

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»



В.Є. КОЛЕСНИК, А.А. ЮРЧЕНКО, С.І. ЧЕБЕРЯЧКО

**КОНТРОЛЬ ЗАПИЛЕНOSTІ АТМОСФЕРИ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ
НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО ЛІЧИЛЬНО-ІНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДУ**

Монографія

Дніпропетровськ
НГУ
2013

УДК 622.411.51
ББК 65.247: 20.18
К60

Рекомендовано вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 5 от 28.05. 2013 р.).

Рецензенти:

А.С. Беліков, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»;

В.Г. Шевченко, д-р техн. наук, старший науковий співробітник, вчений секретар Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.

Колесник, В.Є.

К60 Контроль запиленості атмосфери гірничих підприємств на основі оптичного лічильно-інтегрального методу : моногр. / В.Є. Колесник, А.А. Юрченко, С.І. Чеберячко. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 136 с.

ISBN 978 – 966 – 350 – 410 – 0

Створення ефективних методів і засобів контролю вмісту пилу в атмосфері гірничих підприємств, зокрема вугільних шахт." – головна мета проведених досліджень.

Запропоновано методи урахування характеристик пилу і динамічних параметрів запиленних потоків, що підвищують достовірність пилового контролю. Розроблено оптичний лічильно-інтегральний метод контролю масового вмісту пилу в повітрі. Метод базується на принципі відсічення певної частини імпульсного сигналу оптичного абсорбційного лічильника, що утворюється під впливом зважених у повітрі частинок, при одночасній автоматичній компенсації забруднення оптичного каналу лічильника осілим пилом. На основі методу створені ефективні засоби контролю загального вмісту пилу і його тонкої фракції в повітрі, у тому числі перспективні зразки, що передбачають використанням мікропроцесорної техніки.

Розрахована на фахівців з питань контролю вмісту забруднюючих речовин в атмосфері промислових підприємств та створення засобів його забезпечення, а також буде корисною для викладачів, аспірантів та студентів.

УДК 622.411.51
ББК 65.247: 20.18

© В.Є. Колесник, А.А. Юрченко,
С.І. Чеберячко, 2013

© Державний ВНЗ «Національний
гірничий університет», 2013

ISBN 978 – 966 – 350 – 410 – 0

ВСТУП

Умови праці на гірничих підприємствах, в тому числі у вугільних шахтах, значною мірою визначаються вмістом пилу в повітрі. Повністю подавити пил практично неможливо, до того ж, процес знепилювання потребує значних матеріальних витрат, тому діючими нормативними документами з охорони праці встановлюються санітарно-гігієнічні або технічно досяжні рівні вмісту пилу в повітрі робочої зони. Необхідність дотримання цих норм породжує проблему ефективного пилового контролю.

Правилами безпеки на гірничих підприємствах передбачений періодичний і оперативний контроль чинників, пов'язаних з пилом. Періодичний контроль базується на трудомісткому гравіметричному методі, який передбачає відбір проб пилу. Тому він здійснюється переважно службами державного нагляду, які встановлюють факти перевищення допустимих рівнів запиленості повітря. Через те, що контроль здійснюється короткочасно й епізодично, на його результати значно впливає суб'єктивний підхід, що допускає можливість навмисної зміни режимів роботи гірничого обладнання під час контролю, а також наявність залпів безконтрольних викидів пилу й інших причин. Разом з невизначеністю, великою трудомісткістю і часто необ'єктивністю періодичного контролю, істотним його недоліком є незавершеність метрологічного забезпечення, тому навіть при дотриманні вимог погрішності засобів, що застосовуються, можливі непередбачені помилки, особливо при відбиранні проб.

Оперативний пиловий контроль фактично не здійснюється, оскільки експрес-пиломіри, що розробляються і випускаються час від часу, не знаходять свого застосування, найчастіше через низьку достовірність одержуваних результатів, яка погіршується малою надійністю, високою вартістю, трудомістким налагоджуванням приладів та ін.

Низька ефективність інспекторського і оперативного контролю умов праці за пиловим чинником привела у гірничий галузі до значного росту профзахворювань з пиловою патологією. Очевидно, що такий стан обумовлений відсутністю досить надійних і універсальних методів та засобів контролю гірничопромислового пилу. Отже, постає актуальна проблема підвищення ефективності контролю умов праці в гірництві за пиловим чинником. Вирішенню, у межах цієї проблеми, задачі створення нових методів і засобів контролю вмісту пилу в шахтній атмосфері й присвячена монографія.

Автори висловлюють щире подяку д-ру техн. наук, професору Голіньку В.І. за цінні поради, рекомендації й зауваження, висловлені при підготовці монографії.

1. АНАЛІЗ СТАНУ КОНТРОЛЮ УМОВ ПРАЦІ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПИЛОМ, НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

1.1. Пиловий контроль на гірничих підприємствах і об'єктах

Пиловий контроль відіграє важливу роль у боротьбі з пилом, є його невід'ємним етапом, що передує процесу безпосереднього пилоподавлення. Тому пиловому контролю, включаючи його методологічні і технічні аспекти, присвячена значна кількість наукових праць. Проте проблема пилового контролю залишається досить гострою через відсутність як єдиного підходу до нього на промислових об'єктах, так і досить надійних і універсальних засобів контролю вмісту пилу в атмосфері гірничих підприємств, що відрізняється розмаїтістю умов і видом пилу, що витає. Це є вагомим аргументом на користь подальшого вивчення методів пилового контролю, розвитку їх теорії і створення нових засобів.

Фізика процесу поширення пилу дозволяє виявити три основних фактори, що визначають пилову обстановку на будь-якому об'єкті, – це: вміст пилу в повітрі, винос (викид) пилу потоками, що рухаються, і відкладення пилу на прилеглих до її джерел територіях. Цілком логічно досліджувати ці чинники у взаємному зв'язку, причому головним з них є вміст пилу в повітрі, а наступні два залежать від нього і від параметрів аерозольної системи, зокрема, від швидкості газоповітряного потоку, маси пилових частинок і параметрів показників, що характеризують дифузію цих частинок.

На гірничих підприємствах зазначені фактори значною мірою визначають умови праці. Їх можна представити більш конкретно, а саме:

- вміст загальної маси пилу в повітрі робочої зони, зонах пилоутворення (машинах, механізмах і комплексах), а також у системах вентиляції, включаючи гірничі виробки шахт;

- винос пилу або пилові промислові викиди з організованих і неорганізованих джерел (систем вентиляції, включаючи гірничі виробки і вентилятори головного провітрювання шахт, а також вантажно-розвантажувальні комплекси, кар'єри, відвали, дороги й ін.);

- пилові відкладення в зонах, що примикають до джерел пилоутворення й у системах вентиляції, в першу чергу в гірничих виробках вугільних шахт, небезпечних за вибухами пилу.

Значимість для охорони праці кожного з перерахованих факторів у різних галузях промисловості різна. Зокрема, у гірничодобувній галузі найбільш важливим чинником є вміст пилу в повітрі і його відкладення у гірничих виробках, особливо, якщо це вибухонебезпечний вугільний пил.

Контроль стану пилової обстановки на підприємствах здійснюється лабораторіями санітарно-епідемічних служб міст, а також регіональними службами охорони навколишньої природного середовища. Крім того, існують промислово-санітарні лабораторії на окремих великих підприємствах,

гірничорятувальна служба, а також відділи охорони праці на підприємствах, у задачі яких входить оперативний чи періодичний контроль запиленості.

Базовим методом оцінки перерахованих факторів, зв'язаних із запиленістю повітря, є гравіметричний метод. Він передбачає три етапи:

- відбір проби пилу на фільтри, мембрани, підкладки і т.п.;

- визначення маси накопиченого пилу в пробі шляхом її зважування на аналітичних вагах;

- обчислення необхідного фактора в гравіметричних показниках з урахуванням маси пилового осаду й об'єму відібраного чи пропущеного через прилад повітря чи газу.

Очевидно, що кожен етап має свою специфіку в залежності від того, який фактор, зв'язаний із запиленістю, визначається. Основні особливості конкретних методик приведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Особливості методик визначення основних факторів, зв'язаних із запиленістю повітря, гравіметричним методом.

Процедура	Методики для основних факторів		
	Вміст пилу в повітрі – C , мг/м ³	Викиди чи винос пилу – W , мг/с	Відкладення пилу – P , г/м ³ с,
Відбір проби	Аспірація повітря через фільтр	Аспірація і вимір швидкості потоку ²	Гравітаційне осадження пилу на підкладки
Визначення маси осаду	Зважування фільтрів до і після добору проби	Те ж	Зважування підкладки до і після осадження пилу
Обчислення фактора ¹	$C = \frac{\nabla m}{Q \cdot t}$	$W = C \cdot v \cdot S$	$P = \frac{P_v}{t}$,

Примітки: 1. ∇m – маса пилового осаду, мг; Q – витрата повітря через фільтр, м³/з; t – час набору проби, с; v – швидкість потоку, м/с; S – перетин потоку, м²; P_v – маса пилу, що осіла в одиниці об'єму; t – час осадження, с.

2. Базовий метод визначення швидкості потоку заснований на вимірі перепадів тиску у пневмометричних трубках з наступним обчисленням за формулою $v = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot 2g}{\rho}}$, де Δp – перепад тиску, Па; ρ – густина повітря, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

З аналізу таблиці випливає, що оцінка першого фактора – C (вміст пилу в повітрі) зводиться до визначення масової концентрації пилових частинок, що витають в одиниці об'єму повітря чи газу. Другий фактор – W (винос пилу потоками) оцінюється як добуток масової концентрації пилових частинок, що рухаються з потоком, на швидкість цього потоку і його перетин, що вимагає додаткового визначення швидкості потоку, що викидається, і визначення площі

його поперечного перерізу або за апріорними даними, або шляхом безпосереднього виміру.

Оцінка третього фактора – P (відкладення пилу) зводиться до визначення маси пилу, що осів з атмосфери в одиниці об'єму за визначений проміжок часу.

Очевидно, що перший фактор є основним, оскільки від вмісту пилу (концентрації – C) будуть залежати оцінки двох, що залишилися. Порядок визначення факторів регламентується різними нормативними державними чи галузевими документами й інструкціями [1- 6], що і формують систему пилового контролю на промислових підприємствах і об'єктах.

Існуюча чи діюча система контролю в Україні і за рубежом [7, 8] є похідною від 3-х перерахованих вище факторів безпеки праці і передбачає наступні види контролю з відповідними вимірами чи обчисленнями [9, 10]:

- контроль вмісту загальної маси пилу (вимір масової концентрації пилу) у повітрі робочої зони, $\text{мг}/\text{м}^3$;

- контроль вмісту тонкої і грубої фракцій пилу (двоступінчастий контроль пилу) у повітрі робочої зони, $\text{мг}/\text{м}^3$;

- контроль пилового навантаження (визначення маси вдихуваного пилу), мг за зміну;

- контроль викидів (виносу) пилу (визначення маси пилу, що викидається в одиницю часу), $\text{мг}/\text{с}$;

- контроль дотримання технологічних режимів (реєстрація перевищення встановлених рівнів запиленості), $\text{мг}/\text{м}^3$;

- контроль пиловідкладення (визначення маси осілого вибухонебезпечного пилу в зонах, що примикають до джерел пилоутворення й у гірничих виробках), $\text{г}/\text{м}^2$ чи $\text{г}/\text{м}^2\text{доб}$.

Перераховані шість видів пилового контролю умовно поділяють на дві групи: гігієнічний (перші три з вищенаведених) і інженерний (три, що залишилися). Перша група передбачає оцінку умов праці людей, що працюють у запиленій атмосфері, а друга – оцінку техніки за пиловим чинником й ефективності протипилових заходів.

Сформована структура пилового контролю на промислових об'єктах з перспективними напрямками його розвитку представлена на рис.1.1.

Доречно відзначити, що жоден із представлених видів контролю не стандартизований на державному рівні. Є лише галузеві методики чи інші відомчі нормативні документи, що ускладнює зіставлення результатів, отриманих з використанням різних технічних засобів добору чи накопичення проб пилу [11, 12], а тому гальмується розробка приладів для усіх видів контролю, зв'язаних із запиленістю, роботу яких можна було б звірити зі стандартним методом.

Однієї з причин відсутності такого стандарту є складність (чи навіть неможливість на сучасному етапі) виміру абсолютного значення концентрації пилових частинок у повітрі, а тому і складність створення еталона, що необхідний для передачі одиниці концентрації пилу робочим засобам його вимірювання. Тому необхідно розвивати й удосконалювати базовий гравіметричний метод.

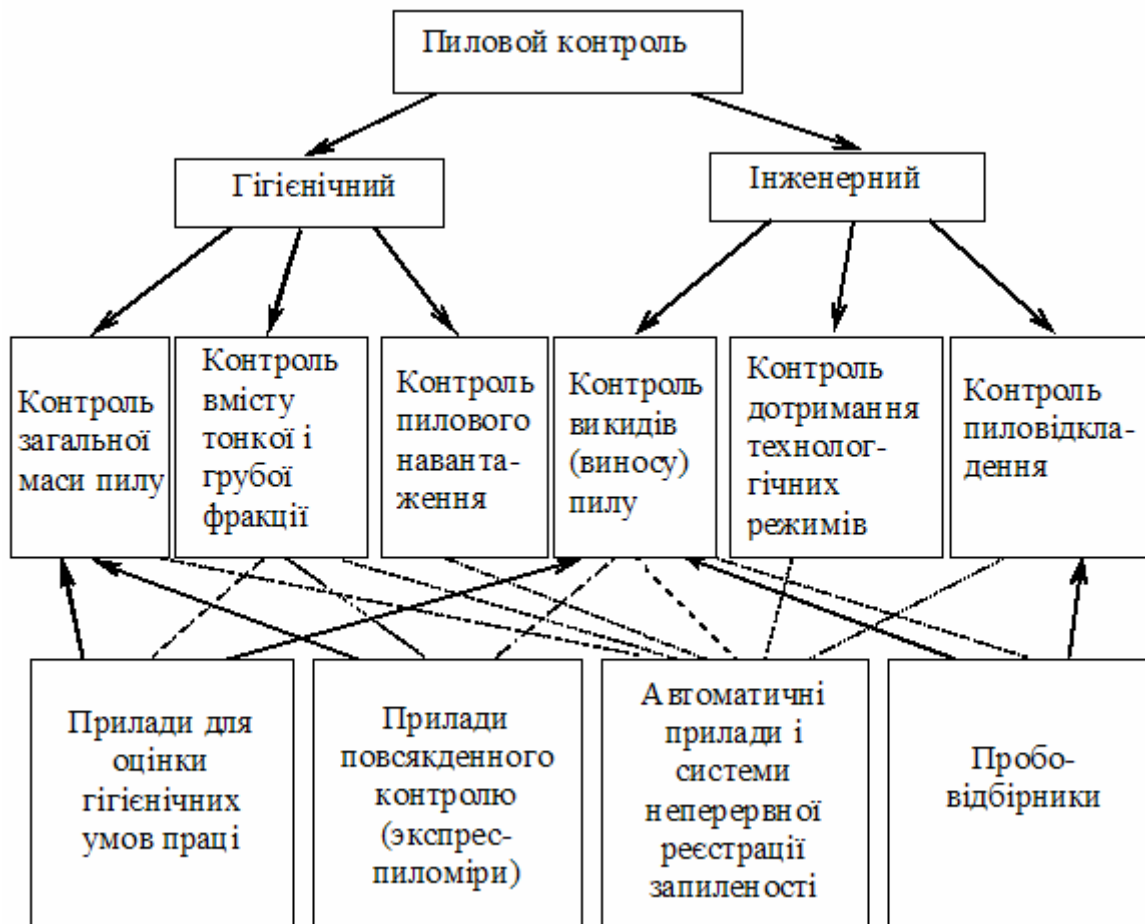


Рисунок 1.1 – Існуюча структура пилового контролю, засоби його реалізації й розвиток

1.2. Граничні величини основних впливових чинників пилового контролю

Очевидно, що розробити універсальні засоби для усіх видів і об'єктів контролю умов праці за пиловим чинником практично неможливо, тому необхідно орієнтуватися на основні з них. У зв'язку з цим визначимо граничні значення величин основних впливових чинників, які потрібно враховувати при контролі вмісту пилу, його викидів і відкладення в найбільш характерних умовах промислових об'єктів.

При контролі вмісту пилу в повітрі робочої зони для загальнопромислових умов пред'являються наступні граничні вимоги:

- діапазон виміру концентрації пилу, мг/м^3 від 0,1 до 200
- відносна похибка вимірювання концентрації пилу, в повітрі робочої зони¹, % 25
- межа припустимої абсолютної погрішності для цифрових приладів, мг/м^3 $\pm(1+0,25C)$
(тут С – значення фактичну концентрацію пилу в мг/м^3)
- густина речовини пилу, кг/м^3 від 1000 до 4500
- температура навколишнього повітря, °С від -5 до +35

- відносна вологість не вище, % 80
- атмосферний тиск, гПа 101,3±20

Примітка 1. Значення межі відносної погрішності 25% наведено у стандарті повітря робочої зони [4].

При контролі вмісту пилу у вугільних шахтах пред'являються трохи інші граничні вимоги з урахуванням специфіки вугільних шахт (дані МакНДІ [13]), а саме:

- діапазон виміру концентрації пилу, мг/м³ від 10 до 500
- межа припустимої абсолютної погрішності, мг/м³ ±(1+0,25С*)
(тут С* – фактична концентрація пилу, мг/м³)
- температура навколишнього повітря, °С від -5 до 35
- відносна вологість, % до 98
- густина речовини пилу, кг/м³ від 1 до 3
- номінальна напруга акумуляторної батареї, У 2,4
- маса, кг, не більш 3,5
- рівень вибухозахисту, особливо вибухобезпечний РО
- вид вибухозахисту, іскробезпечний електричний ланцюг І а.
- наявність краплинної вологи, пари, вибухонебезпечних газів, енергетичних перешкод і т.п.

Граничні величини параметрів при контролі пилових викидів у газоходах за даними регіонального Управління охорони навколишнього середовища приведені нижче [14]:

- діапазон зміни концентрації пилу, мг/м³ від 10 до 2000
- зміна швидкості повітря в газоходах, м/с від 4 до 40
- температура повітря в газоходах, °С ≤200
- межа припустимої абсолютної погрішності, мг/м³ ±(1+0,25С)
- надлишковий тиск, Па ≤2000
- характерні діаметри газоходів, мм від 500 до 3000
- наявність краплинної вологи у викидах є
- густина речовини пилу, кг/м³ від 0,8 до 4,5
- дисперсний склад пилових частинок, що характеризуються розмірами, мкм від 2 до 70
- діаметр контрольних отворів у газоходах, мм 40

Що стосується осілого пилу, то його відкладення спеціально не нормують, оскільки важлива не сама кількість осілого пилу, а його небезпека, що залежить від додаткових чинників. Параметри ж осілих пилових частинок, можна вважати ідентичними параметрам пилу, що витає в повітрі, оскільки випадання пилу в осад відбувається переважно з пилоповітряного потоку, якщо не брати до уваги просипаних частинок чи порошку при різних технологічних процесах, наприклад при транспортуванні, зокрема шахтними конвеєрами.

Узагальнюючи приведені дані, в першу чергу, проаналізуємо діапазон контрольованих концентрацій загальної маси пилу в атмосфері промислових підприємств. Як бачимо, весь він простирається від 0,1 до 2000 мг/м³. Якщо орієнтуватися на єдиний метод виявлення і реєстрації частинок, наприклад

оптичний, то очевидно, що охоплення всього цього діапазону не може бути реалізоване в одному пилімірі, беручи до уваги і той факт, що пил є і контрольованим і впливовим чинником, одночасно. Тому весь діапазон доцільно розбити, як мінімум, на чотири діапазони, що перекриваються, а саме: 0,1...50; 1...200; 10...500; 200...2000 мг/м³.

Для перших двох діапазонів вирішальним критерієм розбивки є необхідність виявлення малої кількості чи маси частинок. У цьому випадку фактор забруднення ще не настільки значимий, тому такі діапазони можна реалізувати в одному приладі для визначення концентрації пилу (пилімірі). Третій і особливо четвертий діапазон вимагають спеціальних заходів захисту від забруднення тим же пилом, що звичайно здійснюють широко розповсюдженими методами, наприклад, створенням потоку чистого повітря навколо контрольованого запиленого струменя [15], обдуванням чутливих елементів приладів очищеним повітрям [16, 17], встановленням захисних діафрагм [18] і т.п.

Наступним за важливістю показником є густина речовини контрольованого пилу. Приведений діапазон 1-4,5 т/м³ повною мірою характерний для гірничорудної промисловості. Він майже в два рази перекриває діапазон зміни густини речовини пилу, що зустрічається у вугільній промисловості. Тому загальний діапазон зміни густини речовини гірничопромислового пилу слід уточнювати і враховувати при контролі запиленості і створенні засобів його здійснення. Так, для вугільних шахт можна обмежитись діапазоном 1-3 т/м³.

Відносно дисперсного складу пилу необхідно мати на увазі, що пил – це аерозольна система з розмірами частинок від 1 до 100 мкм [19]. При цьому варто пам'ятати, що частинки малих розмірів (менше 2 мкм) мають незначну масу в загальному обсязі пилу, а, крім того, їх значимість для розвитку професійних захворювань не дуже велика, оскільки значна частина вдихуваного (респірабельного) пилу дуже малих розмірів видихається зовні [20]. Що ж стосується дуже грубого пилу (розміри частинок більше 60-70 мкм), то його значимість теж істотно падає через високу швидкість осідання в повітрі, отже поширюється він лише поблизу джерел пилу. Пил, що горить, наприклад вугільний, з такими ж розмірами частинок після його відкладення, зокрема у гірничих виробках, небезпечний у вибуховому відношенні, оскільки здатний здійснювати з поверхні, переходячи в зважений стан [21]. Проте, діапазон дисперсного розподілу промислового пилу можна трохи звужити, тобто вважати, що розмір його частинок змінюється від 2 до 70 мкм. Це відповідає і приведеним вище фактичним умовам у гірничо-видобувній промисловості, галузі найбільш несприятливій за пиловим чинником. Саме цей діапазон від 2 до 70 мкм варто брати до уваги при розробці методів і засобів пилового контролю в гірництві.

Більшість показників, що залишилися, можуть бути враховані при конструюванні приладів шляхом модифікації засобів контролю, особливо, якщо вони працюють на одному принципі. Таким чином, основними параметрами при контролі вмісту пилу варто вважати діапазон масової концентрації, густину

речовини і дисперсний склад, причому два останніх параметри істотно впливають на достовірність пилового контролю та й на умови праці.

Виконаний аналіз граничних параметрів засобів і об'єктів контролю дозволяє перейти до вибору прийнятного за універсальністю методу контролю запиленості, який можна було б використовувати для рішення проблеми контролю умов праці за пиловим чинником на сучасному рівні. Вибір методу здійснимо на основі аналізу й оцінки існуючих.

1.3. Порівняльний аналіз і оцінка існуючих методів і засобів контролю умов праці за вмістом пилу в повітрі

Крім базового гравіметричного методу визначення вмісту пилу в повітрі використовується ряд непрямих методів, показником концентрації у яких виступають інші фізичні параметри, що шляхом градування ставляться у відповідність певній масі пилу. До них відносять досить розповсюджені електричні, оптичні, радіоізотопний і акустичний методи. Дослідженням зазначених методів, присвячений ряд монографій [18, 22-24], оглядів [25, 26] і публікацій, що відбивають тенденцію розробок [27-36]. Є також роботи, у яких аналізуються властивості пилу і методи її контролю [37-45]. Тому обмежимося оцінкою основних методів за найбільш важливими критеріями, що характеризують їх здатність забезпечити необхідні види контролю умов праці за пиловим чинником в промислових умовах, зокрема на гірничих підприємствах. При цьому за кожним критерієм для аналізованого методу нараховувалися оцінні бали, що потім складалися і порівнювалися. Виконана оцінка по своїй суті є експертною [46] з обмеженим числом задіяних фахівців.

Нами використовувалася найбільш проста методика. Оцінка виставлялася або 0, або 1, а в деяких випадках – 0,5, залежно від ступеня відповідності методу обраному критерію. Причому критерії розділялися на функціональні і критерії працездатності приладів в тих чи інших умовах.

Для однозначності визначення ступеня відповідності методу певному критерію умов праці дамо коротку характеристику обраних критеріїв і відповідних граничних рівнів оцінки кожного з них.

Оперативність – характеризує просторовочасовий проміжок між початком і завершенням контролю. Правило оцінки:

0 – відбір проби і її аналіз рознесені в часі і проводяться в різних місцях і умовах;

1 – результат одержують безпосередньо під час контролю.

Безперервність – характеризує процес одержання результату в часі протягом зміни чи іншого виробничого циклу:

0 – контрольний вимір виконується відносно рідко, як правило, рідше одного разу в зміну;

1 – результати контролю можуть видаватися у вигляді безупинної часової діаграми циклічного чи дискретного часового ряду.

