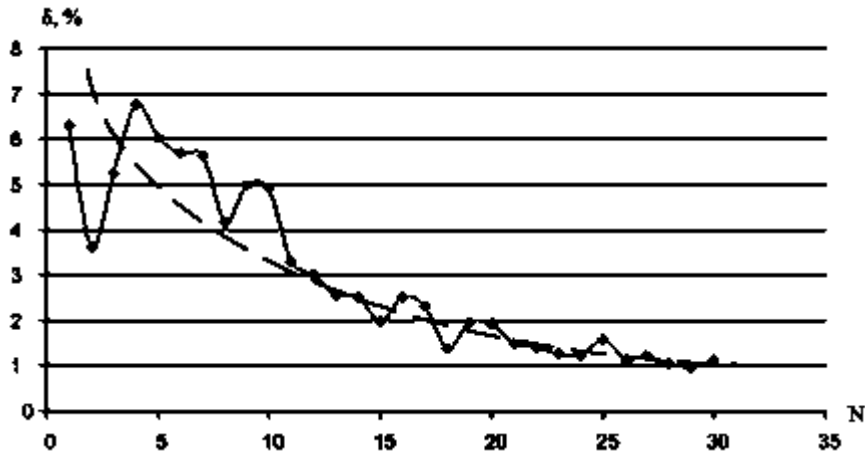


Рис. 9. Крива похибки за результатами експерименту

На малих швидкостях результат вимірювання має слабу стабільність. При збільшенні експериментальної швидкості до максимального значення 24 м/с крива похибки стабілізується. Найкращі результати отримані при великих швидкостях, коли перепад тиску складає 145 Па і вище, де відносна похибка складає менше двох відсотків. Стабільність результатів теж нормалізується. Причому збіжність результатів можливо теоретично покращити збільшуючи час інтегрування витрати повітря.

Результати тестування приладу контролю витрати повітря можна назвати вдалим, бо якщо провести аналогію з каналом великого поперечного перерізу і забезпечити таку ж швидкість потоку повітря при якій числа Рейнольдса для обох перерізів були б рівними, то ми б отримали велике значення швидкості повітря для повірочної установки. Але тоді відповідно до результатів дослідів похибка буде мінімальною.

Оцінено ефективність роботи приладу, в якості оцінки обчислено вірогідність контролю, а саме ймовірність знаходження очікуваного результату в прогнозованому діапазоні. При розрахунках помилок контролю було прийняті наступні значення параметрів. Коефіцієнт асиметрії поля допуску дорівнює 1, тобто присутній симетричний допуск. Контрольні прирости полів допуску за верхньою та нижньою межами дорівнюють нулю. Номінальне експериментальне значення витрати повітря складає 100 м<sup>3</sup>/с, що є трохи менше за середнє значення витрати у даному каналі. Поле допуску витрати становить 8 відсотків від номінальної витрати. Середньоквадратичне значення відхилення вимірювань ряду замірів у каналі склало 2,63%. Отримано значення вірогідності контролю 0,953 є вищим за значення вірогідності контролю при не автоматизованому вимірюванні витрати.

Представлено результати роботи приладу на реальному об'єкті – вентиляційному каналі гірничодобувної шахти ВАТ «Суша Балка» (Кривий Ріг), про що свідчить отримане свідоцтво про впровадження. Результати роботи відображають дані з архіву приладу при переході на реверсивний режим роботи каналу і навпаки, що показує його здатність працювати в усіх закладених режимах. Прилад на даний час працює в штатному режимі, зауважень щодо його експлуатації не виникало.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено завдання щодо створення мікроконтролерного приладу для контролю витрат повітря у каналах із великим поперечним перерізом, який дозволяє з високою вірогідністю розраховувати миттєву та об'ємну витрату повітря, а також його інші технологічні параметри. Основні наукові і практичні результати роботи є такими:

1. Вдосконалено математичну модель об'єкту контролю витрат повітря, яка враховує підвищену вологість, шорсткість стінок каналу, та характер потоку повітря, що дозволило підвищити точність вимірювання витрат, спростити визначення коефіцієнта стисливості та динамічної в'язкості повітря і підвищити вірогідність контролю до значення 0,953, яке є вищим ніж при епізодичному контролі витрати точковими методами.
2. Розроблено первинний вимірювальний перетворювач – модифіковану напірну трубку, що дозволило механічно не змінювати переріз вентиляційного каналу та забезпечити високу точність вимірювання. Даний перетворювач завдяки вбудованому мікроконтролеру, має підвищену чутливість і дозволяє визначати напрям руху повітря у каналі.
3. Запропоновано модифіковану формулу для розрахунку середньої швидкості у каналі відносно максимальної швидкості на осі каналу. Формула враховує високу шорсткість стінок каналу, а метод вимірювання максимальної швидкості забезпечує стабільність ординати точки та її незалежність чисел Рейнольдса і характеристик потоку.
4. Вперше запропоновано підхід до автоматизованого градуювання і повірки напірних трубок на атестованій повірочній установці УПЛГ-2500, який дозволяє виконувати градуювання та повірку напірних трубок тими ж засобами, що й при повірці механічних лічильників природного газу.
5. Запропоновано принцип роботи обчислювача для вимірювання і контролю витрат повітря, який на відміну від аналогів дозволяє автоматично визначати прямий та зворотній напрямки руху потоку повітря у вентиляційному каналі шахти. Автором запропоновано для подібних пристроїв використовувати оригінальний клавіатурний блок для вводу даних, який дозволяє опитувати велику кількість клавіш оператора всього по одній лінії вводу.
4. Розроблено математичні моделі визначення динамічної в'язкості повітря а також його коефіцієнту стисливості. Математичні моделі розраховані на використання в діапазоні тисків  $P_{абс} = 90 \div 130$  [кПа] та діапазоні температур  $-20 \div 50$  °С. Дані моделі мають високу точність, коефіцієнт кореляції параметрів в обох моделях близький до одиниці, а сума залишків є складає  $2,0319805e-10$  та  $0,000005826$ . На відміну від табличних значень їх можливо застосувати в автоматизованих системах та приладах контролю витрат повітря.
5. Виконано аналіз режиму руху повітря враховуючи коефіцієнт тертя та число Рейнольдса, відповідно до якого режим потоку повітря знаходиться в автотельній області турбулентної течії, що дає змогу використовувати лише один градуювальний коефіцієнт напірної трубки для даної задачі.
6. Запропоновано методику та обчислено загальну невизначеність вимірювання витрат повітря, яка становить 0,0183.
7. Розроблено методику функціонування програмного забезпечення, яке здійснює контроль коректності даних, програмування параметрів приладу, перегляд поточної інформації по запиту користувача і забезпечує зв'язок з персональним комп'ютером для обміну даними.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дементьев С.Ю. Анализ похибок інформаційно-вимірювальної системи витрати газів / Дементьев С.Ю. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №6. – С. 64-66.