Енергоспоживання – характеризує вид чи джерело енергії, а також потужність, споживану пристроями:

0 – стиснене повітря і споживання електроенергії, що принципово не можна знизити до 2 Вт – граничного рівня потужності, що відповідає виду вибухозахисту – “іскробезпечний електричний ланцюг” [47];

1 – електричне слабкострумове джерело, що дозволяє виконати пристрої контролю портативними і безпечними при роботі у вибухонебезпечному середовищі (споживання енергії менше 2 Вт).

Збурювання середовища – ступінь перетворення фактичної концентрації приладами чи пробовідбірниками в контрольованому середовищі:

0 – аспірація запиленого повітря при контролі;

1 – спотворення фактичної концентрації в контрольованому середовищі на величину менше 10-12,5 %, тобто в 2-2,5 рази менше припустимої погрішності виміру концентрації пилу в повітрі робочої зони [4];

Точність – характеризує погрішність методу при вимірі масової концентрації пилу в повітрі робочої зони чи у викидах:

0 – відносна погрішність значно вище стандартної, передбаченої для шкідливих речовин у повітрі робочої зони – 25% [4];

1 – відносна погрішність істотно нижче 25%;

Працездатність враховує можливість роботи:

- у важких кліматичних умовах при температурі навколишнього повітря від -5 до +35 °С, відносній вологості до 98 %, атмосферному тиску 101,3±20 гПа, а також при наявності краплинної вологи, енергетичних перешкод, вибухонебезпечних газів і т.п.;

- у газоходах шахтних котелень при температурі газів у викидах до 200 °С і тиску в газоходах до 2000 гПа;

- в умовах високої запиленості (до 2000 мг/м³).

За критеріями працездатності оцінка 1 припускала можливу працездатність приладу при зазначених умовах контрольованого середовища. Оцінка 0 виставлялася, якщо метод принципово не можна застосовувати при зазначених параметрах середовища. Оцінка 0,5 за всіма критеріями виставлялася у випадках, коли для забезпечення відповідності критерію оцінюваним методом чи пристроєм вимагається: більше часу чи витрат праці, використання механізмів (роботів), додаткових пристроїв, коректування результатів і т.п. Оцінки основних методів контролю запиленості за найбільш важливими критеріями наведені в табл.1.2.

Як видно з табл.1.2, сумарну оцінку 6 балів набрали оптичні методи (крім денситометричного). Очевидно, що приведена оцінка не претендує на повну об'єктивність, але дозволяє виявити тенденцію розвитку методів контролю. Тому в основу концепції розвитку методів і засобів пилового контролю, з урахуванням виконаних оцінок, варто покласти оптичний метод. Він відноситься до найбільш вивчених методів визначення концентрації аерозолів. Розробка його стала можливою завдяки фундаментальним дослідженням в області теорії розсіювання і поглинання світла окремими частками, початок яким було покладено Релеєм, Лоренцом, Дебаєм і Мі [48]. Пізніше ці дослідження доповнювалися і поглиблювалися стосовно до конкретних умов,

певних середовищ і частинок. Результати цих досліджень можна знайти в монографіях Ван де Хюлста, К.С. Шифріна, А.П. Іванова й ін. [49-54].

Таблиця 1.2 – Експертна оцінка методів контролю запиленості за найбільш важливими критеріями

Основні методи	Оцінка в балах								
	За функціональним критерієм:					За працездатністю:			
	Оперативність	Неперервність	Енергоспоживання	Збурення середовища	Точність	У важких кліматичних умовах	В газоходах	В умовах високої запиленості	Σ
Гравіметричні:									
- з аспірацією	0	0,5	0	0	1	1	0,5	1	4
- з осадженням в електричному полі	0,5	1	0,5	1	1	0	0	0,5	4,5
Електричні:									
- контактний	1	1	0	0	0	0,5	1	1	4,5
- заряду в полі	1	1	0,5	0,5	1	0	0	0,5	4,5
- ємкісний	1	1	1	1	0	0	0,5	0,5	5
Оптичні:									
- денситометричний	0,5	0,5	1	0	0	0,5	0,5	0,5	3,5
- абсорбційний	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	6
- інтегрального світлорозсіювання	1	1	1	0,5	0,5	9,5	1	0,5	6
- рахування частинок	1	1	1	1	0	1	1	0	6
Радіоізотопний	0,5	0,5	1	0	0,5	0,5	1	1	5
Акустичний	1	1	1	0,5	0	0	0	0	5,5

Опис оптичних методів контролю аерозолів можна знайти також у роботах [18, 22,24-26, 29-31, 36, 37, 40, 41]. Оптичні методи продовжують досліджуватися і знаходять широке практичне застосування при розробці засобів контролю параметрів атмосфери, зокрема, вмісти пилу з використанням нових даних про властивості аерозольних частинок, нових напівпровідникових джерел і приймачів світла, а також нових схем виявлення і реєстрації частинок.

Як видно з табл. 1.2, оптичний метод підрозділяється на чотири основних напрямки: денситометричний, абсорбційний, інтегрального світлорозсіювання і рахування частинок, засновані на розсіюванні світла чи його абсорбції

(поглинанні). З перерахованих напрямків тільки денситометричний метод, згідно табл.1.2, має мінімальний рейтинг (3,5), оскільки вимагає виділення пилового осаду, як правило аспірацією частинок з потоку, і не відповідає деяким іншим критеріям, тому він не може бути використаний як універсальний для контролю перерахованих вище факторів, зв'язаних із промисловим пилом.

Напрямки оптичного методу, що залишилися, а саме: абсорбційний, інтегрального світлорозсіювання і рахунковий одержали однаково високі експертні оцінки (по 6 балів). Вони не вимагають попереднього осадження пилу і мають додатково ряд переваг, наприклад, можливість вимірів безпосередньо в пило-повітряному середовищі, високу чутливість, малу інерційність та ін., тобто повніше відповідають вимогам, що ставляться до засобів промислового пилового контролю.

Істотним недоліком оптичного методу (загальним для всіх напрямків) є відносно невисока точність визначення масового вмісту пилу [55], обумовлена властивістю частинок пилу, починаючи з мінімального розміру (1-2 мкм), розсіювати світло пропорційно перетину частки, а не її об'єму чи масі [41, 49-54]. Тому велика кількість малих частинок розсіюють чи послабляють світло (у залежності від методики фотометрії) інтенсивніше, ніж така ж масова кількість великих. Зазначена обставина змушує відмовлятися від інтегральних оптичних методів, згідно яких аналізується хмарина полідисперсного пилу (абсорбційний метод і метод інтегрального світлорозсіювання), а орієнтуватися на оптичні лічильники окремих частинок з одержанням можливо більшої інформації про параметри зваженого пилу з наступною її оперативною обробкою і формуванням інтегральних характеристик пилу. При цьому варто звернути увагу на те, що оптичний лічильник взагалі призначався для визначення кількості частинок, що витають, тобто для визначення рахункової концентрації частинок у контрольованому об'ємі повітря і не розрахований для визначення масового вмісту пилу. Тому за критерієм "точність" лічильники мають оцінку 0. Однак від рахункової концентрації (по суті диференціальної оцінки) можна перейти до інтегральної оцінки, – масової концентрації пилових частинок, шляхом селекції частинок і наступних аналітичних перетворень рахункового розподілу в масовий [56, 57]. Остання обставина, а також розвиток мікропроцесорної техніки дозволяють перейти від методу оптичного рахування пилових частинок до більш перспективного, на наш погляд, методу контролю масового вмісту пилу в повітрі, який можна назвати – лічильно-інтегральним.

Наступний аспект вибору – це якому оптичному лічильнику віддати перевагу: абсорбційному, котрий працює на ослабленні світла частинкою, чи лічильнику, що працює на принципі світлорозсіювання? Експертний підхід орієнтує розвиток методів на абсорбційний лічильник за двома додатковими критеріями. По-перше, ослаблення світла частинкою завжди більше величини розсіювання, тому абсорбційний лічильник можна вважати більш інформативним (навіть, якщо реєструвати повне розсіювання, коли неминуча втрата частини світла, розсіяного частинкою у бік джерела світла і фотоприймача [54]). По-друге, схема абсорбційного фотометра простіше, а,

виходить, надійніша, ніж схема навіть найбільш простого полярного фотометра, що реєструє світло, розсіяне частинками під деяким кутом щодо спрямованого пучка.

Наступним по значимості недоліком оптичного абсорбційного методу (після відносно низької методичної точності), що вимагає усунення чи компенсації, є забруднення оптики контрольованим же, але осілим на оптичні елементи приладу пилом. Він визначає надійність методу і, в свою чергу, теж впливає на точність. Доречно відзначити, що пил взагалі вважається важко вимірюваною фізичною субстанцією і не тільки через велику розмаїтість складу, виду і форми частинок, а тому, що пил є і контрольованим, і впливовим чинником одночасно. У зв'язку з останньою обставиною, перспективними будуть такі методи, що забезпечать відокремлення цих двох факторів.

На практиці, боротьба із забрудненням оптики осілим пилом ведеться двома шляхами:

- виключенням осідання пилу на оптичних елементах (шляхом створення потоку чистого повітря навколо контрольованого запиленого струменя, обдуванням оптичних елементів чистим повітрям), а також застосування електронагрівних захисних стекол, використання електричних зарядів для відштовхування частинок і т.п.[58, 59];

- компенсацією забруднення за рахунок застосування різних фотометричних схем [24, 58, 59, 60].

Можливе одночасне використання обох способів. Примітно, що задача компенсації забруднення оптики може бути вирішена в запропонованій авторами абсорбційній фотометричній схемі [34, 61], шляхом виділення швидко мінливого імпульсного сигналу, обумовленого ослабленням світла частинкою що витає (пролітає), на тлі повільно мінливого ослаблення світлового потоку, викликаного осідаючої пилом, тобто може бути забезпечений поділ інформації про пил, що контролюється в повітрі, та пил, що осідає на оптичних елементах.

Таким чином, виконаний аналіз методів, дозволяє зупинитися для подальших досліджень на оптичному абсорбційному лічильно-інтегральному методі, як найбільш перспективному для контролю вмісту пилових частинок у повітрі чи газі.

1.4. Контроль вмісту тонкої і грубої фракцій пилу в повітрі робочої зони

Контроль вмісту фракцій пилу представляється як розвиток розглянутих вище методів контролю вмісту пилу в повітрі аж до визначення його повного дисперсного складу. Потреба в ньому обумовлена переважно гігієнічними вимогами. Так, основний фактор, що впливає на захворюваність пневмоконіозами, – це кількість пилу, що міститься у вдихуваному повітрі з урахуванням його дисперсності [5, 6, 20, 62]. У більшості закордонних країн склалася практика контролю тільки тонко-дисперсного пилу, здатного попадати глибоко в дихальні шляхи [8]. Тому при вимірах запиленості запропоновано враховувати криві затримки пилу (див. рис.1.2, де по осі абсцис відкладений

аеродинамічний діаметр частинок, а по осі ординат – ступінь відділення частинок, % [9]) і комплектувати вимірники запиленості відповідними розділовими пристроями.

В Україні, як у СНД і деяких інших країнах, для гігієнічної оцінки стану повітряного середовища за пиловим чинником прийнята маса виваженого в повітрі пилу з урахуванням її дисперсності. При цьому гігієнічно обґрунтований вимір усього пилу, що витає в повітрі, з поділом його на дві фракцій – тонку і грубу (двоступінчаста гравіметрія) [6, 63, 64].

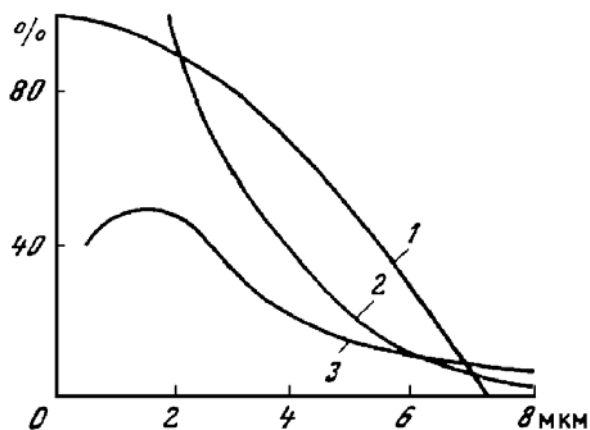


Рисунок 1.2. – Характеристики розділових пристроїв і затримки пилу: 1 – Йоганесбургська, теоретична крива; 2 – Лос-аламоська крива; 3 – крива затримки пилу в легенях

Поділ пилу в сучасній практиці здійснюється за допомогою різних аеродинамічних сепараторів, наприклад, циклонів чи пластинчастих елетрьюаторів, що звичайно розміщують на вході пиловідбірних пристроїв вимірників запиленості [9, 65]. Такі роздільники вносять значні збурювання в контрольовані потоки, знижуючи достовірність контролю пилу приладом.

Альтернативою механічним роздільникам можуть виступати непрямі вимірники вмісту пилу, чутливість яких значно міняється в області зазначених розмірів частинок пилу. Так працює, наприклад, оптичний пиломір марки "TM digital", що базується на принципі полярного фотометра з реєстрацією інтегрального світлорозсіювання на частинках під кутом близько 60° [29, 31]. Інтенсивність світлорозсіювання в цій області кутів забезпечує крутоспадну характеристику чутливості приладу при збільшенні розмірів частинок пилу. Це дозволило забезпечити методичну сепарацію тонкого пилу з загальної маси й у такий спосіб обійтися без розділового пристрою, знизивши до мінімуму збурення пилового потоку. При цьому прилад може контролювати тільки тонко-дисперсну фракцію пилу.

Перехід на двоступінчасту гравіметрію вимагає одночасного чи почергового контролю як тонкої, так і загальної маси пилу. Такий підхід реалізований в оптичному денситометричному пиломірі типу «ДПВ» [65] і радіоізотопному приладі типу «ИКАР» [9] чи його модифікації «РКП», основними недоліками яких є необхідність відбору й осадження пилових проб з потоку, що істотно знижує достовірність контролю.

Фракційний склад можна контролювати, виконуючи електронно-мікроскопічні дослідження пилу [66], однак точність цього методу теж буде істотно залежати від методу відбору пилової проби і методики розрахунку маси частинок, що спостерігаються. Це особливо актуально для пилу з високою густиною речовини, наприклад, пилу, що містить уран [67].

Рахунковий оптичний метод, реалізований у серійних стаціонарних чи переносних аерозольних лічильниках типу “Сигма”, “Дельта”, “АЗ-3”, “АЗ-5”, “АЗ-6” [15, 22, 24, 40], дозволяє контролювати фракційний (дисперсний) склад пилу. З позицій двоступінчастого контролю таке рішення є якоюсь мірою надлишковим. При цьому однак потрібно ув'язування рахункової концентрації частинок з масовою, а крім того, жоден з перерахованих вище лічильників не забезпечує працездатності в умовах високої запиленості промислових підприємств.

Відомі також оптичні прилади, що використовують принцип визначення дисперсного складу аерозолі за величиною розсіювання світлового потоку частками під малими кутами, зокрема, хмарного аерозолі чи крапель в парових установках і ряд інших [37, 68-71]. Принцип їхньої дії полягає в тому, що хід кривої інтенсивності розсіяного частинками світлового потоку при зміні кута спостереження в діапазоні малих кутів несе однозначну інформацію про дисперсний склад частинок, що заповнюють досліджуваний об'єм, через який пропускається світловий пучок. Залежність ця неявна і виявляється за допомогою структуро-чутливих математичних перетворень. Аналіз змін інтенсивності світла від центра до периферії дифракційної картини світлового пучка, що пройшов через згаданий об'єм, виконувався різними способами, включаючи трудомістку фотометрію самої дифракційної картини чи її фотографічних зображень. Математичні ж перетворення, що передбачають перемноження і диференціювання отриманих функцій, найчастіше проводилися графоаналітичними методами.

Сучасна мікропроцесорна техніка дозволяє виконати таку обробку оперативно, але вимагає створення прецизійного портативного роботизованого пристрою для сканування дифракційної картини з наступною мікропроцесорною обробкою одержуваної інформації. Це – дорогий пристрій може бути в принципі створено для лабораторних досліджень, але не підходить для експлуатації у промислових умовах через низьку надійність при значній запиленості повітря. Крім того, цей метод відноситься до інтегральних оптичних, недоліки якого розглянуті вище, головним з яких є постійний відхід “нуля” приладів через забруднення оптичних елементів пилом.

1.5. Короткий аналіз методів контролю виносу пилу

Оцінка виносу пилу чи його викидів, крім визначення вмісту пилу, передбачає додатково визначення швидкості газового потоку з наступним розрахунком об'єму газу і маси виносу пилу (викидів) [14, 72]. При цьому вимір швидкості в газоповітряних потоках має свої особливості і являє собою

окрему технічну задачу, від рішення якої залежить достовірність контролю викидів речовин у навколишнє середовище [73].

Швидкість газових потоків у точках вентиляційного каналу чи газоходу визначають, як правило, класичним методом за допомогою пневмометричних трубок і мікроманометрів [74]. При цьому для правильного розрахунку швидкості потоку необхідно знати склад газу, його температуру і статичний тиск.

Пневмометричні трубки забезпечують вимір швидкості потоку приблизно з 5 до 40 м/с. При цьому вони мають нелінійні характеристики, не досить надійні при роботі в запиленому середовищі і не зручні при тривалих безупинних вимірах.

Часто швидкість вимірюють анемометрами – тахометричними приладами з гвинтовими вертушками чи крильчатками з пластмаси або легких металевих сплавів [74-76]. Металеві вертушки стійкі до температурних впливів. Такі прилади мають тарувальну характеристику, близьку до лінійної, і зручні у використанні. Вони розраховані переважно на вимір швидкості в діапазоні 0,25- 10 м/с. Максимальна швидкість потоку для таких приладів звичайно не перевищує 20 м/с і залежить від типу підвіски вертушок.

Тарувальні характеристики вертушок хоча і лінійні, але не виходять з початку координат. Іншими словами, мається постійний зсув, обумовлений переважно тертям в елементах підвіски вертушок, що викликає запізнювання зміни частоти обертання від швидкості потоку (ковзання лопаток вертушки відносно потоку повітря), що, як правило, вимагає приладової компенсації. В міру забруднення чи зносу елементів підвіски, величина ковзання змінюється, що веде до зсуву тарувальних характеристик. При цьому росте погрішність тахометричних приладів, що спочатку, як правило, не перевищує 3%. Крім того, при швидкостях потоку порядку 30 м/с частота обертання вертушок може досягати 20000 об/хв. Такі високі обороти приводять до інтенсивного зносу підвіски чи руйнування лопаток, що збільшується наявністю пилу в потоці і підвищеної температури. З огляду на викладене, можна рекомендувати тахометричні датчики швидкості тільки для оперативного контролю викидів при дотриманні вимог стійкості до підвищених температур.

Відомі також вихрові і коливальні датчики швидкості потоку [77]. Вихрові прилади мають переваги перед тахометричними, завдяки відсутності елементів, що рухаються, але в сильно турбулентних чи забруднених потоках процес утворення регулярних вихрів у таких приладах порушується. Тому їхнє використання при оцінці промислових викидів обмежено. Зразки ж коливальних датчиків швидкості на основі пружних стрічок, лопат, пластин і т.п. здатні працювати в забрудненій промисловій атмосфері, однак через резонансні властивості механічних елементів такі вимірники мають обмежений діапазон контрольованих швидкостей потоку.

Проведений короткий аналіз існуючих методів і засобів визначення швидкості потоку газу при оцінці промислових викидів показав, що для оперативного контролю можна обмежено використовувати пневмометричні трубки і тахометричні прилади з металевими чи пластмасовими вертушками

при відповідній доробці. Для стаціонарного ж контрольного пункту необхідна розробка нових методів і засобів.

1.6. Аналіз існуючих методів і засобів контролю пиловідкладення і пилового навантаження

Під пиловідкладенням у широкому сенсі варто розуміти процес накопичення пилу у вентиляційних спорудженнях чи каналах, зокрема, у гірничих виробках, або на територіях, що примикають до джерел пилоутворення. Для його оцінки в охороні праці, згідно рис.1.1, передбачений окремий вид контролю, що відносять до інженерного. У вузькому сенсі – це може бути пил, що осів у легенях людини. Для його непрямой оцінки контролюють пилове навантаження, тобто кількість пилу, вдихуваної робітником на протязі зміни [78]. Такий контроль відносять до гігієнічного (рис.1.1). Поняття пилового навантаження може бути поширено і на технічні об'єкти, зокрема, гірничі виробки. У цьому випадку під пиловим навантаженням мають на увазі кількість пилу, що надійшла протягом зміни чи доби в гірничу виробку [79-81]. Такий вид інженерного контролю теж можна розглядати як один з непрямих методів контролю пиловідкладення.

Контроль пиловідкладення в широкому сенсі насамперед важливий при оцінці вибухонебезпечного стану виробок вугільних шахт, небезпечних по газу і пилу, що здійснюється з урахуванням додаткового чинника – концентрації метану в шахтній атмосфері. Цей контроль, як показано в табл.1.1, зводиться до визначення маси пилу, що осів з атмосфери на одиницю поверхні за визначений встановлений чи обмірюваний проміжок часу. Повна характеристика пиловідкладення [21, 81] визначається масою пилу, що осів:

- в одиниці об'єму вентиляційного каналу – P_v , г/м³;
- в одиницю часу в одиниці об'єму вентиляційного каналу – P , г/(м³доб);
- на одиниці довжини вентиляційного каналу – P_l г/м;
- на одиниці поверхні вентиляційного каналу – P_s , г/м².

У практиці гірничої справи вентиляційними каналами служать гірничі виробки. Для них найбільш важливими є показники P_v і P . Перший показник характеризує умовну концентрацію пилу, тобто щільність пилової хмари, що створюється за умови, коли весь пил, що відклався, перейде у повітря. Цей показник використовують при розрахунку необхідної кількості інертного пилу для осланцювання виробок. Другий показник характеризує швидкість накопичення пилу в об'ємі виробки і визначає необхідну періодичність застосування протипилових заходів. Показник P називають інтенсивністю пиловідкладення. Цей показник є найважливішою характеристикою пыловибухонебезпечності гірничих виробок. Інтенсивність пиловідкладення P може бути виражена через наведені вище величини:

$$P = \frac{P_v}{t} = \frac{P_l}{t \cdot S} = \frac{P_s P_e}{t \cdot S_v}, \quad (1.1)$$

де t – час пиловідкладення, діб; S_v – поперечний переріз виробки, m^2 ; P_y – периметр виробки, м.

Найчастіше пиловідкладення на стінках виробок оцінюють візуально за кольором їх поверхні чи за наявністю сухого не зв'язаного вугільного пилу [1]. Такий спосіб контролю носить оцінний характер. Він є не тільки суб'єктивним, але і дуже трудомістким, оскільки маємо значну довжину виробок, що підлягають огляду.

Крім візуального, існують і інші методи контролю пиловідкладення, що практикувалися в різний час і не тільки на гірничих підприємствах [21, 81]. Так, відносно простим методом є збір осілого пилу. Для цього на ґрунті встановлюються спеціальні полиці-підкладки (пластмасові, металеві), а пиловідкладення визначається за осадом пилу за визначений час у грамах на $1 m^2$ поверхні.

Для боротьби з вибухами пилу необхідно знати концентрацію пилу в одиниці об'єму, що утворюється при переході осілого пилу в повітря у зважений стан. Тому визначають добову інтенсивність пиловідкладення в грамах на $1 m^3$ об'єму виробки у вигляді

$$P = 4,35 \frac{b_1 \cdot m}{S_v \cdot F_s \cdot t}, \quad (1.2)$$

де m – кількість зібраного пилу, м; b_1 – ширина виробки по ґрунті, м; F_s – площа полиці, m^2 ; t – час відбору проби, діб.

У цьому випадку відбір проби повинний охоплювати весь цикл робіт, зв'язаних з утворенням пилу, а маса пилу, зібрана з полки, повинна бути не менше двох грамів. Така точкова методика поряд з візуальним методом є базовою при контролі пиловідкладення вугільного пилу в гірничих виробках вугільних шахт [1].

Практикувався вимір пиловідкладення і портативними приладами. Так, для контролю вугільного пилу, що відклався в шахті, були розроблені прилади типу КПР-1, КПР-1М (МакНДІ) [82-84] і ДПВ-1 (ВостНДІ) [81]. По своїй суті – це приладова модифікація вищевикладеного методу збору пилу на полки з тією лише різницею, що масу пилового осаду визначають на підкладці безпосередньо за допомогою згаданих приладів.

Принцип дії радіоізотопного приладу КПР-1 заснований на контролі бета-частинок, відбитих від покритою осілим пилом породної підкладки, що створюють в іонізаційній камері приладу струм, пропорційний товщині шару пилу, а отже, його поверхневій концентрації ($г/м^2$).

Принцип дії приладу ДПВ-1 заснований на зміні оптичної щільності фільтрувальної тканини ФПП-15, через яку проходить пило-повітряна суміш. Для виміру пиловідкладення приладом ДПВ-1 використовується спеціальна приставка. Її дія заснована на здійманні пилу, що відклався, струменем повітря, що виходить з великою швидкістю із сопла, з наступним засмоктуванням пило-повітряної суміші, що утворилася, у фільтр за допомогою того ж повітряного струменя, створюваного ручним аспіратором. Прилад дозволяє визначити

пилівідкладення на одиницю поверхні ґрунту гірничої виробки P (г/м²). Його недоліками варто вважати відносно невисоку точність, а також велику (до 5 хв.) тривалість і трудомісткість вимірів.

Як і в попередньому методі, за допомогою портативних приладів виконується точкова оцінка пилівідкладення. Вона вимагає інтерпретації отриманих результатів, тому розроблювачами була запропонована формула для визначення повного пилівідкладення на ґрунті виробки у вигляді [21]

$$P=Nb_1k_1k_2k_3 \quad (1.3)$$

де N – показання приладу, г/м²; k_1 , k_2 і k_3 – коефіцієнти, що враховують відповідно нерівномірність пилівідкладення на ґрунті, пилівідкладення на боки і покрівлю виробки, а також за її кріпленням.

Таким чином, інтерпретація зводиться до оцінки пилівідкладення за емпіричними коефіцієнтами, що для підвищення статистичної достовірності вимагає досить великої кількості точкових вимірів. Точковий же принцип контролю пилу, що осів на горизонтальних поверхнях чи підкладках, обумовлює значну помилку вимірів пилівідкладення у вентиляційних каналах. Це стане ясным, якщо взяти до уваги, що пил осаджується не тільки під дією сили тяжіння, але й у результаті пульсацій турбулентного потоку, що приводить до осадження пилу на стінках каналів по всьому периметру. Тому гравітаційна складова має в загальному осадженні лише деяку частину, що істотно залежить від розміру частинок пилу. При цьому дифузійне осадження теж залежить від розміру частинок і аеродинамічних параметрів контрольованого вентиляційного каналу.

З урахуванням викладеного, розробку згаданих приладів не можна вважати оптимальним рішенням задачі контролю пилівідкладення, унаслідок низької показності результатів точкових вимірів. (Звичайно її можна підняти, обміривши таким приладом усю поверхню вентиляційного каналу чи виробки з якимсь оптимальним кроком по периметру і довжині, але це навряд чи прийнятно у виробничих умовах). Крім того, будь-які непрямі методи оцінки маси пилового осаду мають свою досить велику погрішність, а результати контролю будуть залежати ще і від досвіду оператора.

Слід також зазначити, що використання переносних, але досить трудомістких в експлуатації приладів контролю пилу, що відклався, для цілей оперативного (щодобового) контролю, зокрема в гірничих виробках, вимагає виділення спеціального штату вимірщиків, що може складати за даними МакНДІ до 20 чоловік на середню шахту. Разом з тим, контроль за допомогою переносних приладів недостатньо надійний ще і тому, що вибухонебезпечна ситуація може виникнути в будь-який проміжок часу між черговими вимірами.

Відомі також і розрахункові методи визначення пилівідкладення. Їх застосовують для визначення інтенсивності пилівідкладення з метою нормалізації сланцевого захисту у вугільних шахтах [85] чи відкладення пилу, утвореного в результаті руху мобільних технічних засобів, наприклад, вагонів з

вугіллям [21]. Так, якщо вважати, що весь пил з повітря осяде, то пиловідкладення складе

$$P = \frac{3.6 \cdot v \cdot C \cdot n_{cp}}{v_u}, \quad (1.4)$$

де C – запиленість повітря в середній крапці джерела, що пересувається, пиловідкладення, $г/м^3$; v_u – середня швидкість руху джерела пилоутворення, $м/с$; n_{cp} – середнє число рейсів джерела пилоутворення.

Примітно, що подібні розрахункові методи застосовують у різних галузях промисловості. При цьому запиленість повітря оцінюють з урахуванням типових режимів роботи або гірничого устаткування [86-88]. Очевидно, що розрахункові способи мають чисто емпіричний характер, а їхні алгоритми застосовні в основному при безупинних режимах роботи технологічного устаткування. При дискретних або дискретно-безупинних режимах роботи вони дають наближену оцінку.

Альтернативою розглянутим методам може виступати дистанційний інструментальний контроль за допомогою датчиків пиловідкладення з передачею інформації про кількість пилу, що відклалася, на диспетчерський пункт шахти [89, 90]. Цілком очевидно, що створення такої системи зажадає, насамперед, розробки датчиків пиловідкладення, а потім розгляду питань про порядок їхнього використання. При цьому датчики пиловідкладення (радіаційний, резонансний [83, 84]) будуть мати ті ж недоліки портативних приладів, оскільки реалізується той же точковий принцип контролю відкладеного пилу, що посилюються стаціонарною установкою датчика.

Найбільше достовірно можна визначити пиловідкладення за зміною середньої концентрації пилу, що витає в повітрі [21, 79, 81]. Сутність відомого методу полягає в тому, що пиловідкладення на ділянці з запиленим потоком, що рухається, може бути визначене за різницею концентрацій пилу, визначених на границях цієї ділянки, обраних у напрямку потоку. При цьому за зміною концентрації пилу в повітрі в першу чергу може бути визначено пиловідкладення по довжині виробки. Дійсно, якщо в гірничій виробці, що вміщає джерело пилоутворення, вибрати два перетини, то середнє пиловідкладення на ділянці між цими перетинами можна виразити через різницю концентрацій пилу, що витає в повітрі, як

$$P_i = \frac{C_1 - C_2}{l_1 - l_2} q, \quad (1.5)$$

де C_1, C_2 – запиленість повітря відповідно в I і II перетинах, $г/м^3$; l_1, l_2 – відстані від джерела пилу до відповідних перетинів, $м$; q – кількість повітря, $м^3$.

У диференціальній формі залежність (1.5) має вид

$$P_l = -\frac{dC}{dl} q, \quad (1.6)$$

а з урахуванням $P_l = PSt$ і $q = 86400vS$, де v – швидкість руху повітря, м/с

$$P_l = -86400v \frac{dC}{dl} . \quad (1.7)$$

З формули (1.6) видно, що для виробок, що вміщують нерухоме джерело пилоутворення, інтенсивність пиловідкладення визначається залежністю $C = f(l)$, одержати яку можна теоретично чи експериментально.

Достоїнствами розглянутого методу є прийнятна точність і надійність отриманих результатів. Однак, його застосування вимагає тривалих вимірів запиленості повітряного потоку. Для цього необхідна розробка досить надійних засобів безупинного контролю вмісту пилу в повітрі, а також визначення за апіорними даними або шляхом безпосередніх вимірів об'ємної витрати чи швидкості запиленних потоків. По суті, необхідне створення системи автоматизованого контролю запиленості повітря, що одночасно вирішувала б і задачу контролю пиловідкладення з наступним визначенням рівня пиловибухонебезпечності гірничих виробок. Така система, у порівнянні з системою, що базується на датчиках пиловідкладення, представляється більш кращою, оскільки може забезпечити рішення й інших задач пилового контролю в шахтах.

Для узагальнення результатів аналізу методів інженерного контролю пиловідкладення теж доцільно мати експертну оцінку цих методів за найбільш важливими критеріями. Така оцінка приведена в табл.1.3. Причому оцінка за критеріями оперативність і безперервність проводилася так само, як і для методів контролю запиленості повітря.

Критерій достовірність обраний для оцінки в балах ступеня урахування всього пилу, що відклалася з повітряного потоку на ґрунт, стінки і покрівлю виробок або вентиляційних каналів, а також просипався при різних технологічних операціях та здатний здійматися під дією повітряного потоку підвищеної швидкості [86-93].

Оцінки виставлялися в такий спосіб:

0 – при визначенні пиловідкладення в точці;

1 – при інтегральній оцінці пиловідкладення чи при обліку практично всього пилу, що відклався;

0,5 – у випадку, коли достовірність точкових вимірів могла бути підвищена статистичним шляхом, наприклад, за рахунок більшої кількості вимірів, або у випадку неможливості обліку всього осілого пилу при інтегральній його оцінці.

Критерій трудомісткість обрана для характеристики потреби в персоналі, що проводить контроль, розраховуючи на велику довжину гірничих виробок чи вентиляційних каналів:

0 – необхідність спеціального штату вимірщиків;

1 – автоматичний контроль пиловідкладення;

0,5 – у випадках, коли контроль може здійснюватися наявним черговим персоналом, що виконує функції контролю охорони праці.

Критерій точність аналогічний критерію точності, розглянутому при контролі концентрації пилу в повітрі, і характеризує погрішність методу при вимірі маси осілої пилу:

0 – при відносній погрішності значно вище нормативної в 25%;

1 – відносна погрішність істотно нижче 25%;

0,5 – у разі потреби виконання розрахунків після безпосередніх вимірів із уведенням різних виправлень, наприклад на дисперсність, речовинний склад пилу, закономірності його осадження і т.п.

Таблиця 1.3 – Експертна оцінка методів інженерного контролю пиловідкладення

Основні методи визначення пиловідкладення [8]	Функціональні критерії:					Σ
	Оперативність	Безпечність	Достовірність	Трудомісткість	Точність	
<u>Візуальний</u>	0	0	0,5	0	0	0,5
<u>Гравіметричні:</u>						
- обмітання пилу;	0	0	1	0	1	2
- збору пилу на полки;	0,5	1	0,5	0,5	0,5	3
<u>Розрахунковий</u>	1	1	0	1	0	3
<u>Портативними приладами:</u>						
- за концентрацією пилу в повітрі;	0,5	0,5	1	0,5	0,5	3
- радіаційним;	0,5	0	0,5	0,5	1	2,5
- резонансним;	0,5	0	0,5	0,5	1	2,5
<u>Стаціонарними приладами :</u>						
- за концентрацією пилу в повітрі;	1	1	1	1	0,5	4,5
- радіаційним;	1	1	0	1	1	4
- резонансним;	1	1	0	1	1	4

Аналіз отриманих сумарних оцінок для приладових методів контролю пиловідкладення показує, що використання переносних портативних приладів безпосереднього контролю осілого пилу (оцінка 2,5) навіть менш ефективне, чим при зборі пилу на полки або використанні розрахункових методів (оцінка 3). Тому для цілей оперативного контролю пиловідкладення створювати такі портативні прилади вважаємо, – не доцільно, хоча вони можуть знайти застосування як засоби періодичної перевірки працездатності і достовірності інших методів і засобів контролю пиловідкладення, тобто їх можна

використовувати в якості зразкових при наявності відповідних методик їх застосування.

Необхідно звернути увагу на те, що контроль пиловідкладення портативним приладом за концентрацією пилу в повітрі (оцінка 3) є по своїй суті і методом контролю пилового навантаження, згаданого на початку підрозділу. Метод припускає визначення кількості пилу, що надійшов на протязі робочої зміни, за середнім значенням величини концентрації пилу в повітрі, а далі величини пиловідкладення, з урахуванням ступеня осідання пилу. Необхідність накопичувати середні значення й апріорі знати ступінь осадження пилу в умовах конкретної гірничої виробки істотно впливає на рейтинг методу, що може бути підвищений шляхом доробки на основі досліджень динаміки осідання пилу.

Стаціонарні засоби контролю пиловідкладення одержали оцінки 4-4,5 і заслуговують на увагу. Вони можуть виступати як реальна альтернатива візуальному і гравіметричному методам, причому найбільш перспективним представляється метод контролю пиловідкладення по концентрації пилу в повітрі, що одержав найбільшу експертну оцінку 4,5. Очевидно, що метод вимагає розробки досить надійних засобів безупинного контролю запиленості повітря і досліджень пилодинаміки.

Тепер коротко зупинимося на методах і засобах контролю пилового навантаження, тобто фактично на методах і засобах контролю надходження пилу в легені людини [78] чи вентиляційні канали. При цьому пил може надходити в результаті виносу від його джерела чи попереднього вентиляційної ланки. Причому для наступної ланки це пилове навантаження виявиться зменшеним на величину пилу, що відклався.

Таким чином, пилове навантаження можна вважати чинником, що зв'язаний і з пиловідкладенням і з виносом пилу. Це – інтегральний показник, що і визначає методи і засоби його визначення. Зокрема, для оцінки пилового навантаження органів дихання робітників застосовують різні пристрої, що накопичують пил протягом зміни чи виробничого циклу [93-96]. Такі накопичувачі і подібні їм пилопробовідбірники можуть бути індивідуальними, або обслуговуються спеціальним оператором пиловентиляційної служби шахти.

Пилопробовідбірники індивідуального користування, типу пробовідбірника Мікульського [93], закріплюється на поясі, а його вхідний патрубок розташовується на касці робітника. Пробовідбірник французького виробництва типу СІР 10 [94], завдяки невеликій масі, дозволяє носити його поруч з дихальними органами людини в нагрудній кишені чи за допомогою перев'язу. Добір пилу в першому випадку здійснюється за допомогою мініатюрного насоса з циклоном, а в другому, – на обертовий пінополіуретановий фільтр, аналіз запиленості по яких здійснюється наступним зважуванням циклона чи фільтра. Перший прилад розрахований на роботу протягом зміни. Термін автономної дії приладу СІМ складає 20 годин. В обох приладах накопичується респірабельний (тонкий) пил, для чого швидкість аспірації пилу обрана з урахуванням особливостей органів дихання, тому вони служать тільки для гігієнічної оцінки умов праці робітників.

Гравіметричні пилопробовідбірники англійського виробництва типу 111А, 113А [95] чи їхні польські аналоги, наприклад “Barbara” [96], а також наступний “Barbara-3”, можуть використовуватися для оцінки пилового навантаження систем вентиляції за вмістом респірабельного пилу, але достовірність контролю при цьому буде невисокою, тому що не враховується швидкість запиленого потоку повітря.

Таким чином, питання про контроль гігієнічного аспекту пилового навантаження можна вважати вирішеним тільки за респірабельним пилом. Що ж торкається питання, зв'язаного з технічним аспектом пилового навантаження, то його рішення можливо, як нам представляється, на основі приладів непрямого контролю запиленості повітря з інтегруванням і усередненням їхніх показань за необхідні проміжки часу. При цьому перспективним є те, що від технічного аспекту пилового навантаження можна перейти до його гігієнічної оцінки, а також до визначення пиловідкладення і виносу пилу.

1.7. Концепція розвитку й удосконалювання методів і засобів контролю факторів безпеки, зв'язаних з пилом

Виконаний аналіз стану пилового контролю на промислових об'єктах і багаторічний досвід рішення задач, зв'язаних із проблемою пилового контролю, дозволяють сформулювати концепцію досліджень і розробок у цьому напрямку.

Суть концепції зводиться до поетапного створення і постійного удосконалювання непрямих методів виявлення пилу і датчиків пилових частинок промислового пилу, що працюють на основі цих методів, з наступною розробкою засобів контролю запиленості різного призначення, що допускають модифікацію стосовно до умов. Більш конкретно концепція включає положення, приведені нижче.

1. Створення і постійне удосконалювання методів і засобів контролю запиленості повітря, що впливає на умови праці, заснованих на непрямих методах, зокрема, на основі оптичного методу виявлення пилу.

2. Розробку на базі створених датчиків експрес-пиломірів різних модифікацій із примусовим протяганням запиленого повітря для проведення оперативного контролю загальної маси пилу на робочих місцях і у вентиляційних потоках, а також маси його респірабельної фракції або дисперсного складу пилу.

3. Розробку стаціонарних вимірників масової концентрації пилу з примусовим протяганням повітря і без нього, здатних функціонувати самостійно або в складі систем дистанційного контролю чинників безпеки праці, пов'язаних з пилом;

4. Розробку портативних переносних приладів для оперативного й інспекторського контролю інтенсивності пилових викидів:

- вимірника концентрації пилу, сполученого з вимірником швидкості потоку, що дозволить визначати масу викидів розрахунковим шляхом за даними обох вимірників;

- багатofункціонального вимірника з використанням одного датчика пилових частинок в потоці повітря, для визначення як концентрації пилу, так і швидкості запиленого потоку або безпосередньо масового виносу пилу;

5. Забезпечення контролю пиловідкладення в гірничих виробках вугільних шахт та наступного визначення їх вибухонебезпечності на основі даних, що отримують вимірниками запиленості повітря та додаткового чинника – концентрації метану в шахтній атмосфері, з урахуванням закономірностей поширення пилу і палих газів у гірничих виробках.

6. Забезпечення контролю пилового навантаження гірників розрахунковим шляхом на основі даних, що отримують від вимірників запиленості повітря в робочій зоні з урахуванням закономірностей поширення пилу у гірничих виробках та наступним оцінюванням ризику захворювання робітників на пневмоконіози.

1.8. Висновки

Аналіз стану пилового контролю на гірничих підприємствах і об'єктах, а також існуючих методів і засобів контролю чинників, що впливають на ефективність контролю умов праці за рівнем запиленості повітря, дозволяє зробити наступні висновки.

1. Наявність трьох основних факторів безпеки праці, пов'язаних із запиленістю, а саме: вміст пилу в повітрі, винос чи викид пилу і його відкладення, а також розмаїтість необхідних видів пилового контролю, поряд з відсутністю єдиного підходу у визначенні вмісту зваженого пилу в атмосфері гірничих підприємств, ускладнюють розробку необхідних для контролю запиленості засобів.

2. Складність виміру абсолютного значення масової концентрації пилових частинок у повітрі і неможливість на даному етапі створення еталона концентрації пилу вимагає удосконалювання базового гравіметричного методу визначення вмісту пилу, що залишається необхідним як для періодичного контролю умов праці так і для перевірки засобів контролю запиленості повітря, що розробляються.

3. Граничні величини впливових чинників, основних параметрів засобів і об'єктів пилового контролю на гірничих підприємствах характеризуються широким діапазоном значень контрольованих величин, розмаїтістю густини речовини пилу та умов проведення вимірів, що не дозволяють розраховувати на створення універсальних засобів, застосовних у всіх випадках, але націлює на прийняття єдиної концепції в їхній розробці.

4. Виконана оцінка існуючих методів і засобів пилового контролю дозволила покласти в основу концепції їх створення оптичний метод. Його наступний аналіз показав необхідність відмовлення від суто інтегральних методів, коли аналізують хмарину полідисперсного пилу, на користь абсорбційного лічильно-інтегрального методу, що передбачає одержання можливо більшої інформації про параметри окремих зважених в повітрі

частинок гірничопромислового пилу з наступною її оперативною обробкою і формуванням інтегральних характеристик запиленості повітря.

5. Аналіз існуючих методів і засобів контролю швидкості газоповітряних потоків, необхідних для оцінки виносу чи викидів пилу показав, що для оперативного контролю можна використовувати тахометричні прилади при їх відповідній доробці, спрямованій на розширення діапазону швидкості і підвищення стійкості в промислових умовах. Для стаціонарного ж застосування необхідна розробка нових методів і засобів контролю швидкості вентиляційних потоків, працездатних у запиленому середовищі при значних швидкостях повітря.

6. Існуючий точковий принцип контролю осілого пилу шляхом його збирання на полки або радіоізотопними приладами обумовлює низьку репрезентативність результатів вимірів, тому їх удосконалення не можна вважати оптимальним рішенням задачі контролю пиловідкладення. Перспективним є визначення пиловідкладення за середньою концентрацією пилу, що витає в повітрі, однак цей шлях вимагає підвищення надійності засобів безупинного контролю вмісту пилу в повітрі і створення нових методів чи моделей обробки інформації про запиленість повітря.

7. Запропоновано концепцію розвитку методів пилового контролю на гірничих підприємствах, що передбачає подальшу розробку оптичного абсорбційного лічильно-інтегрального методу контролю масового вмісту пилу в атмосфері гірничих підприємств на основі відомих теоретичних положень розсіювання світла на частинках і нових принципах обробки інформації про їх параметри, що одержують оптико-електронними засобами виявлення. Створення на основі цього методу засобів контролю вмісту загального і тонкого (респірабельного) пилу в атмосфері гірничих підприємств; спеціалізованих засобів контролю виносу пилу для періодичного чи стаціонарного застосування, що забезпечать достатню достовірність визначення пилових викидів в атмосферу підприємств чи у навколишнє середовище; удосконалення методів і засобів контролю відкладення вибухонебезпечного вугільного пилу у гірничих виробках, а також пилового навантаження гірників на основі даних безупинного контролю вмісту пилу в повітрі робочої зони й адекватних моделей його поширення в контрольованих потоках.

2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЛУ І ПИЛОВИХ ПОТОКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РЕЗУЛЬТАТИ КОНТРОЛЮ УМОВ ПРАЦІ

2.1 Аналіз критичних для контролю статичних характеристик пилу

Промисловий пил відрізняється великою розмаїтістю фізико-хімічних властивостей і відповідних їм статичних і динамічних характеристик. Багато досліджень пилу і його контролю включають спеціальні розділи з аналізом характеристик пилу. Інформацію з найбільш важливих з них можна знайти в роботах [9, 18, 19, 21, 22, 24, 39-42, 66, 91, 97-99].

Важливість тієї чи іншої характеристики пилу в пиловому контролі очевидно визначається методами його здійснення. Відповідно до прийнятої концепції розвитку пилового контролю, зупинимось на характеристиках, що визначають достовірність абсолютного (з допущеннями) гравіметричного і оптичного методу, що розробляється, маючи на увазі зв'язок цих методів у метрологічному забезпеченні контролю запиленості при передачі фізичної одиниці масової концентрації пилу. До найбільш важливих характеристик віднесемо: густину речовини пилу і її мінливість; дисперсний склад пилу і його варіацію, а також оптичні властивості пилових частинок, аналіз яких виконаємо з урахуванням задач пилового контролю на промислових підприємствах.

2.1.1 Оцінка й урахування густини речовини промислового пилу при контролі запиленості повітря

Загальновідомо, що густина речовини пилу визначає масу її частинок, що істотно впливає на їх поширення в атмосфері від джерел, витання частинок, осадження з потоку, а також на траєкторії руху частинок у цих потоках, тобто визначає динаміку пилу в повітрі чи газі. Тому при контролі пилу необхідно апріорі знати і враховувати густину речовини частинок. Інформація про густину речовини необхідна в наступних основних випадках:

- при безпосередньому визначенні вмісту пилу;
- при проектуванні засобів контролю запиленості;
- при виборі умов і місць розміщення засобів контролю в потоках;
- при розробленні методів перевірки істинності (достовірності) проведеного контролю.

Цілком очевидно, що істотне значення має не тільки густина речовини пилу, але і її мінливість, діапазон якої і буде визначати достовірність проведеного контролю. При цьому необхідно пам'ятати, що сумарна відносна погрішність визначення масового вмісту пилу в повітрі робочої зони від усіх факторів, які впливають на результати контролю запиленості, не повинна перевищувати нормативної величини 25 % [4]. Для такої важко вимірюваної субстанції як пил – це досить жорстка вимога, що може поставити під сумнів можливість виміру концентрації пилу в повітрі робочої зони приладами непрямого типу, зокрема, що працюють на оптичному принципі.

Оцінимо діапазон і мінливість густини речовини основних видів промислового пилу, а також ступінь її впливу на результати пилового контролю і можливі шляхи урахування чи компенсації цієї мінливості для підвищення його достовірності. Для оцінки скористаємося даними густини речовини, приведеними в [19, 100], з деякими доповненнями, отриманими з каталогів промислової сировини, і визначимо мінливість у межах відомих видів. Отримані при цьому числові характеристики, а саме: діапазон зміни густини речовини пилу кожного виду, його середнє значення, середній квадрат відхилення і її варіація приведені в табл. 2.1. [101].

Аналіз приведених у таблиці даних показує, що практично повний діапазон зміни густини речовини промислового пилу складає: $1000 - 8915 \text{ кг/м}^3$, тобто вона може приймати значення, що відрізняються на порядок (у межах однієї декади).

Максимальне відхилення густини речовини в межах одного виду пилу склало 27 % для залізородного пилу гірничих підприємств. У той же час середньоквадратичне відхилення для всіх представлених видів пилу, в тому числі вугільного і породного пилу, складає величину близько 12 %. Тому, відповідно до відомого статистичного правила 2-х “сигма” для випадкових величин, що підкоряються нормальному закону розподілу імовірності [102], можна затверджувати, що з імовірністю 0,95 відхилення густини речовини пилу в межах одного виду не перевищить 24 %. Це наочно представлено на рис. 2.1.

Таким чином, якщо апріорі відомий вид контрольованого пилу і ми можемо задати і врахувати при контролі його середню густину, то за рахунок її мінливості помилка при контролі в 95 % випадків не перевищить ± 24 %. Це значення можна вважати граничною теоретичною величиною мінливості, яку необхідно врахувати або компенсувати методичними чи апаратурними засобами для повного виключення погрішності від зміни густини речовини пилу.

На практиці, швидше за все, буде потрібно менша величина компенсації, оскільки в більшості випадків можна більш точно установити густину речовини контрольованого пилу за видом оброблюваного матеріалу чи сировини, що видобувається на певних гірничих підприємствах, відповідно до наявних класифікацій чи каталогів цих речовин. Так, згідно з даними табл. 2.1, для різного вугільного пилу величина компенсації чи погрішність не перевищить ± 9 %, а для усіх видів антрацитів ± 15 % і т.д.

Для апріорі відомого залізородного пилу погрішність буде теж істотно нижче зазначеної вище величини, оскільки значна різниця густини речовини практично не зустрічається у певних точках контролю пилу.