2. Дементьев С.Ю. Градуировально-проверочный стенд для напорных трубок / Дементьев С.Ю. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №1. – С. 5-7.
3. Дементьев С.Ю. Экспериментальное определение коэффициента напорной трубки для контроля витрати газів / Дементьев С.Ю., Дементьев Ю.В. // Вісник Хмельницького Національного університету. – 2008. – №3. – С. 56-58.
4. Дементьев С.Ю. Контроль витрати повітря в отворах великого перерізу. / Дементьев С.Ю. // „Нові технології”. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2006. – №2(12). – С. 234-235.
5. Дементьев С.Ю. Мікропроцесорний коректор об'єму газу з наднизьким енергоспоживанням / Дементьев С.Ю. // Вісник Хмельницького Національного університету. – 2005. – ч.1, – №4. – С. 233-235.
6. Дементьев С.Ю. Надійність програмного забезпечення обчислювача витрати енергоресурсів / Дементьев С.Ю., Дементьев Ю.В. // „Радіоелектронні і комп'ютерні системи”. Науково-технічний журнал національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського „Харківський авіаційний інститут”. – 2007. – №7(26). – С. 199-202.
7. Дементьев С.Ю. Пристрій вимірювання витрати повітря з двонаправленим режимом роботи / Дементьев С.Ю. // Вісник черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – 2007. – С. 170-172.
8. Дементьев С.Ю. Аналіз похибок інформаційно-вимірювальної системи витрати газів / Дементьев С.Ю. // Тези доповідей XIII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика-2006”. – Вінниця, 2006. – С. 151.
9. Дементьев С.Ю. Використання чисел з плаваючою крапкою в малорозрядних мікроконтролерах / Дементьев С.Ю. // Тези доповідей XXXII науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідницьких організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. – Вінниця, 2003. – С. 126.
10. Дементьев С.Ю. Вимірювання витрати повітря в отворах великого діаметру / Дементьев С.Ю. // Тези доповідей XXXIV науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідницьких організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. – Вінниця, 2005. – С. 59.
11. Дементьев С.Ю. Контроль витрати повітря в отворах великого перерізу / Дементьев С.Ю. // Тези доповідей II науково-технічної конференції з міжнародною участю “Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (МЕТІТ-2). – Кременчук, 2006. – С. 183-184.
12. Дементьев С.Ю. Мікропроцесорна система вимірювання витрати газів з наднизьким енергоспоживанням / Дементьев С.Ю. // Матеріали I Міжнародної конференції СПРТП-2005. – Вінниця. – 2005. – С. 92.
13. Пат. 24615 Україна, МПК G06C 7/00. Пристрій опитування клавіатури / Дементьев С.Ю., Дементьев Ю.В.; заявник Вінницький національний технічний університет. – № 200701188 ; заявл. 05.02.07 ; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
14. Пат. 28374 Україна, МПК G01P 5/00. Пристрій вимірювання швидкості повітря в тунелі з двонаправленим режимом роботи / Дементьев С.Ю., Дементьев Ю.В.; заявник Вінницький національний технічний університет. – № 200707424 ; заявл. 02.07.07 ; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 20.

#### АНОТАЦІЯ

**Дементьев С.Ю. Контроль витрат повітря в каналах із великим поперечним перерізом. – Рукопис.**



Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2009.

Дисертаційна робота вирішує задачу вимірювання та контролю витрат повітря в каналах із великим поперечним перерізом. Така задача насамперед актуальна у вентиляційних каналах гірничодобувних шахт. У роботі виконано аналіз існуючих методів вимірювання та контролю які можливо застосувати для даної задачі. Виділено їх переваги та недоліки. Для вирішення задачі запропоновано первинний перетворювач перепаду тиску - модифіковану напірну трубку. Особливість трубки в тому, що вона дозволяє визначати напрямок руху потоку повітря - прямий чи реверсивний. Створено математичні моделі швидкого обчислення коефіцієнта стискуваності повітря та його динамічної в'язкості. Розроблено загальну математичну модель вимірювання витрати за методом максимальної швидкості. Розроблено схему, яка дозволяє виконувати градування та перевірку перетворювачів - напірна трубка (трубка Піто). На основі розроблених моделей та методів створено мікроконтролерний прилад - обчислювач витрати повітря. Виконано аналіз результатів роботи обчислювача в реальному вентиляційному каналі.

**Ключові слова:** вимірювання, контроль, витрата повітря, вентиляційний канал, великий поперечний переріз, напірна трубка, давач, обчислювач витрати, середня швидкість, градування перетворювача.