Таким чином, при достатній інформації про густину речовини контрольованого пилу, погрішність від її мінливості може бути істотно менше 24%. Звичайно необхідно врахувати й інші можливі погрішності при контролі. При цьому сумарна погрішність від дії усіх факторів, що впливають на результати контролю запиленості, може перевищити нормативну. Однак, якщо взяти до уваги той факт, що погрішності від різних факторів не є адитивними, а їх результуюча величина обчислюється як середня геометрична

всіх складових, то приладовий контроль запиленості, при знанні речовини контрольованого пилу і мінімізації інших помилок, може принципово забезпечити необхідну погрішність, не вищу за 25 %.

Таблиця 2.1 – Мінливість густини речовини промислового пилу

Пил	Можливі значення густини речовини, кг/м ³	Середні значення густини речовини, кг/м ³	Відхилення від середнього, ±	
			кг/м ³	%
1	2	3	4	5
Деревний	1210 - 1510	1360	150	11
Каоліновий		2600		
Кварцовий		2490		
Кремнієвого піску		2700		
Окислів цинку	5890 - 6520	6205	1315	21
Ливарного виробництва	4590 - 7330	5960	1370	23
Лляний	1170 - 1274	1222	52	4,1
Мідний	8180 - 9650	8915	735	8,2
Свинцевого білила	6170 - 6870	6520	350	5,4
Порцеляновий		2690		
Дубової деревини	1550 - 1580	1565	15	1
Сукняний	1390 - 2070	1730	340	19,6
Сурику	8640 - 8930	8785	145	1,6
Тютюновий	1820 - 1880	1850	30	1,6
Червоної цегли	2500 - 2600	2550	50	1,9
Вовняний		1550		
Волосяний	1730 - 2900	2315	585	25
Борошняний		1000		
Сланцевий		2600		
Тальковий	2600 - 2800	2700	100	4
Технологічної сірки		2300		
Залізний	5680 - 7880	6780	1100	16
Залізорудний (від сланцю до гематитової руди)	2770 - 4850	3810	1040	27
Вугільний (усіх відомих марок)	1253 - 1505	1379	126	9
Антрацитовий, включаючи пил напівантрацитів	1307 - 1766	1537	230	15

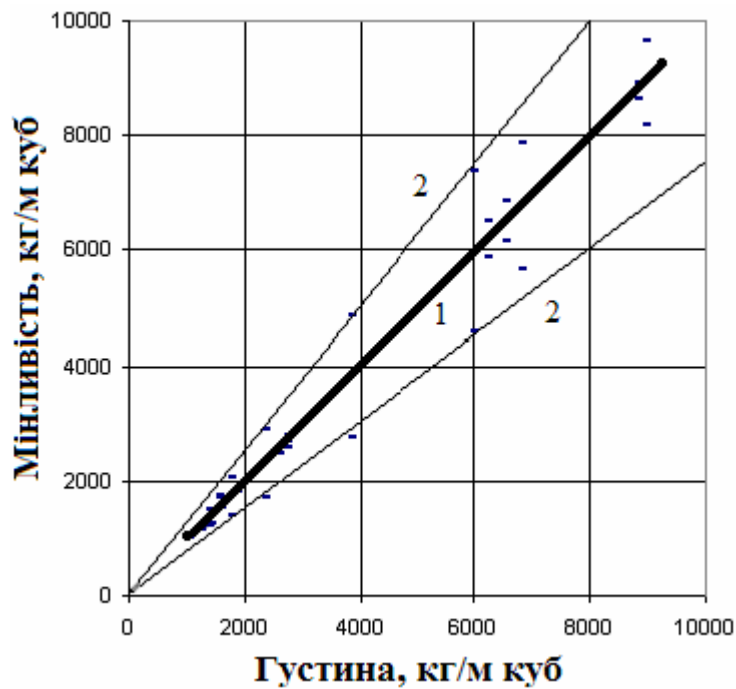


Рисунок 2.1 – Мінливість густини речовини пилу: 1 – лінія регресії; 2 – границі найбільшого відхилення

Розглянемо принципово можливі шляхи урахування чи компенсації густини речовини пилу для підвищення точності пилового контролю. Серед них:

- коректування результатів уже проведеного контролю після уточнення густини речовини пилу;
- урахування густини речовини при вимірах за апріорними даними;
- методична компенсація мінливості густини речовини.

У першому випадку результати виконаних вимірів коректують розрахунковим шляхом після уточнення густини речовини пилу. Іншими словами, спочатку проводять виміри, прийнявши значення, наприклад 1000 кг/м^3 , а потім отримані дані множать на поправочний коефіцієнт, що враховує фактичну густину речовини. Цей шлях відомий і використовується в методиках вимірів запиленості приладами непрямої дії, однак він обумовлює низьку оперативність. Доречно відзначити, що таким же шляхом доцільно враховувати густину речовини пилу і при контролі засобами, що використовують аспірацію запиленого повітря, оскільки від зміни густини речовини пилу буде залежати і характер аспірації частинок різної маси у вимірювальні канали чи на аерозольні фільтри.

Розроблювачів оперативних засобів пилового контролю в більшій мірі цікавлять другий і третій напрямки, тому що вони можуть бути реалізовані безпосередньо у вимірниках запиленості. Так, відповідно до другого напрямку, урахування густини речовини пилу при вимірах можна здійснити за апріорними даними, установлюючи вручну коефіцієнт перетворення електронної схеми вимірника, тобто, уводячи приладову компенсацію чи коректування при калібруванні приладів безпосередньо перед вимірами. Таким способом можна істотно знизити погрішність вимірників концентрації пилу. У першу чергу, це

стосується засобів, що використовують непрямі методи визначення вмісту пилу в повітрі, до яких, зокрема, відноситься оптичний метод.

Пропонований принцип установки густини речовини пилу використовувався при розробці шахтних вимірників запиленості повітря, у яких густина речовини пилу заздалегідь установлювалася вручну в спеціально передбаченому режимі приладу, що передує режиму виміру масової концентрації, і показав непогані результати [103].

Наступний шлях передбачає методичну компенсацію густини речовини, тобто таку, котра забезпечується самим методом контролю запиленості. Сутність його пояснимо на прикладі оптичного методу, що працює на принципі світлорозсіювання на частках пилу [104]. Для цього звернемося до даних табл.2.2 [100], з якої випливає, що з ростом густини речовини вугільного пилу росте й оптичний коефіцієнт переломлення, тому буде зростати величина потоків розсіювання на таких частинках, а, отже, і значення масової концентрації пилу, що реєструватиметься оптичним вимірником.

Зазначена властивість забезпечує методичну "самокомпенсацію" густини речовини пилу. Вона використовувалася нами в шахтному фотопілоримі, розробленому для систем дистанційного контролю запиленості повітря [104]. Звичайно, домогтися повної компенсації густини пилу таким шляхом не можна, та й не всякий пил має розглянуту особливість.

Таблиця 2.2 – Залежність оптичного переломлення і щільності від марки вугілля

Марка вугілля	Коефіцієнт оптичного переломлення	Густина речовини, кг/м ³
Газовий	1,825	1268
Жирний	1,880	1330
Коксівний	1,940	1422
Худий спікливий	1,990	1384
Худий	2,015	1420
Антрацит	2,040	1577

Ефекту компенсації мінливості густини при визначенні вмісту пилу оптичним методом можна також досягти, використовуючи динамічні властивості частинок пилу, що рухаються в потоці повітря [101, 105].

2.1.2 Характеристики дисперсного складу пилу

Багато властивостей пилу, у тому числі його патологічний вплив, визначаються дисперсним складом пилу, тому його необхідно враховувати як при контролі запиленості, так і при створенні технічних засобів цього контролю. Відповідно до класифікації, наведеної в [19], пил – це полідисперсна система аерозольних частинок розміром від 1 до 100 мкм, здатних знаходитися

в повітрі досить тривалий час. Швидкість витання таких частинок у турбулентному потоці (швидкість осідання під дією сили ваги) знаходиться, приблизно, у межах від 0,001 до 0,2 м/с [40]. Установлено, що розподіл частинок у потоці підкоряється тим же законам, що і розподіл швидкостей пульсації повітря, за умови, що пиловий аерозоль не впливає на формування і розвиток пульсуючого потоку [106-111]. Останнє можливо при значних концентраціях частинок, що має місце в технологічних процесах, зв'язаних зі здрібнюванням частинок, і аналізується в теорії двохфазних потоків [112-114].

На основі теорії дифузії аерозолу встановлена нерівномірність розподілу концентрації його окремих фракцій, як по висоті, так і по довжині запиленого потоку за рахунок пульсацій швидкості потоку і поступового випадання великих фракцій. Причому на досить великому віддаленні від джерела пилоутворення дисперсний склад пилу в більшості випадків стабілізується, що характерно для гірничих виробок [109, 110].

Дисперсний склад пилу може бути охарактеризований масовим чи рахунковим вмістом частинок різного розміру, що представляється у вигляді кривих інтегрального і диференціального розподілів, які залежать від багатьох факторів, і дають наочне представлення про дисперсний склад пилу чи порошкоподібного матеріалу. Зерновий розподіл здрібненого матеріалу залежить тільки від умов його утворення, однак, експериментально отримані розподіли можуть також залежати від методу дисперсного аналізу.

Таким чином, отримувані розподіли залежать не тільки від закономірності утворення порошку, але і від похибок, внесених методом аналізу [40]. Взагалі ж, дисперсний склад пилу визначається промисловою технологією, видом машин і комплексів, фізичними властивостями речовини, з якої утворюється пил, властивостями потоку, і, нарешті, від методу дисперсного аналізу.

При розробці засобів пилового контролю користуються табличним чи графічним представленням дисперсного складу. Зручним є також його аналітичний опис у вигляді різних формул, що підрозділяються на емпіричні і теоретичні [40, 115, 116]. На практиці широко використовується формула Розіна-Рамлера [40]:

$$R(d) = 100 \exp(-bd^a), \quad (2.1)$$

де b і a параметри логарифмічної форми цього рівняння.

Формула (2.1) звичайно представляють у нормованому вигляді

$$R(d) = 100 \exp\left[-\left(\frac{d}{d_e}\right)^a\right], \quad (2.2)$$

де d_e – діаметр, при якому маса частинок крупніше d_e , складає 36,8%, а дрібніше d_e – 63,2%, при цьому a характеризує ширину розподілу частинок по розмірах (при $a=\infty$ усі частки мають один розмір d_e)

Для практичного застосування рівняння (2.2) двічі логарифмується, при цьому лінія дисперсного розподілу буде мати вид прямої в координатах $\lg\left(\lg\frac{100}{R}\right), \lg d$, тобто в подвійній логарифмічній сітці, що прийнята, зокрема, у СНіП 1-Г. 5-62 при побудові класифікаційної номограми для характеристик групи пилу за ступенем дисперсності.

Звичайно, не всі розподіли дисперсності будуть представлятися у виді строго прямих ліній, що залежить від умов утворення частинок пилу і їх поширення в атмосфері. Так, спостерігаються скривлення, особливо, якщо проба пилу для аналізу відбиралася з запиленого потоку повітря, що рухається, у якому частки пилу могли піддаватися динамічній сепарації в потоці чи в аспіраторі за рахунок процесів осідання грубих фракцій, коагуляції частинок, здійснення вже осілого пилу і т.д. Проте, залежність (2.2) представляється нам найбільш універсальною, а на практиці її нескладно ідентифікувати за експериментальними даними.

Необхідно пам'ятати, що в охороні праці дисперсний склад пилу відіграє другорядну роль (більш важлива маса пилу в повітрі), оскільки немає моделей, що визначають вплив на людину частинок пилу кожного розміру. Тому при контролі запиленості варто орієнтуватися на розподіли дисперсного складу пилу, що найбільш часто зустрічаються, або обмежитися додатковою оцінкою вмісту тонкого чи грубого пилу, як рекомендують гігієністи. Такий підхід дозволяє реалізувати поетапний розвиток методів і засобів контролю дисперсного складу пилу.

Спочатку пропонується експериментально дослідити й установити найбільш характерні розподіли дисперсного складу основних видів пилу гірничих підприємств й оцінювати дисперсність пилу за отриманою залежністю, вважаючи її постійною для обраних умов. У цьому випадку досить проконтролювати загальну масу пилу в повітрі, а потім розрахувати вміст будь-яких фракцій за апріорними розподілами, наприклад, за розподілом, наведеним у [79] для вугільного пилу при різних технологічних процесах і умовах. В охороні праці такий підхід цілком прийнятний, оскільки дозволяє робити оцінку маси окремих фракцій без трудомісткого лабораторного аналізу дисперсного складу пилу.

Проаналізуємо таку можливість на прикладі даних про розподіл дисперсного складу пилу, що найбільш часто зустрічається у вугільних шахтах [117], для якого виконаємо ідентифікацію параметрів інтегрального рівняння (2.2). Для цього підставимо в (2.2) дані згаданого розподілу. Одержимо систему рівнянь регресії, попарне рішення яких дозволяє одержати усереднені значення параметрів, а саме: $d_e \approx 17$ мкм, $a \approx 1,69$. При цьому рівняння інтегрального розподілу дисперсного складу вугільного пилу прийме вид кривої залишків, що характеризує в % масовий вміст частинок, розмір яких більше поточного значення d , а саме:

$$R(d) = 100 \exp \left[- \left(\frac{d}{d_e} \right)^a \right] = 100 \exp \left[- (0,059 \cdot d)^{1,69} \right] \quad (2.3)$$

або кривої проходів, що характеризує вміст частинок менше, ніж d :

$$D(d) = 100 \left(1 - \exp(-0,059 \cdot d)^{1,69} \right). \quad (2.4)$$

По моделях (2.3) чи (2.4), нескладно розрахувати диференціальний розподіл для будь-якого обраного інтервалу розмірів частинок пилу. Нижче для ілюстрації і зіставлення у табл. 2.3 приведений вихідний диференціальний розподіл, а за ним – отриманий з використанням моделі (2.2) – (2.4).

Таблиця 2.3 – Диференціальний розподіл маси частинок пилу, що найбільш часто зустрічається у вугільних шахтах

Маса частинок	Розміри частинок, мкм				
	0-5	5-10	10-20	20-30	3-40
- у вихідному розподілі [117], %	12	23	37	22	6
- розрахована по моделі (2.2), %	11,9	21,7	39,8	19,4	5,8

Як бачимо, розподіл, отриманий на моделі, незначно відрізняється від вихідного, що дозволяє використовувати отриману модель на практиці.

Звичайно, запропонований підхід обумовить невисоку достовірність оцінки фактичного дисперсного складу пилу, проте її можна зіставити за похибкою з оцінками інших гігієнічних умов, наприклад кількості повітря, вдихуваного робітником за зміну, що змінюється у рази, але ж використовуються в охороні праці. Отже запропонований підхід в оцінці дисперсності пилу можна вважати розвитком пилового контролю на стадії, коли на гірничих підприємствах регулярно ведеться контроль загальної маси пилу, що витає. Другим етапом буде контроль вмісту тонкої (респірабельної) фракції пилу.

2.2 Урахування динаміки пилу при контролі його вмісту в газоповітряних потоках

При рішенні задач пилового контролю приходиться розглядати питання, зв'язані з динамікою пилових частинок. При цьому можна виділити основні випадки, коли необхідно знати чи враховувати динамічні параметри аерозолів.

По-перше, – це поводження (рух) частинок у каналах вимірників запиленості. По-друге, – обтікання запиленим потоком пиловідбірних пристроїв чи датчиків концентрації пилу. По третє, – вибір точок контролю запиленості або розміщення датчиків у запилених потоках, що рухаються. Крім того, при контролі запиленості в різних за масштабом потоках виникає задача визначення оптимального інтервалу усереднення одержуваних поточних (миттєвих) значень концентрації, що буде залежати від флуктуації концентрації частинок у потоці і теж визначає достовірність контролю.

Об'єктом пилодинаміки, як відомо, є система «частинка-потік», у якій проявляють себе параметри частинок (маса, густина речовини, геометричні розміри, форма) і параметри потоку (швидкість газу, його густина і в'язкість).

Потік захоплює частинки, що в нього потрапили, і розганяє їх практично до власної швидкості за час, обумовлений часом механічної (аеродинамічної) релаксації частки [41]. Усяка зміна напрямку потоку приводить до гальмування частинок, шлях якого характеризується величиною інерційного пробігу частки. Числові значення часу релаксації й інерційного пробігу – цих двох найбільш важливих динамічних параметрів аерозолів можна знайти шляхом рішення рівнянь руху частинок.

Перераховані вище випадки в різній мері розглянуті чи розроблені в ряді монографій по механіці аерозолів і інших джерелах [37, 41, 42, 107, 108], тому проаналізуємо їх стосовно до методів і засобів пилового контролю.

2.2.1 Розміщення засобів контролю в запилених потоках

Для одержання характеристик запиленого потоку необхідно вибрати контрольні точки, в яких можна було б одержати максимум необхідної інформації про весь потік. Очевидно, що положення контрольних точок буде залежати від динаміки цих потоків, тобто від того, як частинок пилу розподіляться в просторі. При цьому досить знайти такі контрольні точки в перетині потоку, у яких би забезпечувалося одержання середніх значень швидкості потоку, концентрації частинок чи виносу пилу за результатами точкових вимірів. Прийнятний і такий варіант, коли вимірник розміщають у будь-якій зручній точці, але при цьому враховують закономірності розподілу контрольованої величини в перетині потоку, тобто – поле швидкостей, концентрацій чи виносу пилу.

Як відзначалося вище, розподіл частинок у потоці підкоряється тим же законам, що і розподіл швидкостей пульсації повітря (газу), за умови, що пиловий аерозоль не впливає на формування і розвиток пульсуючого потоку. При контролі факторів, зв'язаних з пилом, що проводиться в рамках охорони праці, ця умова виконується, через відносно невеликі концентрації пилу в повітрі робочої зони, в порівнянні з концентраціями в технологічних двохфазних потоках, де об'ємна маса частинок порівнянна з масою усього потоку. Тому достатньо враховувати епюри швидкості потоку, а також нерівномірність розподілу концентрації пилових частинок, що в основному

обумовлена гравітаційним осіданням пилу і частково турбулентною дифузією аерозолів.

Проаналізуємо вплив розподілу швидкості газу і концентрації пилу по вертикальній осі потоку на винос пилу з урахуванням осідання в горизонтальному вентиляційному каналі, зокрема у гірничий виробці, користаючись рис. 2.2, на фрагментах якого відбитий якісний характер зміни зазначених параметрів запиленого потоку для нормованої висоти каналу [113, 114, 118].

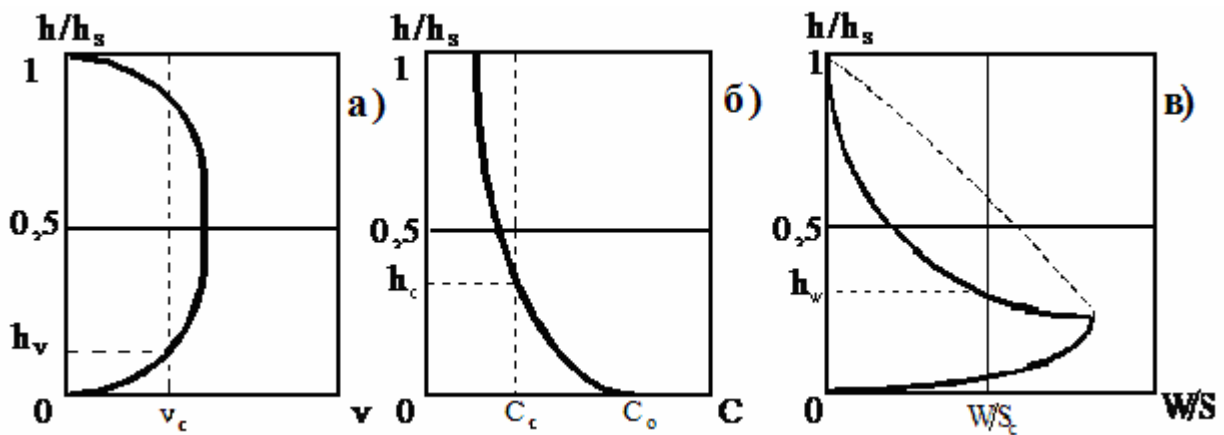


Рисунок 2.2 – Зміна параметрів запиленого потоку по вертикальній осі горизонтального вентиляційного каналу: *а* – швидкості потоку газу; *б* – концентрації пилу; *в* – виносу пилу через одиницю перетину каналу (Відносні висоти точок середніх значень швидкості потоку, концентрації пилу і її виносу, позначені відповідно як h_v, h_c, h_w)

Як бачимо, у загальному випадку точки середніх значень швидкості потоку, концентрації пилу і її виносу розташовуються на різній висоті по вертикальній осі каналу. Тому положення вимірника повинне відповідати контрольованому параметру. При одночасному контролі зазначених параметрів можна вибрати контрольну крапку по одному з критеріїв (середньої швидкості, чи концентрації середньому виносу), але при цьому два параметри, що залишилися, повинні коректуватися з урахуванням полів їхнього розподілу по перетині потоку.

Розгляд цих полів почнемо з аналізу епюр швидкості потоку, з огляду на той факт, що при вертикальному розташуванні вентиляційного каналу (гірничої виробки чи газоходу) концентрація і винос пилу будуть практично відповідати розподілу швидкостей потоку в його перетині.

У загальному випадку середнє значення швидкості в перетині каналу визначають з урахуванням поля швидкостей, визначеного по декількох точках в каналі, причому координати цих точок регламентуються стандартом на методи аеродинамічних випробувань [118]. При оцінці запиленості чи викидів пилу, особливо стаціонарними засобами й у високотемпературних потоках,

багатоточкові виміри або утруднені, або неможливі. Тому число точок контролю бажано скоротити до однієї.

Отже, швидкість потоку у гирничих виробках та інших повітряних каналах чи трубах не однакова в різних точках його перетину і, в загальному випадку, змінюється від нуля на рівні стінки до максимального значення в середній частині труби (рис 2.2 а). Епюра швидкостей потоку визначається режимом руху повітря, що залежить від ступеня шорсткості стінки вентиляційного каналу і його числа Рейнольдса.

Типові епюри швидкості повітря для круглих симетричних по осі труб діаметром $D = 2R$, м (R – радіус). приведені на рис. 2.3 [118].

Як видно, у широкому діапазоні чисел Re – від $4 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$, як для гладких, так і шорсткуватих труб $v/v_c = 1 \pm 0,005$, тобто місцева швидкість дорівнює середній на відстані $0,762R$ від центра труби чи на відстані $0,238R$ від її внутрішньої стінки. При ламінарному ж потоці $v/v_c = 1$ – зміщується до осі труби.

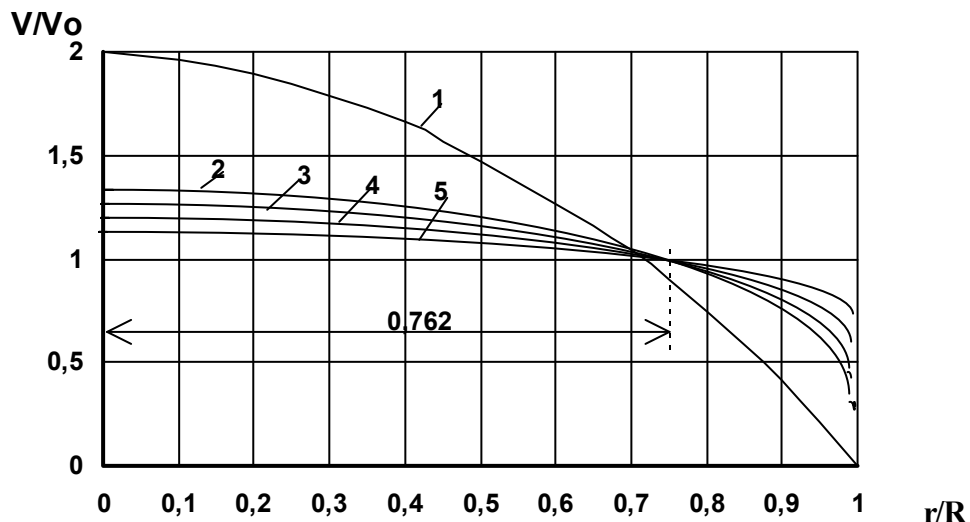


Рисунок 2.3 – Розподіл відносної швидкості потоку v/v_0 по радіусу труби: 1 – для ламінарного потоку; 2 – для турбулентного потоку в дуже шорсткуватій трубі; 3; 4; 5 – для турбулентних потоків у гладких трубах з послідовним збільшенням числа Re . (Тут v_0 – середня швидкість, а r – точка розміщення вимірника швидкості)

Для каналів (труб) діаметром від 0,5 до 3,0 м і швидкостях від 4 до 40 м/с діапазон змін числа Re для нормальних умов складе $(0,134-8) \cdot 10^6$, тому в цьому випадку точка середньої швидкості буде знаходитися на відстані $0,238R$ ($\approx 0,12D$) від стінки. Як показали наші розрахунки, установка датчика в зазначеній точці забезпечує вимір середньої швидкості потоку в трубі, причому відхилення від середньої швидкості в ній практично не відбувається в широкому діапазоні швидкостей, а установка вимірника по осі труби в турбулентному потоці дасть завищення показань щодо середньої швидкості не

більш, ніж на 12 %. (Приведені міркування справедливі, якщо перед обраним для контролю перетином мається пряма ділянка труби чи каналу довжиною не менше $30D$. У противному випадку потрібно враховувати у ньому поле швидкостей).

Розглянемо тепер закономірність зміни концентрації пилу по висоті горизонтального вентиляційного каналу в його поперечному перерізі. Залежність, представлена на рис. 2.2 б, зокрема, для вентиляційного каналу, – відома і має вид експоненти [109]

$$C = C_0 \exp(-a \cdot h), \quad (2.5)$$

де a – коефіцієнт зниження концентрації в міру росту висоти, починаючи від ґрунту, де концентрація пилу максимальна і дорівнює C_0 (Цей коефіцієнт визначається як відношення швидкості гравітаційного осідання частинок до коефіцієнта їхньої турбулентної дифузії).

Оцінимо середнє значення концентрації пилу по висоті вентиляційного каналу від h_1 до h_2 , яке можна обчислити як інтеграл функції $C = f(h)$, у даному випадку (2.5), віднесений до різниці висот:

$$\bar{C} = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} C \cdot dh. \quad (2.6)$$

Інтегруючи (2.6) від $h_1 = 0$ до $h_2 = H$, м - висоти вентиляційного каналу по осі його перетину, для функції $C = f(h)$ у вигляді (2.5), одержимо

$$\bar{C} = \frac{C_0}{H \cdot a} [1 - \exp(-aH)]. \quad (2.7)$$

Залишилося визначити характерну область розміщення цього середнього значення по висоті вентиляційного каналу.

Як відомо, концентрацію пилу в довільній точці, зокрема на висоті h по осі перетину, можна виразити через середню концентрацію з урахуванням коефіцієнта поля концентрації пилу в перетині каналу

$$k_c = \frac{C}{\bar{C}}, \quad (2.8)$$

залежність якого від h знаходить шляхом ділення виразу (2.5) на (2.7) [119]. Якщо ж дорівняти ці вирази, одержимо співвідношення для визначення висоти h , що відповідає середній концентрації пилу при $k_c = 1$, а саме:

$$\exp(-a \cdot h_c) = \frac{1}{H \cdot a} [1 - \exp(-aH)], \quad (2.9)$$

відкіля не складно знайти середнє значення коефіцієнта осідання пилу a по висоті h_c при заданому значенні висоти каналу чи гірничої виробки H .

Для визначення області розташування h_c по висоті вентиляційного каналу різних розмірів одержувану з (2.9) функцію $h_c = f(H, a)$ двох параметрів H і a зручно представити сімейством залежностей $h_c = f(H)$ для характерних значень параметра a , величина якого росте зі збільшенням середнього діаметра частинок [120]. Розрахунки для деяких значень H і a представлені в табл. 2.6.

Аналіз таблиці показує, що відносна висота h_c / H точки середньої концентрації для граничних значень параметрів H і a змінюється в межах від 0,5 для малих каналів і дрібного пилу до 0,23 для великих каналів і грубого пилу, тобто переміщається від середини до підстави на приблизно 1/4 висоти каналу.

Таким чином, характерною областю розміщення контрольної точки для оцінки середньої концентрації пилу є друга знизу чверть висоти каналу. Причому на різному віддаленні від джерела пилу медіанний діаметр частинок міняється і звичайно складає 10...20 мкм, що, наприклад, для вугільного пилу відповідає $a \approx 0,16 - 4,2, \text{ м}^{-1}$ [120].

Таблиця 2.4 – Залежність положення точки середньої концентрації $h_c = f(H)$ у вентиляційних каналах різної висоти при типових значеннях $a, \text{ м}^{-1}$

Висота H каналу ² , м	Висота точки середньої концентрації h_c , м для п'яти різних значень $a, \text{ м}^{-1}$				
	2	1	0,5	0,25	0,125
0,5	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25
1	0,42	0,45	0,48	0,5	0,5
1,5	0,57	0,66	0,7	0,72	0,74
2	0,7	0,83	0,92	0,96	0,98
2,5	0,81	1	1,12	1,19	1,22
3	0,9	1,14	1,31	1,41	1,45
3,5	0,97	1,28	1,5	1,62	1,69
4	1,04	1,4	1,67	1,83	1,91
4,5	1	1,51	1,18	2	2,14
5	1,15	1,61	2	2,24	2,37

Примітки. 1. Коефіцієнт a на практиці можна визначити теоретично чи експериментально шляхом ідентифікації експоненти (2.32) за результатами виміру концентрації пилу в повітрі C_1 і C_2 одночасно в двох точках на різній

висоті вентиляційного каналу, за формулою $a = \frac{\ln \frac{C_1}{C_2}}{h_2 - h_1}$.

2. У випадку вентиляційного каналу круглого перетину його висота дорівнює діаметру, тобто $H = D$.

При практичній перевірці цієї величини у вентиляційному штреку висотою 2,2 м на відстані 25 м від сполучення з вугільною лавою (при швидкості - 1,2 м/с) отримане середнє значення $a \approx 0,3$, м^{-1} . Воно відповідає середньому розміру частинок пилу близько 11 мкм. У цьому випадку область h_c / H складе 0,45-0,5, тобто середня концентрація буде реєструватися на висоті близько 1 м. В аналогічних умовах при швидкості 3,6 м/с отримане $a \approx 0,55 \text{ м}^{-1}$, для якого середній розмір частинок склав близько 14 мкм, а область середніх значень концентрації пилу знаходилася на висоті в межах 0,4-1,2 м від ґрунту виробки.

Характерно, що зсув контрольних точок від вертикальної осі аж до границь периметра (до стінки і покрівлі) привело до зниження концентрацій пилу приблизно на 40 %. При меншій швидкості потоку зниження середньої концентрації в аналогічних випадках склали приблизно 25%. Це вказує на істотну роль швидкості потоку на формування поля концентрації. Тому при довільному розміщенні контрольної точки по висоті вентиляційного каналу варто розрахувати для неї коефіцієнт поля концентрації k_c . Характер зміни k_c від інтенсивності осідання пилу для різних розмірів вентиляційного каналу при розміщенні контрольної точки на висоті $h_c / H = 0,45$ наведений на рис. 2.4.

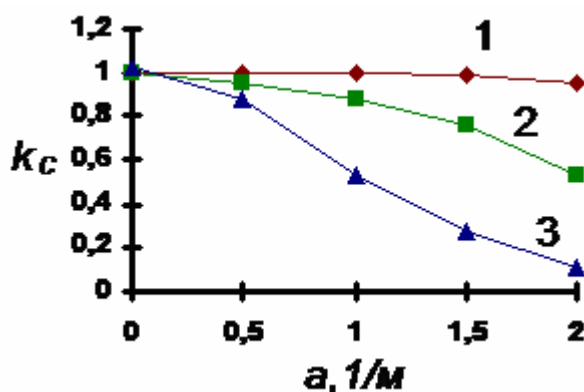


Рисунок 2.9 – Характер зміни коефіцієнта поля концентрації $k_c = f(a)$ від інтенсивності осідання пилу при різних розмірах вентиляційного каналу на висоті $h_c / H = 0,45$ (1, 2, 3 – для діаметрів труб, відповідно, 0,5; 2,5 і 5,м.)

Експериментальна перевірка параметра осідання частинок a на шахтах Центрального і Західного Донбасу показала, що її значення для типових виробок висотою 2,2-3,6 м при швидкості потоку 1,1-1,5 м/с на практиці не перевищують величини $a = 0,5-0,6 \text{ м}^{-1}$. Це вказує на відносно положистий характер залежності (2.5). При цьому значення концентрації пилу, що спостерігаються, в різних точках перетину не ближче 0,12 частки діаметра (калібру) виробки не відрізнялися друг від друга більш, ніж на 20-25 %. Причому точка середньої концентрації практично завжди визначалася трохи нижче середини висоти виробки.

Що стосується виносу пилу, то аналітичний розрахунок положення точки середнього виносу тріхи утруднений, оскільки вимагає побудови математичної моделі епюри швидкості з наступним множенням отриманої функції на

функцію зміни концентрації в перетині (2.5) і обчисленням інтеграла отриманого добутку, віднесеного до висоти вентиляційного каналу, подібно (2.7). Тому простіше одержати залежність зміни виносу пилу по висоті каналу експериментально, шляхом синхронного виміру швидкості і концентрації пилу в різних точках по висоті, а потім знайти на ній точку середнього значення виносу пилу через одиницю перетину каналу по його вертикальній осі. У загальному ж випадку середнє значення виносу пилу теж буде зареєстровано в нижній половині горизонтального вентиляційного каналу в області, що знаходиться вище характерного максимуму виносу, показаного на рис. 2.2 в. При цьому одержувані в цій області середні значення виносу пилу менш критичні до розмірів його частинок і розміру каналу, чим середня концентрація, оскільки убутна функція швидкості помножується на зростаючу функцію концентрації (рис. 2.2 а, б). Тому ця точка може бути сполучена з точкою контролю середньої концентрації пилу, обраної трохи нижче середини каналу без урахування поля концентрації пилу (рис. 2.5.).

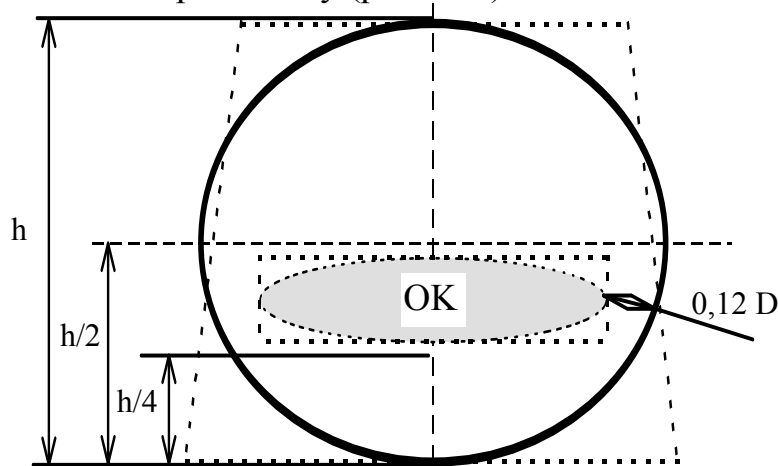


Рисунок 2.5 – Характерна область контролю (ОК), тобто розміщення засобів контролю показників запиленого потоку в горизонтальних вентиляційних каналах

Таким чином, відносно питання розміщення контрольних точок для визначення чинників охорони праці, пов'язаних з пилом, у потоці, слід зазначити, що виконаний аналіз і запропоновані рекомендації повною мірою відносяться до вентиляційних каналів, що служать тільки для провітрювання чи вентиляції. Там же, де одночасно розміщується техніка, рухається транспорт, працюють люди, зокрема у гірничих виробках вугільних і рудних шахт, при виборі точок контролю, крім полів розподілу контрольованого параметра, необхідно враховувати додатково технологічні, технічні та ергономічні фактори [106, 121, 122].

2.2.2. Визначення оптимального інтервалу часу усереднення контрольованих значень концентрації

Задача усереднення одержуваних поточних (миттєвих) значень вмісту пилу в повітрі і зв'язаних з ними інших показників безпеки праці обумовлена

необхідністю одержання достовірної інформації про запиленість повітря і час її періодичної реєстрації. Оптимального рішення задачі домогтися досить складно, тому що воно має кілька аспектів. Серед них: гігієнічний, ергономічний і імовірнісний, що зв'язані з охороною праці людей, що працюють у запилених потоках, з персоналом, що забезпечує проведення оперативного чи періодичного контролю запиленості, а також з коливаннями швидкості потоку і концентрації частинок у ньому, що носять випадковий (імовірнісний) характер, та залежить як від параметрів турбулентного потоку, так і властивостей пилових частинок.

Перші два з перерахованих аспектів важко формалізуються, тому практичне рішення цієї задачі зводиться до приблизного визначення оптимального часу інтегрування індикації даних, що відображаються засобами контролю запиленості, при якому виходили б досить достовірні середні значення характеристик запиленого потоку без втрати інформації при дискретному її зчитуванні.

Цілком очевидно, що одна мікрочастинка пилу не може достовірно характеризувати величину концентрації в макрооб'ємі контрольованого вентиляційного каналу, тому необхідно усереднення інформації від досить великої кількості частинок пилу, тобто необхідно вибрати макроінтервал, що відповідав би контрольованому макрооб'єму. З цією метою коротко проаналізуємо три зазначених вище аспекти, що визначають необхідний інтервал усереднення.

З гігієнічної точки зору мінімальний на макрорівні інтервал усереднення показань можна було б прийняти рівним середнього часу вдиху людини, що працює в запиленому середовищі. Час цей залежить від індивіда і навантаження працюючого, тому може коливатися і складе час порядку 1-4 с [78].

Ергономічний аспект передбачає зв'язок усереднення часу індикації контрольованого параметра, при якому оператор устигав би осмислено зчитувати виведену на табло контролюючого засобу інформацію. Так, людина в одну секунду сприймає інформацію, що не перевищує чотирьох десяткових знаків, тобто 15 біт/с. Причому, коли приходиться оперативно переробляти інформацію для прийняття рішення, обсяг сприйняття знижується до 0,8 біт/с [123,124]. В останньому випадку, для зчитування з табло вимірника четирирозрядного десяткового значення величини концентрації пилу буде потрібно вже близько 20 с. Таким чином, згідно ергономічному критерію (точніше – інформаційному), інтервал часу індикації поточного значення на табло приладу складе 1- 20 с. Причому, як показала практика, під час ручного регулювання і настроювання приладу, для прискорення процесу, час індикації бажано мати можливо менший (порядку 3- 5 с), а при вимірі параметра запиленості – більший (до 15- 20 с), що підвищує достовірність середніх значень і скорочує загальний обсяг виведеної чи оброблюваної інформації, тобто бажано в одному пристрої мати два режими індикації. Оптимальний же час при одному режимі індикації знаходиться в межах 4- 8 с.

Імовірнісний аспект, обумовлений переважно можливою втратою інформації при дискретних у часі вимірах запиленості повітря портативними

приладами чи при дискретному опитуванні стаціонарних відповідних датчиків. У такому аспекті задача вже вирішувалася на практиці при виборі часу опитування датчиків швидкості турбулентного потоку повітря в гірничих виробках, що виключає втрату інформації в результаті дискретизації опитування [125]. Було встановлено, що флуктуації швидкості, що спостерігаються, мали нормальний закон розподілу імовірності і цілком визначений частотний спектр. При цьому крок дискретизації прирівнюється часу кореляції флуктуацій, що спостерігаються, [126, 127]. Час кореляції (час спаду кореляційної функції) можна розрахувати за формулою

$$\tau_0 = \frac{1}{R_x(0)} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) d\tau, \quad (2.10)$$

де $R_x(0)$ – значення кореляційної функції при нульовому значенні аргументу τ ; $R_x(\tau)$ – кореляційна функція.

Для випадкового процесу зміни швидкості повітря в гірничих виробках ця величина склала близько 15 с і була обрана як оптимальний інтервал дискретизації для одержання достовірного поточного значення швидкості потоку [125].

Очевидно, що процес флуктуації концентрації частинок у потоці буде теж значною мірою визначатися турбулентними пульсаціями потоку повітря, оскільки пил захоплюється потоком повітря, однак при цьому закон розподілу вмісту домішки (пилу) у повітрі буде логарифмічно нормальним, при якому величина флуктуації буде пропорційна самій концентрації. Крім того, амплітуда флуктуації, що спостерігається, залежатиме також і від інтервалу усереднення миттєвих значень концентрації пилу. Причому, чим менше цей інтервал, тим інтенсивніше флуктуації, доти, поки флуктуація не буде викликана лише однією окремою частинкою, як у лічильнику частинок пилу, для якого мінімальний інтервал буде відповідати часу прольоту через вимірник однієї частки, що, як правило, складає мілісекунди.

Виконана нами перевірка часу кореляції для процесу флуктуації змісту пилу, згідно (2.10), показала значну його мінливість для різних потоків і умов у них. Так, для вентиляційних каналів, розміром від 0,5 до 3 м, розімкнутого і замкнутого типів, інтервал змін часу кореляції склав від 5 до 30 с (при усередненні кожного дискретного значення на протязі 1с). Тому інтервал дискретизації для достовірної оцінки поточного значення концентрації пилу не повинний перевищувати 5 с, що погоджується з рекомендованим вище оптимальним часом індикації.

2.3. Висновки

1. Аналіз критичних для пилового контролю характеристик промислового пилу показав, що зокрема густина його речовини коливається у межах від 1000 до майже 9000 кг/м³. Для залізородного пилу цей діапазон складає від 2770 до 4850 кг/м³. Для вугільного пилу, включаючи антрацити та напівантрацити – від

1253 до 1766 кг/м³. З урахуванням наявності у гірничій масі, що видобувається на вугільних шахтах, піщаного та глинистого сланців очікуваний діапазон мінливості густини речовини шахтного пилу складе приблизно 1200-2700 кг/м³.

2. Контроль запиленості приладами може забезпечити необхідну нормативну погрішність, граничне значення якої складає 25%, при урахуванні речовини контрольованого пилу і забезпеченні достатньої компенсації мінливості густини речовини. При цьому найбільш перспективними можна вважати метод компенсації густини речовини шляхом попереднього завдання її по апіорним даним в спеціально передбаченому режимі роботи пилoměра.

3. Дисперсний склад пилу відрізняється розмаїтістю реальних розподілів. Аналітично їх можна ідентифікувати у вигляді певної аналітичної залежності, зокрема за відомою формулою Розіна-Рамлера, визначивши експериментально характерний середній розмір частинок і ширину розподілу по розмірах. Причому для приблизної оцінки дисперсного складу пилу доцільно орієнтуватися на найбільш характерні розподіли дисперсного складу пилу при різних технологічних процесах або забезпечити оцінку вмісту окремо тонкої або грубої фракцій пилу, що практикується у пиловому контролі умов праці.

4. Аналіз динамічних характеристик запилених вентиляційних потоків дозволив визначити область розташування приладів у гірничих виробках для контролю чинників, що пов'язані з пилом. Так, середню швидкість потоку рекомендується контролювати в точці, розташованій від стінки каналу на відстані не ближче 0,12 часткою його діаметра. Переміщення контрольної точки до осі потоку дасть завищення середнього значення швидкості потоку не більш, ніж на 12%. Областю розміщення контрольної точки для оцінки середньої концентрації пилу є друга знизу чверть висоти каналу (трохи нижче середини). При цьому виправлення на поле концентрації повинне проводитися при середньому розмірі частинок пилу більше 10 мкм і для гірничих виробок розміром більше 1,5...2 м. Областю розміщення контрольної точки для оцінки середнього виносу пилу також є друга знизу чверть висоти каналу, тому може бути сполучена з точкою контролю середньої концентрації частинок у запиленому потоці без урахування поля концентрації пилу в гірничій виробці.

5. На основі аналізу динаміки концентрації пилу в вентиляційних потоках гірничих виробок показано, що інформацію від лічильника частинок пилу, призначеного для контролю в гірничих виробках чи вентиляційних каналах доцільно виводити на табло для зчитування чи реєстрації через кожні 4...8 с, виконуючи процес усереднення (інтегрування) за попередні 4...8 с, що забезпечує відстеження процесу зміни концентрації в потоці з достатньою в охороні праці достовірністю.

3. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МАСОВОГО ВМІСТУ ПИЛУ В АТМОСФЕРІ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ВІДОМИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ ОПТИКИ АЕРОЗОЛІВ

3.1. Використання потоків розсіювання й ослаблення світла частинками пилу для визначення їх масової концентрації в повітрі

Як відзначено в першому розділі, оптичні лічильники окремих частинок дозволяють одержати максимум інформації про параметри зваженого в повітрі пилу. Тому їх можна використовувати не тільки для визначення рахункової концентрації різних аерозолів чи розмірів частинок, але і для визначення їх масового вмісту в повітрі. При цьому, необхідно спочатку визначити об'єм частинки, а потім уже масу, з урахуванням густини речовини пилу, яку визначають запропонованими вище методами. З огляду на цю обставину, наступний аналіз потоків розсіювання й ослаблення світла окремими частинками був спрямований на визначення їх геометричних параметрів і на виявлення можливості застосування класичної теорії розсіювання світла до промислового (рудникового та шахтного) пилу.

Коротко зупинимося на основних відомих положеннях і залежностях згаданої теорії, з урахуванням яких передбачається рішення поставленої задачі визначення масового вмісту пилу з використанням оптичного методу, який вже частково розглядався у першому розділі. Так, відомо, що ослаблення електромагнітного випромінювання (світла) полідисперсним середовищем обумовлене переважно розсіюванням світла і, у загальному випадку, залежить від параметра дифракції чи оптичного розміру частинки [48-50]

$$\rho = \pi \cdot d / \lambda , \quad (3.1)$$

де d – діаметр частинки, мкм; λ – довжина хвилі випромінювання, що падає на частку, мкм.

Крім того, важливу роль відіграє комплексний показник переломлення світла речовиною частинки

$$m_o = n_o + i\varepsilon , \quad (3.2)$$

де n_o – оптичний коефіцієнт переломлення, а ε – коефіцієнт, що враховує поглинання світла речовиною, що у певній мері зв'язаний з масою частинки, але зв'язок цей не є явним чи однозначним, за винятком випадку, розглянутого у другому розділі для вугільного пилу, коли цей коефіцієнт корелювався з густиною речовини пилу.

Будемо вважати, що ослаблення світла полідисперсним пилом в повітряному середовищі в основному обумовлене розсіюванням на частинках, хоча частина променистої енергії може і поглинатися, що характерно для частинок з електропровідної речовини. Так, наприклад, для частинок заліза при

$\lambda=0,668$ мкм $m=1,7-1,84i$ [48], отже видно, що ε порівняна з n . Для частинок з вуглецю $m=1,59-0,66i$ при $\lambda=0,491$ мкм, що вказує на те, що ε – істотно менше за n , а для діелектриків ще менше.

Величина розсіювання світла частинками залежить також від кута спостереження θ відносно спрямованого на них світлового пучка, а розподіл інтенсивності розсіяного світла на великих (по відношенню до довжини хвилі світла) сферичних частинках в одиниці тілесного кута може бути розрахований по загальному рівнянню Мі [48] за умови $\rho = \pi \cdot d / \lambda \rightarrow \infty$ з використанням класичної формули [19, 49, 50, 128, 129]

$$i(z) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \rho^4 \left[\frac{J_1(z)}{z} \right]^2, \quad (3.3)$$

де $z = \rho \cdot \sin \theta = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \sin \theta$ чи $z = \rho \cdot \theta = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \theta$ – для малих кутів; J_1 – функція Беселя першого порядку.

Залежність справедлива при обмеженнях [19, 128]

$$\rho \geq 10; 2\rho(m_0 - 1) \gg 1, \quad (3.4)$$

які вказують на застосовність формули (3.3) до частинок розміром більше 1-2 мкм, тобто до пилу, при розсіюванні світла у видимій частині світлового спектра та ближній інфрачервоній області електромагнітного випромінювання.

Звичайно, залежність не дає повної картини розсіювання, оскільки не враховує відбиття і переломлення світла частинками. Однак установлено, що за рахунок дифракції на великих частинках розсіюється до 90% світла, що на них падає [129, 130], тому не урахування відбиття і переломлення (електропровідні і прозорі частинки) в гіршому випадку обумовить при розрахунках помилку, яку можна оцінити величиною 10 - 15%.

Повну енергію розсіювання світла на частинці можна визначити інтегруванням загального рівняння Мі [48] або за спрощеною формулою (3.2). Причому з ростом розмірів частинок величина розсіювання стає пропорційною подвоєному перетину частинки, тобто в два рази більше тієї, котра на неї падає, що відбувається за рахунок дифракції (відхилення) світла із спрямованого світлового пучка по периметру частинки [50].

Таким чином, для частинок, що не поглинають світло, ослаблення спрямованого світлового пучка визначається в основному розсіюванням випромінювання на частинках в усі сторони і теж повинне прагнути до величини, пропорційній подвоєному перетину частинки. Це справедливо при віддаленні спостерігача від частинки, що розсіює, на нескінченно велику відстань. На кінцевих же відстанях в ослабленні не бере участь частина потоку, розсіяного частинкою вперед під малими кутами θ , оскільки цей потік сприймається спостерігачем разом зі спрямованим світловим пучком, тобто реєструється фотоприймальними пристроями з великою оптичною апертурою як спрямований.

Теорією розсіювання світла на частинках встановлено, – чим крупніше частинка, тим більша частка розсіяного світлового потоку потрапить в область малих кутів θ , а виходить, і у фотоприймач, що використовують в оптичних приладах для виявлення частинки пилу [18, 130].