### АННОТАЦІЯ

**Дементьев С.Ю. Контроль расхода воздуха в каналах с большим поперечным сечением. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2009.

Диссертационная работа решает задачу измерения и контроля расхода воздуха в каналах с большим поперечным сечением. Такая задача, прежде всего актуальная у вентиляционных каналах горнодобывающих шахт. Диаметр таких каналов может достигать 5 метров и более, что делает затруднительным использование большинства популярных преобразователей перепада давления, как например сужающих устройств.

В работе проведен анализ существующих методов измерения и контроля, которые возможно применить для данной задачи. Отдельно выделено их преимущества и недостатки. Для решения поставленной задачи предложено использовать первичный преобразователь перепада давления – модифицированную напорную трубку. Особенность трубки в том, что она позволяет определять направление движения потока воздуха – прямой или реверсивный. Данный преобразователь выполнен в виде направленных за и против потока двух напорных трубок объединенных в общий корпус.

Создано математические модели быстрого расчета коэффициента сжимаемости воздуха и его динамической вязкости. Данные модели строились на основе табличных данных с помощью специализированных программных пакетов. Построенные модели имеют высокую точность на всем диапазоне изменения температуры и давления в канале. Также данные модели легко реализуемы на языках программирования высокого уровня.

Разработано общую математическую модель расчета мгновенного расхода воздуха для метода максимальной скорости. В модели учитывается высокая влажность воздуха в канале, а также шероховатость стенок канала. В качестве входных параметров, которые могут изменяться, выступают данные с преобразователя перепада давления в канале, температуры воздуха, а также данные про абсолютное и барометрическое давление в канале. В работе проведен анализ влияния каждого из измеряемых факторов.

Разработана схема, которая позволяет производить градуировку и поверку преобразователей – напорных трубок (трубок Піто). Особенностью схемы в том, что она адаптирована для работы вместе со стандартизированной установкой для поверки

механических счетчиков газа, которые являются очень распространенными. Схема разработана на базе цифрового сигнального микропроцессора ARM7, что позволило производить градуировку и поверку преобразователей в реальном времени.

На основании разработанных моделей и методов создано микроконтроллерный прибор – вычислитель расхода воздуха. Описано назначение и принципы работы каждого функционального блока вычислителя. Приведена методика обработки данных по входным каналам, а также общая методика работы прибора для обеспечения его безотказной и стабильной работы. Сделано анализ результатов работы вычислителя в реальном вентиляционном канале.

**Ключевые слова:** измерение, контроль, расход воздуха, вентиляционный канал, большое поперечное сечение, напорная трубка, датчик, вычислитель расхода, средняя скорость, градуировка преобразователя.

## ABSTRACT

**Dementyev S.Y. Air Flow in Ducts with a Large Cross-Section Control.** – The manuscript.

A thesis for a scientific technical sciences degree candidate, by specialty 05.11.13 – Devices and Control Methods and Substance Composition Determination. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2009.

The thesis is addressing to solve a problem of air flow measuring and control in ducts with a large cross-section. This problem especially urgent in the ventilation ducts mining pits. The analysis of existing measurement and control methods which may apply to the task is described. Their advantages and disadvantages are provided. To solve the target a primary converter pressure – a modified pressure tube is suggested. The peculiarity of the tube that it allows you to determine the air flow direction – straight or reverse. Created mathematical models for quick calculating of air compressibility and air dynamic viscosity. A general mathematical model for airflow calculating by the maximum speed method is created. A stand, which allows to grading and calibrate pressure pipes (Pitot tubes), is developed. On created models and methods basis the microcontroller airflow computer is produced. The airflow computer analysis in real ventilation ducts is made.

**Keywords:** measurement, control, air flow, ventilation duct, a large cross-section, pressure tube, sensor, consumption computer, average speed, transducer calibration.

Підписано до друку 11.02.2009 р. Формат 29,7x42 ¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2009-0034  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел. (0432) 59-81-59.