Світловий потік, розсіяний частинкою в конусі малих кутів θ , і який може потрапити у фотоприймач з такою же половинною кутовою апертурою θ , оцінюється виразом, справедливим для непрозорих частинок [131, 132]:

$$S(z) = S_d \cdot \varphi(z), \quad (3.5)$$

де S_d – поперечний переріз частинки, мкм²; $\varphi(z)$ – безрозмірний коефіцієнт розсіювання світла на частинці, що у загальному випадку описується за допомогою сферичних функцій Беселя 1-го роду нульового і першого порядку від параметра $z = \rho\theta$ і для частинок у вигляді сфер має вид:

$$\varphi(z) = 1 - J_0^2(z) - J_1^2(z) \quad (3.6)$$

Графік залежності $\varphi(z)$, розрахованої нами на ЕОМ приведений на рис.3.1.

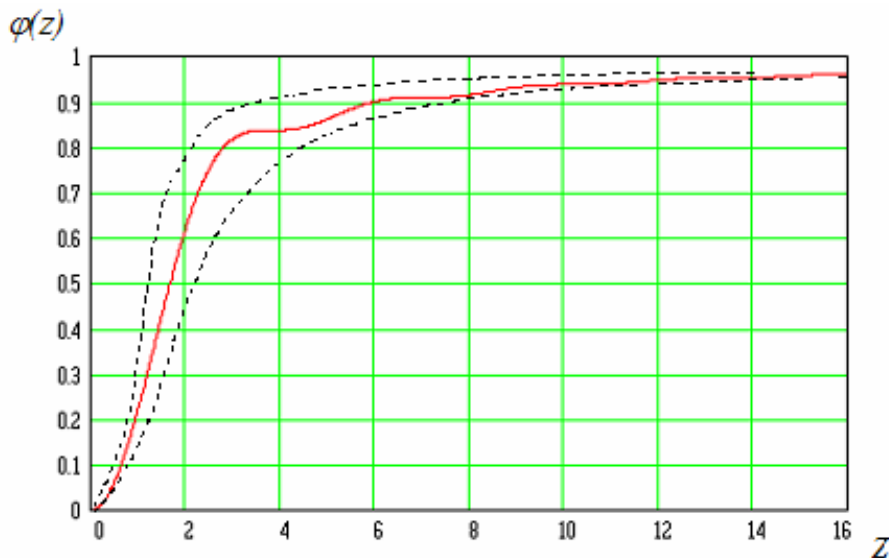


Рисунок 3.1 – Коефіцієнт розсіювання світла – $\varphi(z)$ на сферичній частинці і приблизна область його варіації при зміні форми (позначена пунктиром).

Як видно з рисунка, коефіцієнт $\varphi(z)$ зростає в межах від 0 до 1 зі збільшенням z . При $z > 6$ коефіцієнт $\varphi(z) \approx 0.9$, а при $z > 12$ – стає більше 0,95 і $S(z)$ практично не залежить від $\varphi(z)$ та дорівнює геометричному перетину частинки. Область менших значень z при малих кутах θ відповідає малим розмірам частинок, тобто тонкій фракції пилу.

Наведені вище залежності можуть бути використані для розрахунків потоків ослаблення світла, що викликано розсіюванням світла на сферичних частинках урізні боки і, яке, як відзначалося, значно більше інтенсивності поглинання випромінювання. При цьому їх можна використовувати і для аналізу у випадку частинок неправильної форми, що знаходяться в повітрі в

стані хаотичного руху або обертання, оскільки розсіювання світла на випадковим образом орієнтованих несферичних частинках еквівалентно розсіюванню світла системою сферичних частинок, що мають площі проекцій, які дорівнюють середній площі проекцій несферичних частинок [53, 54, 71].

Доречно відзначити, що для специфічних нитковидних чи сильно витягнутих циліндричних частинок є залежності трохи іншого виду [47]. Для більшості ж частинок промислового пилу навіть при різноманітті форм частинок, що знаходяться в одній конкретній досліджуваній хмарині пилу, можна вважати, що результуюча характеристика, отримана від великої кількості частинок, буде мало відрізнятися від картини розсіювання, яку отримують для строго сферичних частинок. Так, зокрема, у [133] показано, що система полідисперсних несферичних частинок, дає таку ж круглу, як і система сферичних частинок, дифракційну картину (пляма Ері).

На закінчення необхідно відзначити, що в практиці пилового контролю приведені залежності (3.5) – (3.10) необхідні в основному для аналізу загальних закономірностей розсіювання чи ослаблення світла. Їх можна використовувати при побудові і виборі оптичних схем виявлення і реєстрації частинок, а також для пошуку шляхів підвищення достовірності непрямого оптичного методу контролю масового вмісту пилу, що витає в повітрі. Причому абсолютне значення світлових потоків, що одержують при реєстрації частинок, ставиться у відповідність концентрації пилу та, в остаточному підсумку, уточнюється шляхом порівняння (компарації) вимірюваних потоків розсіювання чи ослаблення світла з фактичною концентрацією частинок пилу. Фактична ж концентрація визначається на основі даних, отриманих базовим гравіметричним методом, тобто обов'язково виконується градування оптичних засобів контролю пилу, як, утім, і інших непрямих методів його виявлення.

3.2. Вибір методу контролю для контролю масового місту пилу на основі оптичних лічильників частинок

Як показав аналіз відомих методів і досвід створення приладів, найбільш перспективним для контролю вмісту пилу в атмосфері промислових підприємств є оптичний метод, що має ряд переваг у порівнянні з іншими і досить добре вивчений. При цьому запропонована ідея розробки абсорбційного лічильно-інтегрального методу контролю вмісту пилу в повітрі, що орієнтований на об'єднання достоїнств відомих раніше, але використовуваних роздільно, рахункового й інтегрального методів. Тому подальші дослідження були спрямовані на розробку запропонованого методу, включаючи підвищення точності визначення масового вмісту пилу на основі ефективного виявлення й урахування параметрів окремих частинок пилу, а також наступну розробку на основі цього методу засобів, необхідних для забезпечення усіх видів пилового контролю, що застосовуються в охороні праці, в тому числі і на гірничих підприємствах.

Запропонований лічильно-інтегральний метод базується на використанні відомих оптичних аерозольних лічильників, що принципово можуть контролювати вміст будь-якої фракції пилу. При цьому визначення концентрації пилових частинок можливе двома шляхами, а саме:

- селекцією імпульсів, що реєструються оптико-електронними пристроями по амплітуді, визначенням числа частинок різних розмірів і маси кожної фракції з наступним підсумовуванням;
- інтегруванням імпульсів, що виникають на виході вимірювального перетворювача при проходженні частинки.

При реалізації першого методу, у випадку незалежності амплітуди імпульсів від швидкості руху частинок аерозолі і досить великому числі рівнів дискретизації по амплітуді, можливий безпосередній вимір концентрації чи інтенсивності масової витрати будь-якої фракції аерозолі і його загальної маси в вимірному перетині (мг/м^3 ; $\text{мг/с}\cdot\text{м}^2$) [22, 40]. Для його реалізації необхідні досить складні електронні схеми. Крім того, пред'являються високі вимоги до фотометричного виявлення окремих частинок аерозолі в частині їх просторового виявлення, що не завжди можливо при високих концентраціях тонкодисперсної фази, що мають місце в повітрі виробничої атмосфери. Оптичний лічильник у цьому випадку повинний забезпечити дискретне виявлення частинок, починаючи з розмірів $d \approx (1-2)$ мкм, що реально при мінімізації вимірювального об'єму аж до сотих часток мм^3 і застосуванні лазерних джерел світла. Використання методу реально в стаціонарних лабораторних установках чи приладах, але утруднено в портативних приладах, через складність розробки лічильника, прийнятної по габаритах і працездатності у важких промислових умовах.

Апаратна реалізація другого методу значно простіше, оскільки вимагає інтегрування імпульсів, що виникають на виході вимірювального перетворювача лічильника при проходженні частинки, що реалізується відносно простими засобами. Причому при досить широкій частотній смузі пропускання підсилювача імпульсів, порушуваних у лічильнику частинками, можливий вимір концентрації незалежно від швидкості руху газоповітряного середовища. Використання саме цього методу дозволило авторам почати розробку лічильно-інтегральних засобів контролю, що допускають їхнє розміщення безпосереднє в пило-газовому потоці без примусового протягання запиленого повітря чи із застосуванням аспіраторів [134-136].

Далі розглянемо основні положення теорії рахункового методу, що дозволили, в остаточному підсумку, забезпечити реалізацію на їхній основі пунктів прийнятої концепції пилового контролю.

3.3. Основні положення теорії оптичного лічильно-інтегрального методу виявлення частинок

З позицій оптики пил – це полідисперсна система оптично активних аерозольних частинок, здатних у зваженому стані розсіювати чи послабляти електромагнітне випромінювання. Розміри пилових часток у більшості випадків

перевищують довжину хвилі видимого і близького до нього інфрачервоного випромінювання, що використовують для їх виявлення, тому частинки промислового пилу можна вважати великими й оптично активними.

Істотним недоліком оптичного методу виявлення частинок, як відзначалося, є їх властивість розсіювати світло пропорційно перетину, а не об'єму чи масі, що приводить до помилок при визначенні вмісту пилу в повітрі. Погрішність ця може бути істотно знижена раціональним вибором кутів реєстрації світлорозсіювання, але засоби, засновані на таких методах недостатньо надійні при роботі в промислових умовах, що відзначалося раніше. З огляду на цю обставину, основна увага при дійсних дослідженнях зверталася на пошук шляхів методичної компенсації цього недоліку в оптичному абсорбційному методі з реєстрацією окремих частинок і наступним формуванням інтегральних характеристик запиленості, тобто досліджується оптичний абсорбційний лічильник, надалі АЛ, заснований на ослабленні світла окремими частинками пилу.

Перш, ніж перейти до дослідження лічильно-інтегрального методу, сформулюємо основні теоретичні допущення й обмеження, якими ми будемо керуватися надалі при аналізі і розробці засобів пилового контролю, призначених для охорони праці. Вони обумовлені оптичними властивостями часток, впливають з теорії світлорозсіювання на великих частинках, а також визначаються задачами, що ставляться перед охороною праці в частині контролю запиленості виробничої атмосфери і зводяться до наступного.

1. Ослаблення електромагнітного випромінювання (світла) пилом обумовлено переважно розсіюванням світла на його частинках.

2. Розсіювання світла випадковим образом орієнтованих несферичних частинок пилу еквівалентно розсіюванню системою сферичних частинок, що мають площі проєкцій, які дорівнюють середній площі проєкцій несферичних частинок.

3. Ослаблення спрямованого світлового пучка через розсіювання випромінювання на частинках в усі сторони прагне до величини, пропорційній подвоєному перетину частинки лише при віддаленні спостерігача (фотоприймача) від частинки, що розсіює світло, на нескінченно велику відстань.

4. У реальній абсорбційній схемі практично не можливо забезпечити кутову апертуру фотоприймача, що дорівнює нулю, тому світловий потік, розсіяний частинкою в область малих кутів, попадає у фотоприймач з половинною кутовою апертурою певної величини θ і не бере участь в ослабленні спрямованого світла.

5. Для оцінки потоку світлорозсіювання на великих частинках приймається вираз (3.5). Його доцільно переписати у вигляді

$$S_{d\theta} = \frac{\pi \cdot d^2}{2} \varphi(d, \theta), \quad (3.11)$$

де $\varphi(d, \theta) = \varphi(z)$.

6. Частинки пилу з розмірами від 1 до 100 мкм будемо вважати оптично великими у видимій і ближній інфрачервоній області світла.

7. Абсолютні значення світлових потоків, що розсіюються чи послабляються частинками при безпосередньому контролі вмісту пилу повинні ставитися у відповідність фактичній концентрації пилу шляхом градування оптичних засобів за зразковим гравіметричним методом, що базується на визначенні маси проби пилу відібраної з повітря.

Прийняті допущення й обмеження дозволяють перейти до аналізу схеми фотометрії частинок пилу.

3.4 Аналіз абсорбційної схеми фотометрії окремих частинок

Розглянемо схему ослаблення спрямованого світлового пучка сферичною частинкою діаметром d , розташованою в точці O , з урахуванням розсіювання світла на ній (рис.3.2).

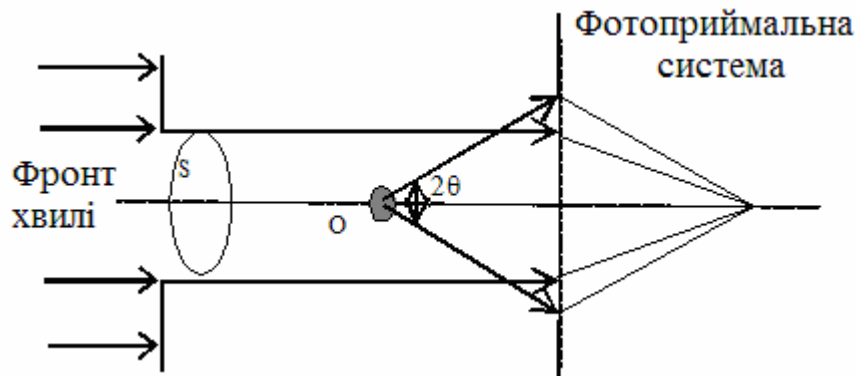


Рисунок 3.2 – Схема реєстрації ослаблення світлового потоку частинкою

Нехай спрямований світловий потік формується польовою діафрагмою з круглим отвором перетином S . Пучок рівнобіжних променів світла, що утворився, реєструється фотоприймальною системою, при цьому її вихідний сигнал буде пропорційним S . Частинка, поміщена в точку O , перекриє частину світлового пучка, розсіявши світловий потік, що потрапив на неї, пропорційно подвоєному геометричному перетину частки $2S_d = \pi \cdot d^2 / 2$. При цьому ефективний перетин спрямованого пучка зменшиться, що викличе зниження сигналу фотоприймача.

Вище відзначалося, що на фотоприймач разом зі спрямованим світловим потоком від джерела світла потрапить і деяка частина світла, розсіяного часткою вперед в область малих кутів θ , величина якого обчислюється за формулами (3.5) чи (3.11). Ця величина має розмірність площі, тому її можна розглядати як перетин розсіювання, тобто

$$S(z) = S_\theta = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \varphi(z) = \frac{\pi \cdot d^2}{2} \varphi(d, \theta) . \quad (3.12)$$

С урахуванням цього, площа спрямованого пучка S зменшиться на величину подвоєного перетину частинки за мінусом величини перетину, що пропорційний світлу, розсіяному часткою в межах кутової апертури фотоприймача – 2θ , згідно (3.12). Таким чином, потік ослаблення світла однією частинкою можна представити як перетин ослаблення

$$S_p = 2S_d - S_\theta = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [2 - \varphi(z)] \quad [52]. \quad (3.13)$$

Аналіз цього відомого виразу показує, що з однієї сторони компонента $S_\theta = \pi \cdot d^2 \cdot \varphi(z) / 2$ (світлорозсіювання в межах апертури фотоприймача) виступає як паразитна, знижуючи світлорозсіювання на частинці, що реєструється, і може бути зменшена за рахунок зниження апертури фотоприймача θ , половинну величину якої на практиці важко зробити менш 2° . З іншого боку вона виступає як корисна, тому що її наявність дозволяє регулювати чутливість оптичного методу до частинок.

Оцінимо вплив цього компонента на перетин ослаблення. Для цього вираз (3.13), шляхом підставлення $z = \rho\theta = \frac{\pi d}{\lambda} \theta$, доцільно перетворити у функцію від d для фіксованого значення θ/λ . Результати розрахунків за формулою (3.13) для обраних значень $\theta = 3^\circ$ і довжин хвиль, характерних для напівпровідникових джерел світла, за умови, що розсіяне у конусі малих кутів світло (до 3°) попадає у фотоприймач і не бере участь в ослабленні спрямованого світлового пучка, приведені в табл. 3.1.

Для підвищення наочності, розраховані значення оптичного перетину можна апроксимувати більш простою степеневою залежністю від розміру d в діапазоні від 1 до 64 мкм, наприклад,

$$S_p = 1,083 \cdot d^{1,93} \text{ для } \lambda = 0,65 \text{ мкм}; \quad (3.14)$$

$$S_p = 1,15 \cdot d^{1,92} \text{ для } \lambda = 0,94 \text{ мкм}. \quad (3.55)$$

Як бачимо, показник ступеня при d трохи менше 2-х, що підтверджує порушення квадратичного характеру розсіювання світла на частинках при обраних неграничних умовах.

У діапазоні розмірів часток від 2 до 10 мкм апроксимацію можна виконати значно точніше, наприклад у вигляді

$$S_p \approx 2,316 \cdot d^{1,7} \text{ (при } 2 < d < 10, \text{ мкм } \lambda = 0,92 \text{ мкм)} \quad (3.16)$$

Таблиця 3.1 – Значення оптичного перетину часток при половинній апертурі фотоприймача $\theta = 3^\circ$

Розмір частки d , мкм	Подвоєний перетин частки, $2S_d$, мкм ²	Оптичний перетин ослаблення світла частинкою S_p , мкм ² для фіксованих значень довжини хвилі світла λ , мкм			
		$\lambda = 0,65$	$\lambda = 0,75$	$\lambda = 0,92$	$\lambda = 0,94$
1	2	3	4	5	6
1	1,57	1,558	1,561	1,564	1,564
2	6,28	6,09	6,14	6,18	6,19
3	14,1	13,2	13,4	13,7	13,8
4	25,1	22,3	23,0	23,6	23,7
5	39,2	32,8	34,2	35,7	35,8
6	56,3	44,3	46,7	49,5	49,7
7	77	56,4	60,0	64,5	65,0
8	100	69,1	73,9	80,5	81,2
9	127	82,7	88,5	97,2	98,1
10	157	97,7	104	114	116
16	402	234	234	240	242
32	1608	871	871	891	895
48	3617	1901	1922	1945	1951
64	6431	3341	3368	3401	3407

Схожі результати отримані і при заміні функції розсіювання $\varphi(z)$ більш простою залежністю. Так, для обраних значень $\theta = 3^\circ$ і $\lambda = 0,94$ мкм $\varphi(z)$ перетворюється в дволанцюгову функцію від d

$$\varphi(d) = 6,7 \cdot 10^{-3} d^{2,35} e^{-0,109d} \text{ при } d < 17,5 \text{ і } \varphi(d) = 1 - \frac{3,72}{d} \text{ при } d > 17,5. \quad (3.17)$$

При цьому наступна апроксимація ступеневою залежністю дає

$$S_p \approx 2,27d^{1,72} \text{ при } 2 < d < 17,5 \text{ мкм}; \quad (3.18)$$

$$S_p \approx 0,78d^2 + 2,9 / d \text{ при } d > 17,5 \text{ мкм}, \quad (3.19)$$

причому зі збільшенням θ приграничний розмір часток (17,5 мкм) зменшиться.

Слід зазначити, що точність приведених апроксимуючих виразів істотно міняються від правила вибору точок для апроксимації, тому приведені вирази можна використовувати в якісному аналізі чи в приблизних розрахунках. Нижче в табл. 3.2 для порівняння приведені значення S_p , розраховані за різними формулами для найбільш характерних розмірів частинок.

Таблиця 3.2 – Значення оптичного перетину часток, отриманих за різними формулами при однакових обраних параметрах

Діаметр частинки d , мкм	Значення S_p , отримані 3 різними формулами, мкм ²		
	(3.13)	(3.15)	(3.18, 3.19)
1	1,564	1,15	2.27
2	6,19	4.35	7.47
4	23.7	16,4	24,6
8	81,2	62,3	81,2
16	242	236	267
32	895	892	798
64	3407	3377	3194

Як бачимо, істотні відхилення результатів розрахунків S_p по апроксимуючим виразам спостерігаються лише для частинок 1-2 мкм. Для інших частинок розбіжності цілком прийнятні.

Аналіз приведених залежностей і даних дозволяє зробити наступні висновки щодо абсорбційної оптичної схеми виявлення частинок:

- ефективність ослаблення світла при кінцевому значенні апертури фотоприймача через утрату (не урахування) розсіювання під малими кутами монотонно знижується зі збільшенням розмірів частинок (від подвоєного перетину частки до одного), що приводить до падіння чутливості методу до великих частинок і вимагає урахування чи наступного коректування сигналів фотоприймача, що реєструються;

- фактор довжини хвилі можна вважати не істотним для методу, заснованого на реєстрації окремих частинок;

- апроксимуючі вирази для потоків ослаблення світла частками можна використовувати поряд з точною формулою.

3.5. Висновок

1. Для більшості частинок пилу, що знаходяться в повітрі в одній конкретній досліджуваній хмарині, інтегральні оптичні характеристики, що одержують від безлічі частинок, навіть при різноманітті їх форм, мало відрізняються від характеристик, що одержують для строго сферичних частинок. Тому при теоретичному аналізі оптичних засобів контролю запиленості можна використовувати математичний апарат, розроблений для сферичних частинок. При цьому абсолютні значення одержаних (розрахованих) світлових потоків ставляться у відповідність фактичній концентрації пилу, що вимірюється базовим гравіметричним методом, тобто обов'язково необхідне градуювання оптичних засобів контролю пилу.

2. Аналіз шляхів реалізації оптичного лічильного методу, один із яких заснований на селекції імпульсів по амплітуді, а інший на їх інтегруванні, з

метою визначення площі імпульсів, показав перспективність другого напрямку, апаратурна реалізація якого простіше, а засоби надійніші. Причому в теоретичному аналізі запропонованого лічильно-інтегрального методу контролю вмісту пилу припустиме використання граничного випадку класичної теорії світлорозсіювання на великих сферичних частинках.

3. Теоретичний аналіз відомої оптичної абсорбційної схеми, що використовується для виявлення частинок пилу і визначення їх оптичних параметрів, показав, що ослаблення світла частинками знижується зі збільшенням їх розмірів від величини, пропорційної подвоєному геометричному перетину частки до величини, пропорційної одному її перетину. Це приводить до падіння чутливості методу до великих частинок і вимагає його коректування для забезпечення достовірного контролю масового вмісту частинок. При цьому фактор довжини хвилі світла не є істотним для схеми.

4. ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ, ЯКУ ОТРИМУЮТЬ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМИ ЗАСОБАМИ ВІЯВЛЕННЯ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК В ПОВІТРІ

4. 1. Теоретичний аналіз вихідного сигналу оптико-електронної схеми абсорбційного лічильника (АЛ)

Від схеми фотометрії частинок перейдемо до теоретичного аналізу оптико-електронної схеми абсорбційного лічильника, далі АЛ, кінцевою метою якого є виявлення її особливостей, оптимізація параметрів і пошук шляхів визначення масового вмісту частинок запропонованим методом з достатньою для практики точністю.

Розглянемо найбільш просту схему АЛ (рис.4.1), користаючись якою проаналізуємо найбільш важливі аспекти перетворення величини деформації світлового потоку частинками пилу в електричні імпульси на виході фотоприймача, а саме:

- вплив положення частинки в спрямованому оптичному пучку;
- величину амплітуди і форму імпульсів.

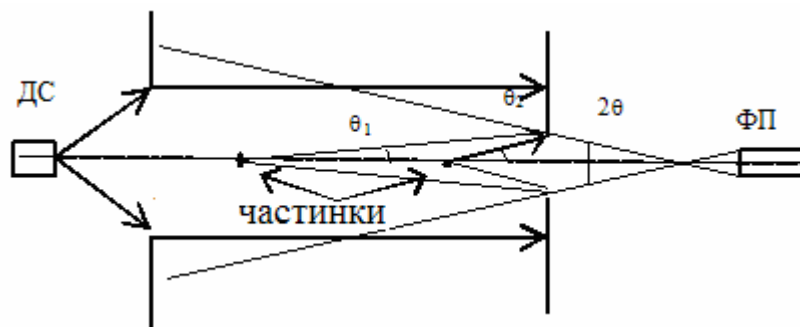


Рисунок 4.1 – Фотометрична схема АЛ: ДС – джерело світла; ФП – фотоприймач; θ_1 і θ_2 кути реєстрації світлорозсіювання

Розглянемо перший аспект. Установлено, що ослаблення світла частинкою пропорційне оптичному перетину ослаблення S_p , згідно (3.13). При цьому, як видно з рис. 4.1 та впливає з формул (3.12) і (3.13), при одній і тій апертурі фотоприймача компонент $S_\theta = \pi \cdot d^2 \cdot \varphi(z)/2$, що віднімається, буде більше для тієї з двох показаних на схемі однакових частинок, яка буде ближче розташована до фотоприймача. Тому оптичний перетин ослаблення для цієї частки буде менше і вона буде сприйматися АЛ як більш дрібна.

Оцінимо вплив положення частки в спрямованому оптичному пучку. Очевидно, що цей вплив визначається кутом θ , тому розрахуємо S_p для обраних розмірів частинок у діапазоні кутів θ від 2° до 8° , тобто в області кутів спостереження потоків розсіювання, що зустрічається у практиці виявлення частинок пилу. Результати розрахунку приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення величини оптичного перетину ослаблення S_p , мкм для деяких кутів θ° і $\lambda = 0,94$ мкм (У дужках зазначена величина $\frac{\pi\theta}{\lambda}$, рад)

Розмір частки d , мкм	Оптичний перетин ослаблення S_p , мкм для відповідних кутів θ° (рад)			
	2° (0,117)	3° (0,174)	5° (0,292)	8° (0,467)
1	1,57	1,564	1,55	1,53
2	6,24	6,19	6,07	5,66
4	24,5	23,7	21,5	17,9
8	91	81,2	64,7	58,4
16	287	242	231	219
32	935	895	856	838
64	3504	3407	3324	3287

З даних таблиці випливає, що вплив положення частинок в оптичному каналі лічильника по осі спрямованого світлового пучка неоднозначно позначається на оптичних перетинах, що реєструються, і більш істотно для частинок середніх розмірів, приблизно від 5 до 15 мкм, де варіація значень S_p наближається до $\pm 15\%$ і досягає максимуму $\pm 18\%$ при $d \approx 8$ мкм. При $d = 64$ мкм варіація S_p склала приблизно $\pm 3,5\%$, а при $d = 1$ мкм – близько $\pm 1\%$. Характерно, що для промислового пилу, зокрема, підприємств вугільної промисловості, частка частинок, зазначених середніх розмірів, складає від 18 до 45 % її загальної маси [79].

Розглянемо другий аспект, тобто оцінимо величину амплітуди і форму імпульсів струму чи напруги, що виникають у фотоприймачі через ослаблення спрямованого світлового пучка частинками пилу, що пролітають. При цьому максимальна зміна фотоструму, викликаного однією частинкою, визначається виразом

$$I_o - I = I_o \cdot \frac{S_p}{S}, \quad (4.1)$$

де I_o – інтенсивність світлового потоку, що направляєється у вимірювальний обсяг; I – інтенсивність спрямованого світлового потоку на фотоприймачі; S – перетин світлового пучка у вимірювальному обсязі; S_p – оптичний перетин ослаблення світлового потоку частинкою пилу з геометричним діаметром d , розрахований відповідно до залежності (3.13).

Таким чином, зміна амплітуди фотоструму пропорційна оптичному перетину однієї частки, а вираз (4.1) є основним при виборі конструктивних параметрів АЛ. Зокрема, він дозволяє визначити амплітуду фотоструму при

прольоті частинки через вимірювальний об'єм лічильника. Так, якщо при відсутності пилу фотострум на фотоприймачі складає наприклад $I_0 = 100$ мкА при перетині світлового пучка $S = 1 \text{ мм}^2$ (10^6 мкм²), то збурювання, внесені частинкою, наприклад, розміром 10 мкм, складе:

$$I_o - I = I_o \cdot \frac{S_p}{S} \approx 100 \frac{100}{10^6} = 0,01 \text{ мкА.}$$

Отримане значення дозволяє визначити, чи буде сигнал від виявленої частинки на рівні шумів фотоприймача, та оцінити величину подальшого посилення сигналу або дозволяє підібрати необхідний перетин світлового пучка.

Форму імпульсів визначимо на підставі наступних міркувань. Якщо перетин світлового пучка значно більше геометричного перетину частинки і щільність світлового потоку в ньому рівномірна, то очевидно, що теоретично імпульс при прольоті частки повинний бути близьким до прямокутного (фігура 1 на рис. 4.2).

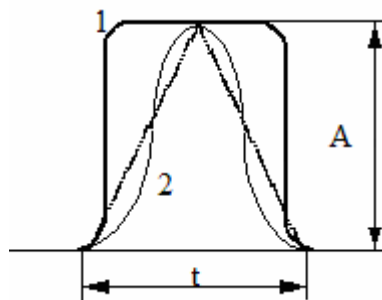


Рисунок 4.2 – Форми імпульсів, що виникають у фотоприймачі при прольоті частки через спрямований світловий пучок: 1 – ідеалізованого; 2 – реального.

Ширина його, тобто тривалість (t), буде пропорційна швидкості частинки. На практиці через інерційність фотоприймача разом з електронною схемою і ростом щільності світлового потоку до осі спрямованого пучка відбувається нахил (завал) обох його фронтів (фігура 2 на рис 4.2) і імпульс стає майже трикутним, що підтверджується експериментально.

Тому надалі будемо вважати, що АЛ виробляє трикутні імпульси, амплітуда A яких пропорційна оптичному перетину частинки S_p , а тривалість t у основі імпульсу – швидкості прольоту, що для сталого рівномірного руху можна вважати постійною величиною.

4.2 Методи підвищення точності визначення масового вмісту пилу за інформацією, що отримують за допомогою АЛ

Як показане вище, оптичний перетин ослаблення частинки стосовно до АЛ, по-перше, – пропорційний у певній мірі площині частинки, тобто не

пропорційний масі частинки, а по-друге, – залежить від положення частинки у світловому пучку.

Повне усунення цих недоліків принципово неможливо, але нами були запропоновані на рівні ідей [101, 103, 137], а потім досліджувалися різні методи їхнього часткового усунення, компенсації чи урахування. Розглянемо найбільш ефективний з нашої точки зору метод усікання імпульсів на виході абсорбційного лічильника (АЛ);

Припустимо, що схема обробки формує сигнал, пропорційний площі трикутних імпульсів, що надходять з АЛ. Проаналізуємо, як буде змінюватися сигнал його оптико-електронної схеми, якщо виконати відсікання нижньої частини трикутного імпульсу на рівні U (рис.4.3).

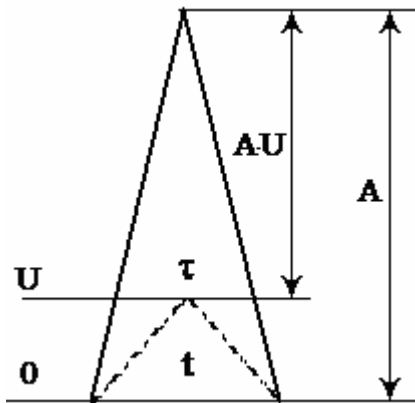


Рисунок 4.3 – Діаграма відсічення нижньої частини трикутного імпульсу на постійному рівні U

Очевидно, якщо буде мінятися амплітуда імпульсів, то зміниться і площа їх верхньої частини, що реєструється далі оптико-електронною схемою. Причому, чим менше амплітуда імпульсів, тим більше буде ступінь їх усікання, аж до повного відсічення і виключення з наступного аналізу, як це відбудеться з імпульсом, позначеним на рис. 4.3 пунктиром. Таким шляхом можна знизити внесок великої кількості малих частинок у інформаційний сигнал ослаблення світла і підвищити роль більш великих, загальна маса яких істотно більше, і, тим самим, підвищити точність контролю об'ємного, а значить і масового вмісту пилу запропонованим АЛ.

Для оцінки впливу величини рівня відсічення U на характер інформаційного сигналу визначимо, згідно рис. 4.3, відношення площ усіченого (площа вище рівня U) і вихідного імпульсів. Вони відносяться як квадрати висот трикутників чи квадрати амплітуд імпульсів, тобто можна записати

$$k = \frac{s}{s_0} = \left(\frac{A-U}{A}\right)^2 = \left(1 - \frac{U}{A}\right)^2. \quad (4.2)$$

У справедливості (4.2) неважко переконатися, якщо визначити площу усіченого імпульсу (площу вище рівня U) як $s = \frac{1}{2} \tau(A-U)$. Потім з умови

подоби вихідного й усіченого імпульсів (трикутників): $\frac{\tau}{t} = \frac{A-U}{A}$

знайти $\tau = t \frac{A-U}{A}$, а, прийнявши $t = c = \text{const}$, одержати $\tau = c \frac{A-U}{A}$. Далі,

знайшовши з урахуванням τ , $s = \frac{1}{2} c \frac{(A-U)^2}{A}$, а потім площу початкового імпульсу як $s_0 = \frac{1}{2} t \cdot A$ чи $s_0 = \frac{1}{2} c \cdot A$, можна визначити k .

Власне кажучи, величина k характеризує разом з відношенням площ імпульсів саме ту частку світлового потоку, що ми врахуємо (візьмемо до уваги) у повному світловому потоці, ослабленому часткою, увівши відсікання. Отже, можна записати

$$k = \frac{s}{s_0} = \frac{S_p^*}{S_p}, \text{ відкіля } S_p^* = k \cdot S_p, \quad (4.3)$$

де S_p^* – оптичний перетин ослаблення з урахуванням відсікання частини фактичного імпульсу, який можна назвати “псевдооптичним” перетином ослаблення, оскільки його отримують в АЛ штучним відсіканням.

Після підставлення в (4.3) залежності (4.2), одержимо

$$S_p^* = \left(1 - \frac{U}{A}\right)^2 S_p. \quad (4.4)$$

Отже, квадратичний характер величини k дозволяє шляхом відсікання частини потоку, тобто зміною U , істотно впливати на вид функціональної залежності S_p^* від розміру частинок d і впливати на функцію перетворення АЛ.

Конкретизуємо залежність (4.4). Для цього спочатку визначимо амплітуду A . Вона пропорційна максимальній зміні фотоструму при прольоті частинки через АЛ. Приймаючи до уваги (4.1), амплітуда A представиться, як функція оптичного перетину частки S_p

$$A = I_0 - I = I_0 \cdot \frac{S_p}{S}. \quad (4.5)$$

Рівень відсікання U теж можна зв'язати з S_p , записавши

$$U = I_0 \cdot \frac{S_{p(o\text{mc})}}{S}, \quad (4.6)$$

де $S_{p(o\text{mc})}$ – величина оптичного перетину ослаблення чи оптичний перетин частки, що збуджує в АЛ імпульс з амплітудою U , що еквівалентний рівню відсікання U , мкм, тобто величині, що передбачається відітнути (на рис. 4.3 імпульс від частинки з таким перетином показаний пунктиром).

Пояснимо суть цієї величини на прикладі. Так, якщо вибрати $S_{p(o\text{mc})} = 23,7 \text{ мкм}^2$, орієнтуючись на дані табл.3.1 (стовпчик 6), то ми виключимо частинки розміром $d \leq 4 \text{ мкм}$ (при $\lambda=0,94 \text{ мкм}$) із подальшого аналізу, оптичний

внесок багатой кількості яких в інтегральний сигнал лічильника досить суттєвий, проте маса порівняно мала.

Підставимо визначені згідно (4.5) і (4.6) величини A та U у формулу (4.4). Одержимо

$$S_p^* = \left(1 - \frac{S_{p(оmc)}}{S_p}\right)^2 S_p, \quad (4.7)$$

чи

$$S_p^* = \left(\frac{S_p - S_{p(оmc)}}{S_p}\right)^2 S_p = \frac{(S_p - S_{p(оmc)})^2}{S_p}. \quad (4.8)$$

Співвідношення (4.8) дозволяє обчислити перетин S_p^* , який можна назвати псевдооптичним перетином скоректованого оптичного методу для частинок, амплітуда яких вище рівня відсікання (див. табл.4.2). Як бачимо, підвищення рівня відсікання підстави імпульсів, приводить до росту крутості залежності $S_p(d)$, про що можна також судити по зростанню показника ступеня апроксимуючої степеневій залежності (нижній рядок табл.4.2) від 1,92 до 2,63, тобто відсікання змінює характер ослаблення, що спостерігається, світла, наближаючи його до кубічної залежності від розміру частинок.

Таблиця 4.2 – Псевдооптичний перетин ослаблення S_p^* мкм, визначений при відсіканні нижньої частини імпульсів на рівнях, що відповідають різним розмірам частинок

Розмір частинок d , мкм	Теоретичний оптичний перетин ослаблення S_p , мкм	Перетин ослаблення S_p^* , мкм при відсіканні підстави імпульсів на рівнях, що відповідають наступним розмірам частинок, мкм				
		1	2	4	8	16
1	1,56	0	0	0	0	0
2	6,19	3,46	0	0	0	0
4	23,7	20,7	12,9	0	0	0
8	81,2	78,1	69,2	40,7	0	0
16	242	239	230	197	107	0
32	895	892	883	848	740	476
64	3408	3404	3396	3361	3248	2941
	$1,15d^{1,92}$	$1,14d^{1,925}$	$1,06d^{1,94}$	$0,81d^2$	$0,37d^{2,18}$	$0,05d^{2,63}$

Примітка. В останньому рядку приведені результати апроксимації відповідного стовпця таблиці степеневією залежністю.

У результаті, представляється можливість одержати сигнали, у більшій мері пропорційні об'єму частинки, а значить і її масі (при постійній густині речовини пилу). Крім того, відсікання нижньої частини імпульсів дозволяє виділити грубу фракції пилу з загальної маси. Так, можна виконати оптико-електронний поділ частинок на тонку і грубу фракції інтегральним шляхом, не прибігаючи до механічних роздільників чи до амплітудної селекції з наступним підрахунком окремих імпульсів, як це виконується в класичних аналізаторах спектра частинок. Така можливість дозволяє реалізувати двоступінчасту гравіметрію запиленого повітря на основі АЛ.

Відсічення нижньої частини імпульсів АЛ має й іншу позитивну сторону, зв'язану з неминучими шумами його оптико-електронних схем, що реєструє імпульси від частинок [138]. Напряга цих шумів, як правило, накопичується наступним вимірювальним перетворювачем сигналу АЛ, причому природна нестабільність шуму, яку зазвичай приходиться компенсувати установкою нуля перетворювача, приводить до значного дрейфу цього нуля, що утрудняє реєстрацію малих концентрацій пилу. Відтинаючи ж імпульси, ми відтинаємо (відсікаємо) і шум, тим самим, знижуючи зазначений дрейф нуля.

Звернемо увагу ще на один момент, що стосується відсікання шуму. Звичайно шумова напряга, що виділяється разом з інформаційними імпульсами, порівнянна з амплітудою імпульсів від малих частинок. Тому разом із шумом будуть відсічені і малі частки (рис.4.4).

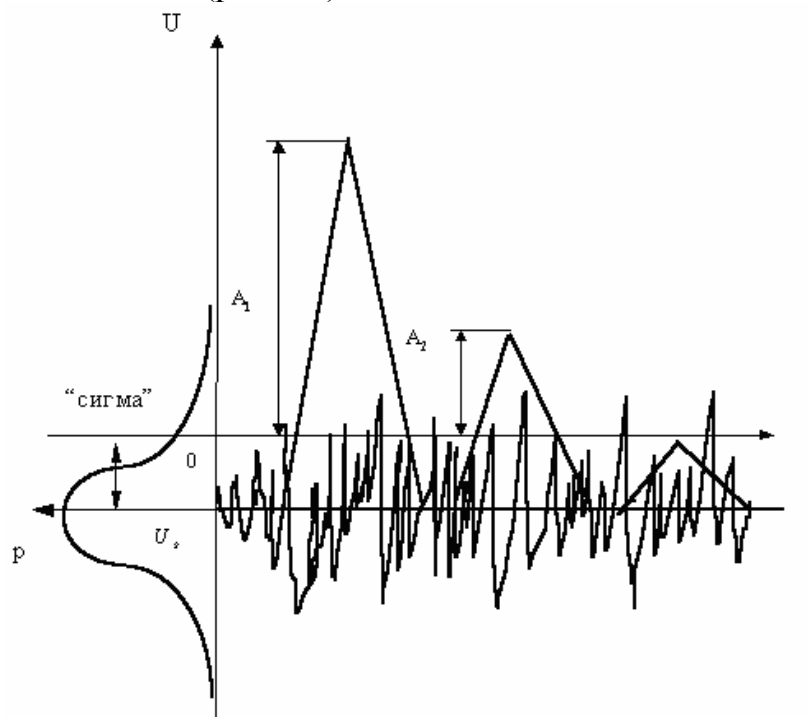


Рисунок 4. 4 – Діаграма, що ілюструє відсікання сигналу лічильника на рівні шуму (ліворуч приведений графік щільності імовірності шуму при нормальному законі розподілу): A_1 і A_2 – амплітуда імпульсів, що фактично реєструється; “сигма” - середньоквадратичне відхилення шуму.

Але, як з'ясувалося, інформація про малі частки при цьому не губиться цілком. З урахуванням адитивності шуму і корисного імпульсного сигналу

існує можливість потрапляння на вхід вимірювального перетворювача імпульсів з амплітудою, що нижче рівня відсікання. Це повинно відбуватися в момент збігу фаз шумового сигналу і імпульсів, коли амплітуда шуму й амплітуда імпульсу від частки складаються, а сумарна амплітуда сигналу перевищить рівень відсічення, тобто U . Несинфазні із шумом інформаційні імпульси такої ж амплітуди внесуть менший вклад у вихідний сигнал вимірювального перетворювача чи взагалі не будуть враховані.

Таким чином, регулюючи рівень відсікання сигналу лічильника за допомогою величини U , можна керувати функцією перетворення вимірника запиленості в області тонкодисперсної фази аерозолі, регулюючи (зменшуючи) внесок малих частинок у загальний (інтегральний) сигнал, одночасно знижуючи паразитний вплив шуму. Подвійний ефект відсікання сигналу АЛ, дозволяє розраховувати на підвищення точності визначення об'ємного, отже і масового вмісту пилу в повітрі, оптичним лічильно-інтегральним методом, а крім того, реєструвати як загальну масу пилу, так і масу тільки грубої його фракції [139].

У зв'язку з викладеним вище, виникає задача вибору оптимального рівня напруги відсікання U . Її рішення, з одного боку, зводиться до мінімізації впливу шуму, рівень і дрейф якого обумовлюють граничну чутливість вимірника і нестабільність його показань, а з іншого боку, – до зниження впливу великої кількості малих частинок на результуюче значення масової концентрації. Іншими словами, потрібне коректування інформації, що отримують оптичним лічильником частинок методу відповідно до запропонованої методики.

Оптимальним рішенням задачі нам представляється часткове, але достатнє відсікання шуму на рівні, що залежить від величини самого шуму. Доцільно зв'язати цей рівень із середньоквадратичним значенням шуму – "сигма" (див. рис. 4.3.). У цьому випадку імовірність його середньоквадратичного відхилення в одну "сигму", при нормальному законі розподілу шумової функції, складе по модулю близько 0,68 або 68 % (приблизно 70 %). Доречно відзначити, що для двох "сигма" – ця величина складе 95 %, а для трьох "сигма" – 99 % [102, 140]. В останньому випадку, досягається практично повне придушення шуму, але при цьому можуть бути втрачені у загальному сигналі внесок від найменших частинок пилу, що, утім, прийнятно при контролі вмісту грубих фракцій пилу і буде розглянуто пізніше.

Таким чином, якщо установити рівень U , що відповідає одній "сигма", то амплітуда шуму буде відсічена на рівні близько 70 %. Інша ж частина шуму буде присутня у корисному сигналі, складаючись з імпульсами від частинок. (Частка шуму, що приведена до масової концентрації пилу, нашим рекомендаціям може складати 5-15 мг/м³ при концентраціях контрольованого пилу від 10 до 500 мг/м³, тобто шум може бути еквівалентним середній запиленості повітря порядку 10 мг/м³). При цьому, через підсумовування сигналів, забезпечується пропущення разом із шумом і вершин імпульсів (приблизно 30% амплітуди), що виникають від тих частинок, амплітуда яких

дорівнює рівню відсікання U . На практиці, обраному таким способом рівню відсікання відповідають імпульси, що виникають від частинок з розмірами до 4 мкм, у залежності від співвідношення “сигнал – шум” у конкретному лічильнику, що визначається параметрами оптико-електронної схеми.

Таким чином, не відбудеться повного виключення з подальшого аналізу частинок, амплітуда імпульсів, від яких дорівнює прийнятому рівню відсікання шуму, але внесок від них у загальний сигнал може знизитися з 100 % до приблизно 11%. Саме стільки, згідно (4.8), складає площа вершини трикутного імпульсу, амплітуда якого усічена знизу на 70%. Очевидно, що від частинок, амплітуда яких менше рівня відсікання, внесок буде ще менше, а з більшою амплітудою – вище, наближаючись до 100% у міру росту розмірів частинок, що як уже відзначалося, підвищує точність перетворення оптичного сигналу ослаблення світла частинками в об’ємну концентрацію пилу.

4.3. Вплив шуму схеми на регулювання інформаційного внеску малих частинок при усіканні електричного сигналу лічильника

Вплив шуму для всього розглянутого спектра розмірів частинок можна врахувати аналітично. Для цього спочатку проаналізуємо вплив шуму на частинки, що опинилися нижче приведеного рівня відсікання $S_{p(оmc)}$. Запишемо псевдооптичний перетин ослаблення частки в цьому випадку як

$$S_p^{**} = \left[p \cdot S_{p(оmc)} + p \left(\frac{S_p}{S_{p(оmc)}} \right) (S_p) \right], \text{ при } S_p < S_{p(оmc)}, \quad (4.9)$$

де p – імовірність того, що шум перевищить прийнятий рівень його відсікання (при відсіканні шуму на рівні “сигма” $p = 0,3$; двох “сигма” – $0,05$; трьох “сигма” – менше $0,01$ [102]).

Перший компонент у правій частині приведеного виразу визначає внесок, обумовлений шумом. Це постійна величина, що визначається приведеним рівнем відсікання шуму $S_{p(оmc)}$, помноженим на імовірність p того, що шум перевищить цей рівень. Другий компонент визначає внесок, обумовлений імпульсами від частинок, амплітуда яких виявилася менше рівня відсікання. Вона теж має імовірнісний характер, оскільки виникає завдяки наявності шуму, а тому його можна вважати пропорційним перетину частки S_p і тієї ж імовірності p , помноженої на імовірність взаємодії імпульсу від частинки із шумом. Зазначену імовірність можна приблизно оцінити відношенням $\frac{S_p}{S_{p(оmc)}}$, маючи на увазі те, що, чим перетин частки менше рівня відсікання, тим менше імовірність синфазного підсумовування сигналу шуму й імпульсу від частинки.

Для частинок, перетин яких перевищує рівень $S_{p(o m c)}$, результуючий перетин ослаблення прийме вигляд

$$S_p^{**} = \left[S_p^* + p \cdot S_{p(o m c)} + p(S_p - S_p^*) \right], \text{ при } S_p > S_{p(o m c)} . \quad (4.10)$$

Перший компонент у правій частині виразу (4.10) – це псевдооптичний перетин ослаблення світла частинкою, що обчислюють з урахуванням відсікання нижньої частини імпульсів за формулою (4.8), що не враховує наявності шуму. Другий компонент, як відзначено вище, визначає внесок, обумовлений шумом. Останній же компонент визначає внесок, обумовлений тією частиною великих імпульсів, що залишилася нижче рівня відсікання. Вона теж виникає завдяки наявності шуму, а тому її можна вважати пропорційній імовірності p , помноженій на перетин частинки, що залишилася нижче рівня відсікання.

Оскільки чисто шумовий компонент $p \cdot S_{p(o m c)}$ в обох формулах, в остаточному підсумку, виключається з вихідного інформаційного сигналу установкою нуля схеми при відсутності пилу, то його можна виключити з формул, отже залежності (4.9) і (4.10) перепишемо у вигляді

$$S_p^{**} = \left[p \left(\frac{S_p}{S_{p(o m c)}} \right) (S_p) \right] \text{ при } S_p < S_{p(o m c)} ; \quad (4.11)$$

$$S_p^{**} = \left[S_p^* + p(S_p - S_p^*) \right] \text{ при } S_p > S_{p(o m c)} . \quad (4.12)$$

Користаючись отриманими виразами, оцінимо характер потоків ослаблення світла частками різних розмірів при відсіканні підстави (основи) імпульсів на різних рівнях з урахуванням наявності шуму. Для цього зручно одержати залежність сумарного ослаблення світлового потоку запиленим об'ємом, що містить, наприклад, 1 мг сферичних частинок одного розміру з густиною речовини 1000 кг/м^3 , від діаметра цих частинок.

Розрахунок виконаємо в наступному порядку. Спочатку розрахуємо кількість відповідних сферичних частинок N_d , що містяться в 1-ому мг пилу. Потім визначимо їх теоретичний сумарний потік ослаблення світла (сумарний оптичний перетин), як $S_p \cdot N_d$, $\text{м}^2/\text{мг}$ (без відсікання і шуму), або як $S_p^{**} \cdot N_d$ – у випадку відсікання з урахуванням впливу шуму, згідно (4.11) і (4.12). Результати розрахунків сумарних потоків ослаблення світла, що отримуються абсорбційним лічильником, без відсікання його сигналу і при відсіканні на двох рівнях для значень S_p і S_p^* , узятих з табл.4.2, приведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Ослаблення світла об'ємом, що містить 1 мг сферичних частинок с густиною їх речовини 1000 кг/м³ (1мг/мм³)

Розмір частинок d , мкм	Число частинок при їх загальній масі 1 мг, N_d , тис.шт./мг	Сумарні потоки ослаблення:			
		теоретичні		після відсікання імпульсів і шуму	
		S_p , мкм ²	$S_p N_d$, мм ² /мг	$S_p^{**} N_d$, мм ² /мг ($p = 0,3$)	$S_p^{***} N_d$, мм ² /мг ($p = 0,05$)
1	2	3	4	5	6
1	2000000	1,56	3140	62	2,7
2	250000	6,19	1548	121	5,4
4	31000	23,7	734	222	9,9
8	3900	81,2	316	206	14,5
16	490	242	119	103	51
32	61	895	55	53	45
64	7,6	3408	26	25,7	24,7

Відзначимо, що в колонках 5 і 6 для порівняння представлені відповідні сумарні перетини ослаблення при відсіканні імпульсного сигналу лічильника на рівнях, що дорівнюють одному середньоквадратичному відхиленню (імовірність пропущення шуму $p=0,3$), що відповідає оптичному перетину частинок розміром менше 4 мкм, і – двом середньоквадратичним відхиленням (імовірність пропущення шуму $p=0,05$), що відповідає оптичному перетину частинок близько 8 мкм.

Приведені в табл.4.3 результати розрахунків показують, що наявність шуму в оптико-електронній схемі і його часткове відсікання істотно впливає на обумовлений характер ослаблення світла частками. При цьому підвищення рівня відсікання приводить до значного зниження сумарного перетину ослаблення світла частинками, особливо в області тонких фракцій, але без втрати інформації про найменші частинки.

Для вибору оптимального рівня відсікання сигналу АЛ розглянемо наочні залежності сумарних потоків ослаблення, розраховані в більш широкому діапазоні значень рівня відсікання, що задаються у значеннях величини “сигма” (рис. 4.3).

Згідно кривої 1, приведеної на цьому рисунку, монодисперсна система, що складається з частинок розміром 1 мкм, послабляє світловий потік на два порядки сильніше, ніж такий же по масі аерозоль, що складається з частинок розміром 64 мкм. Усікання сигналу, що містить шум, на рівні одного значення “сигма” (крива 2) і вплив частини шуму, що залишився, знижують цю різницю приблизно до трьох разів.

Відносно рівна залежність сумарного ослаблення характерна для кривої 3 (рівень відсікання шуму 1,5 “сигма”), у якій перетини розсіювання

відрізняються не більш, ніж у 5 разів у всьому досліджуваному діапазоні розмірів частинок, а при придушенні шуму на рівні двох “сигма” (крива, що відповідає ряду 4) частинки розміром 1 мкм послабляють світло вже на порядок менше. Криві ж 4 і 5, наочно ілюструють факт значного придушення тонких фракцій пилу, величину якого можна оцінити по граничних кривих. Так, відповідно до залежностей 1 і 5, сумарний перетин потоків ослаблення світла для частинок розміром 1-2 мкм знизився більш, ніж у 1000 разів.

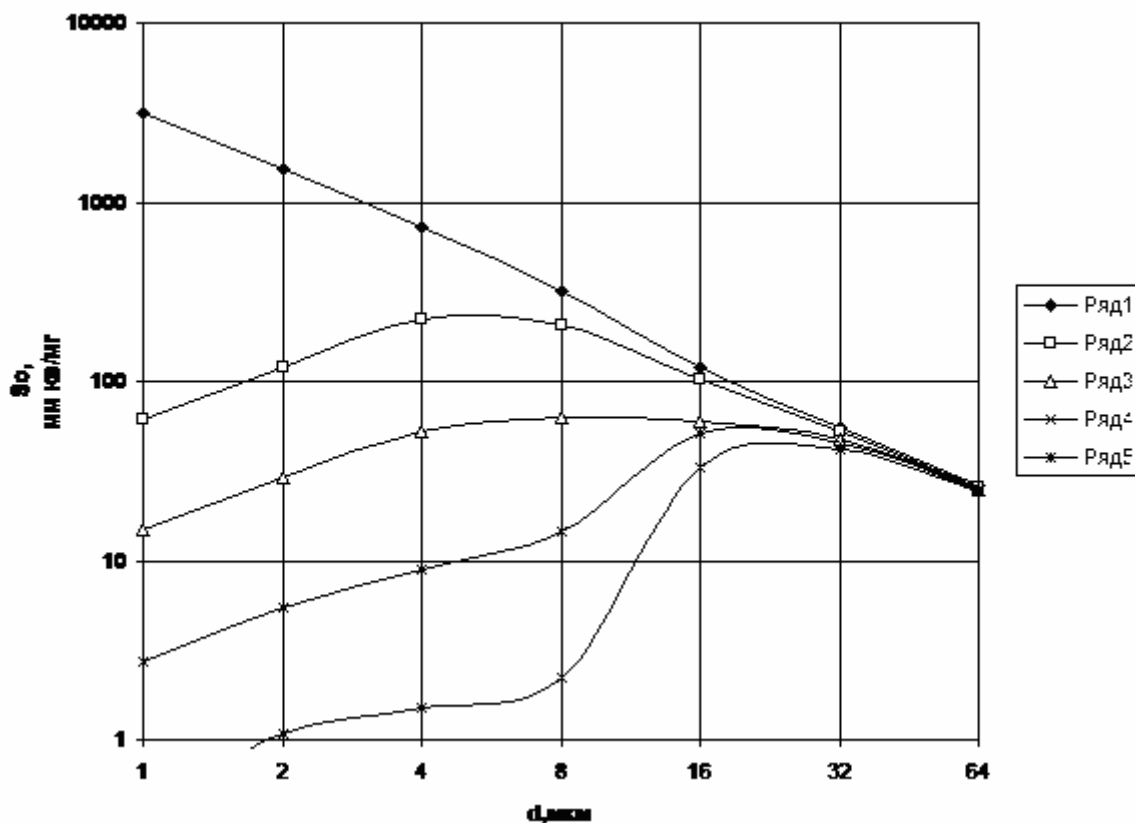


Рисунок 4.5 – Залежності потоків ослаблення світла об’ємом, що містить 1 мг сферичних частинок, при різних умовах: 1 – теоретична крива (ряд 1) ослаблення без відсікання й без шуму; 2 - 5 – відповідно, залежності, отримані при відсіканні сумарного сигналу лічильника, що містить шум на рівнях: 1; 1,5; 2 і 3 середньоквадратичних значень шуму у “сигма”

Цілком очевидно, що залежність для найбільш точного визначення загальної маси пилу повинна знаходитися в області між кривими (рядами) 2 і 3. При цьому варто нагадати, що цей результат отриманий для монодисперсного аерозолі, тобто для теоретично найбільш несприятливого граничного випадку. Для одного ж міліграма промислового пилу, що практично ніколи не буває монодисперсним, сумарний перетин розсіювання буде прагнути до середнього значення для цих кривих, що буде залежати від фактичного розподілу дисперсного складу пилу і може бути визначений як сума n загальних перетинів ослаблення i -х фракцій

$$S_0 = \sum_{i=1}^n S_{pi}^{**} \cdot N_{di} \cdot D_i ,$$

де D_i - частка кожної i -ої із n фракцій пилу в загальному розподілі частинок по розмірах, причому $\sum_{i=1}^n D_i = 1$.

Користаючись приведеним виразом, оцінимо сумарний перетин ослаблення S_0 для полідисперсного пилу на прикладі розподілу дисперсного складу, що найбільш часто зустрічається у вугільних шахтах. При відсіканні шуму на рівні однієї величини “сигма”, одержимо $S_0 \approx 130$ мм²/мг, тобто приблизно такий, як у монодисперсного пилу з розмірами частинок близько 2 мкм або 15 мкм (див. рис. 4.3). Причому частинки, що опинилися в зазначеному проміжку розмірів, будуть вносити найбільший вклад у результуючий інформаційний сигнал АЛ. Зміна рівня відсікання сигналу до рівня півтора “сигма”, знижує S_0 до приблизно 60 мм²/мг, тобто орієнтовно на 50 % і відповідає монодисперсному пилу з частинками близько 4 мкм або 18 мкм. Як бачимо, інтервал розмірів частинок, що мають найбільший внесок, зміщується в область частинок з найбільшою сумарною масою (В аналізованому розподілі максимум масового вмісту в 37 % приходить на частинки розміром від 10 до 20 мкм). Це, зайвий раз, підтверджує доцільність запропонованого методу відсікання для підвищення точності контролю масового вмісту пилу оптичним лічильником. Оцінка впливу змін дисперсного складу на величину S_0 проводилася з використанням даних про склад пилу в очисних і підготовчих вибоях вугільної шахти. Так, у випадку відсікання на рівні 1,5 “сигма”, перехід від одного розподілу до іншого (граничних для шахти) зміни величини S_0 склали не більше 15 %, що менше припустимої величини в $\pm 25\%$.

Виконаний аналіз показує, що наявність шуму в оптико-електронній схемі стає додатковим істотним фактором, що впливає на функцію перетворення АЛ і точність контролю масового вмісту пилу. Очевидно, що пропонуване використання шуму вимагає цілком визначеного співвідношення “імпульс - шум” (сигнал-шум) оптико-електронної схеми, що залежить від параметрів схеми АЛ. Тому шум схеми повинний бути попередньо мінімізований методами схемотехніки до рівня, що відповідає амплітуді імпульсів, що виникають від частинок, розміром порядку 8...15 мкм, що і дозволить регулювати їхній внесок за рахунок штучного усікання імпульсів.

Виявлена зміна характеру ослаблення світла частинками в області тонкого пилу теоретично доводить доцільність методу відсікання сигналу АЛ для забезпечення контролю, як маси загального пилу, так і грубої чи тонкої її фракції.

4.4. Висновки

1. Розташування частинок пилу в оптичному каналі реального абсорбційного лічильника по осі світлового пучка неоднозначно позначається на вимірюваних перетинах ослаблення світла і більш істотне для частинок

середніх розмірів, що, в основному, і визначають загальний масовий вміст пилу. Тому вимірювальний об'єм лічильника варто мінімізувати.

2. Обґрунтований той факт, що абсорбційний лічильник частинок АЛ виробляє імпульси, близькі до трикутних, амплітуда яких прямо пропорційна оптичному перетину кожної частинки, а тривалість імпульсу на рівні його підстави – швидкості її прольоту через поперечний переріз спрямованого пучка світла. Причому сумарна площа зареєстрованих за визначений проміжок часу імпульсів не залежить від швидкості аспірації частинок, що дозволило вимірювати їх концентрацію без урахування швидкості потоку, що аспірується.

3. Штучне відсікання підстави (нижньої частини) одержуваних в АЛ імпульсів дозволяє регулювати внесок тонкого пилу в показання вимірника запиленості і наблизити їх до величини, що пропорційна об'єму частинок, а не їх геометричному перетину, як у відомих абсорбційних схемах. При цьому відсікання реального сигналу АЛ приводить до часткового придушення паразитного шуму його електронної схеми. Наявність же частини шуму в сигналі АЛ впливає на функцію перетворення вимірника концентрації частинок в області тонкодисперсної фази аерозолі, дозволяючи зберегти інформацію про найбільш дрібні частинки, що опинилися нижче рівня відсікання. Тому оптимізація відсікання на рівні 0,7...0,95 величини середньоквадратичного значення фактичних шумів лічильника, порівнянних за амплітудою з імпульсами від найбільш дрібних частинок, забезпечує цілком достовірний контроль масового вмісту пилу (при урахуванні густини речовини пилу), причому при рівнях відсікання до 0,85 досить точно визначається вміст загальної маси пилу, а при більш високих – вміст його грубої фракції. Маса ж тонкого пилу можна визначити, як різницю загальної і грубої, без механічного поділу аерозолів.

5. РОЗРОБКА СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ЗАГАЛЬНОГО МАСОВОГО ВМІСТУ ПИЛУ В ПОВІТРІ НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО АБСОРБЦІЙНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЧАСТИНОК

5.1. Побудова функціональної та структурної схеми абсорбційного лічильника частинок (АЛ)

Виконані теоретичні дослідження ослаблення світла частинками дозволили сформулювати основні вимоги до побудови функціональної оптико-електронної схеми АЛ, призначеної для контролю запиленості в умовах гірничих виробок вугільних шахт, які зводяться до наступного:

- схема повинна забезпечити реєстрацію окремих частинок (у межах їх просторового виявлення) з наступною можливістю формувати інтегральні характеристики за рахунок обробки одержуваної від великої кількості частинок інформації;

- схема повинна базуватися на використанні мініатюрних оптико-електронних елементів, що дозволяють сформувати вимірювальний об'єм, достатній для виявлення окремих частинок, бажано без лінзової оптики, що вимагає юстирування;

- вихідний сигнал повинен бути у вигляді імпульсів, близьких до трикутної форми, які надалі можна коректувати (відтинати на необхідному рівні), накопичувати й аналізувати для одержання достовірної величини масового вмісту пилу;

- фотометрія запиленого середовища повинна проводитися з одночасною компенсацією можливого забруднення оптичного каналу аналізованим пилом при мінімальних спотворюваннях контрольованого запиленого середовища.

Вирішальним чинником при побудові функціональної схеми АЛ стала можливість компенсувати повільно мінливе забруднення оптичного каналу при одночасному виділенні імпульсів від частинок, які пролітають через оптичний канал лічильника, що й було реалізовано в практичній схемі, наведеній на рис. 5.1 (схема захищена патентом України [34]).

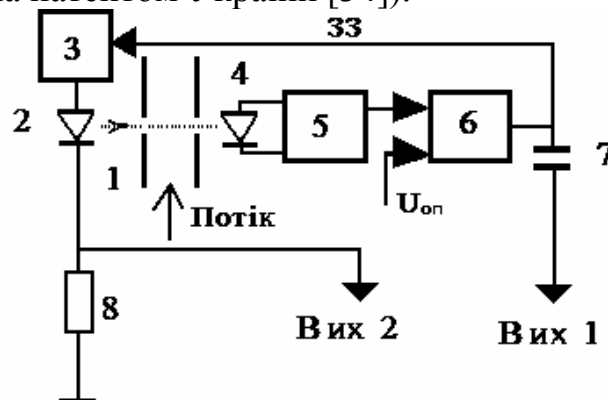


Рисунок 5.1 – Функціональна оптико-електронна схема АС: 1 – проточний вимірювальний канал; 2, 4 – елементи оптичної пари (світловий діод-фотодіод) з діафрагмами; 3-8 – елементи електронної схеми.

Вона виконана на основі абсорбційної фотометричної схеми із проточним вимірювальним каналом 1, через який проходить запилене повітря. У стінках каналу розміщені елементи оптичної пари 2 й 4 з діафрагмами для формування спрямованого світлового пучка невеликого перетину.

Електронна частина АЛ забезпечує формування на виході підсилювача 6 інформаційних імпульсів від частинок пилу, що пролітають, які реєструються на вих.1, а також стабілізацію спрямованого світлового пучка у вимірювальному об'ємі, за рахунок регулятора 3 струму світлового діода по ланцюгу зворотного зв'язку (33). При цьому струм світлового діода служить мірою забруднення оптичного каналу осілим пилом і контролюється на вих.2. Частота, амплітуда й тривалість сформованих електричних імпульсів однозначно пов'язані з концентрацією пилових частинок і швидкістю їх руху.

Аналіз запропонованої функціональної схеми показав, що вона являє собою вимірювальний тракт у вигляді підсилювача сигналу з широкою полосною, охопленого через оптико-електронний канал глибоким негативним зворотним зв'язком за постійним струмом, тобто працює як система автоматичної стабілізації інтенсивності спрямованого світлового пучка по збурюванню, що використовується для виділення короткочасних збурень, викликаних частинками, що пролітають. Структурна схема такої системи представлена на рис.5.2.

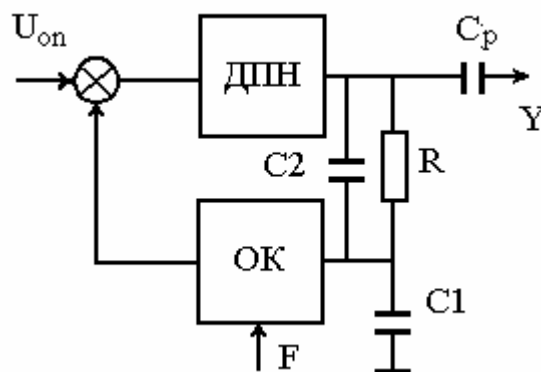


Рисунок 5.2 – Структурна схема АЛ: ДПН – диференціальний підсилювач напруги; ОК – оптичний канал; $U_{оп}$ – опорна напруга; R, C1 і C2 – елементи коригувальної ланки; C_p – розділовий конденсатор.

На вході ДПН порівнюються – $U_{оп}$, що задає рівень струму світлового діода, і вихідний сигнал з ОК – оптичного каналу, що містить на вході джерело світла зі схемою його регулювання, а на виході фотоприймач із перетворювачем фотоструму в напругу. Коригувальна RC-ланка забезпечує необхідну частотну характеристику схеми. Величина збурювання світлового пучка – F , перетвориться схемою у вихідну імпульсну напругу – Y . При цьому як збурювання F може виступати не тільки частинка що пролітає, але й осідаючий пил, а також імітатори частинок (електричний, механічний, оптичний), за допомогою яких можна перевіряти, калібрувати або градуювати вимірник, до складу якого входить запропонований АЛ.

Проліт досить великих частинок пилу через оптичний канал – ОК, викликає короткочасне зменшення світлового потоку, що надходить на

фотоприймач. При цьому напруга на ньому падає, а система стабілізації світлового потоку, за рахунок постійної часу інтегруючого ланцюжка R, C_1 , не встигає компенсувати короточасне збурювання від окремих частинок. Тому для коротких імпульсів глибина зворотного зв'язку – не велика. У результаті, на конденсаторі виділяються імпульси напруги, амплітуда яких залежить від геометричних параметрів частинок (переважно від їх перетину S_p) [36, 103].

При впливі повільно мінливих збурень, яким є поступове забруднення оптичних елементів осідаючим пилом, система автоматичної стабілізації світлового потоку завдяки вже глибокому зворотному зв'язку, підвищує струм, що протікає через джерело світла (світловий діод), компенсуючи забруднення.

5.2. Аналіз динамічних характеристик АЛ

Необхідність дослідження динамічних характеристик АЛ обумовлена цілим рядом причин. По-перше, потрібно встановити характер перетворення збурювання світлового потоку частинкою в електричний імпульс. По-друге, необхідно оцінити вплив на імпульси швидкості контрольованих запиленних потоків. По-третє, уточнити параметри коригувальної RC-ланки. При цьому важливо, щоб збурювання, внесені оптико-електронною схемою, були б мінімальними в необхідному частотному діапазоні.

Незважаючи на простоту системи (рис. 5.2), її теоретичний аналіз дещо утруднений, оскільки не можна точно задати ємнісні параметри схеми, через їхню малість, тому схема досліджувалася на макеті. Причому параметри коригувальної RC-ланки підбиралися для забезпечення сталої роботи системи стабілізації й скорочення часу перехідного процесу при збурюванні.

Дослідження проводилися по каналу «вхід (F) – вихід (Y)», кінцевою метою яких була побудова динамічної моделі АЛ у вигляді диференціального рівняння, одержання його загальних рішень у функції часу – $y = f(t)$ при різному збурюванні, а також ідентифікація параметрів рівняння.

Для визначення конкретного виду динамічної моделі АЛ його схема збурювалася по входу F східчастим й імпульсним сигналом. Збурювання світлового потоку імітувалися шляхом відповідного ослаблення струму джерела світла 2 (див. рис. 5.1), що здійснювалося електронними засобами за допомогою генератора каліброваних імпульсів. Спостереження проводилися осцилографом, що підключався до конденсатора C_p . Типовий вид осцилограм заднього фронту імпульсів схеми АЛ, наведений на рис. 5.3.

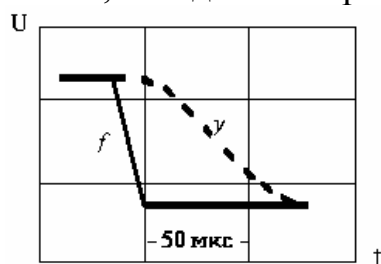


Рисунок 5.3 – Типовий вид заднього фронту імпульсів, одержуваних на вих. 1 АЛ (пунктирна лінія).

Характер спостережуваних фронтів імпульсу, що подається на вхід (f), й одержуваного імпульсу (y), дозволив вибрати як математичну модель перетворення імпульсного сигналу в АЛ диференціальне рівняння другого порядку із правою частиною виду

$$y'' + a_1 y' + a_0 y = b_1 f' + b_0 f, \quad y = y' = 0 \quad (5.1)$$

де $y'' = \frac{d^2 y}{dt^2}$ – друга похідна від y за часом; $y' = \frac{dy}{dt}$ і $f' = \frac{df}{dt}$ відповідно, перші похідні від y і f за часом; a_i і b_j – коефіцієнти моделі, що підлягають ідентифікації.

Ідентифікація проводилася по ряду пар експериментально отриманих значень y й f , відлічених з інтервалом в 5 мкс на осцилографі при дії заднього фронту імпульсного впливу f , які представлялися в нормованому виді в частках одиниці:

f	1,0	0,89	0,73	0,56	0,4	0,22	0,05	0	0	0	0	0	0	0
y	1,0	0,99	0,98	0,94	0,88	0,80	0,68	0,54	0,40	0,29	0,17	0,07	0,02	0,005

Коефіцієнти рівняння моделі обчислювалися за методом найменших квадратів [140, 141] на інтервалі часу від 0 до $T = 13 \times 5 = 65$ мкс, а їхні складові обчислювалися графічним способом.

У результаті ідентифікації модель визначена у вигляді

$$y'' + 106y' + 6020y = -13f' + 5570f. \quad (5.2)$$

Загальне рішення цього диференціального рівняння одержано з використанням перетворення Лапласа в операторній формі [142]

$$Y(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} F(s), \quad (5.3)$$

де $Y(s); F(s)$ – відповідно, оператори виходу й входу АЛ.

Оцінимо реакцію моделі на одиничний східчастий вплив, тобто на $f(t) = 1[t]$ (праворуч одинична функція) і на імпульсний вплив, при якому $f(t) = \delta[t]$ (праворуч «дельта-функція»).

Нехай $f(t) = 1[t]$. Зображення цієї функції $F(s) = \frac{1}{s}$ й у випадку $a^2 - 4a_0 < 0$, одержимо рішення

$$Y(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \cdot \frac{1}{s}. \quad (5.4)$$

Розкладемо дробовий функціонал в (5.4) на доданки. Одержимо вираз

$$Y(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \cdot \frac{1}{s} = \frac{b_1}{s^2 + a_1 s + a_0} + \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \cdot \frac{1}{s},$$

який показує, що шукане рішення може бути представлено двохранкомпонентною формулою

$$y(t) = \frac{b_1}{s^2 + a_1 s + a_0} \cdot \delta[t] + \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \cdot 1[t]. \quad (5.5)$$

Аналіз формули (5.5) показує, що процес його рішення можна представити структурною схемою, наведеною на рис.5.4.

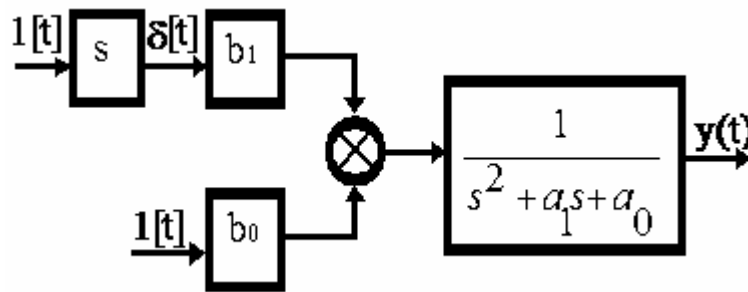


Рисунок 5.4 – Реакція схеми на одиничний східчастий вплив.

У результаті, реакцію моделі (5.1) на східчасте збурювання можна визначити як суму реакцій ланки $\frac{1}{s^2 + a_1 s + a_0}$ на одиничні імпульсний й східчастий впливи з наступним урахуванням відповідних коефіцієнтів b_1 й b_0 .

Реакція згаданої ланки на імпульсну функцію $\delta[t]$, з урахуванням того, що для неї зображення $F(s) = 1$, має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{1}{s^2 + a_1 s + a_0} &= \frac{1}{\left[s^2 + 2s \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1}{2} \right)^2 \right] + \left[a_0 - \left(\frac{a_1}{2} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{\omega}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} \cdot \frac{1}{\omega} \Rightarrow \frac{1}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \end{aligned} \quad (5.6)$$

де $\alpha = \frac{a_1}{2}$, $\omega = \sqrt{a_0 - \frac{a_1^2}{4}}$, а після знака \Rightarrow потрібний оригінал попередньої операторної функції, обраний з таблиць зображень функцій по Лапласу.

Реакцію тієї ж ланки на одиничний східчастий вплив $-1[t]$ одержимо перетворенням

$$\begin{aligned} \frac{1}{s^2 + a_1 s + a_0} \cdot \frac{1}{s} &= \frac{As + B}{s^2 + a_1 s + a_0} + \frac{C}{s} = \frac{As^2 + Bs + Cs^2 + Ca_1 s + Ca_0}{(s^2 + a_1 s + a_0)s} = \\ &= \frac{(A + C)s^2 + (B + Ca_1)s + Ca_0}{(s^2 + a_1 s + a_0)s} \end{aligned} \quad (5.7)$$

звідки

$$\begin{cases} A + C = 0 \\ B + Ca_1 = 0 \\ Ca_0 = 1 \end{cases} \quad \text{и.} \quad A = -\frac{1}{a_0}; B = -\frac{a_1}{a_0}; C = \frac{1}{a_0}$$

Тепер, коли у виразі (5.7) визначені коефіцієнти, його можна перетворити інакше, використовуючи визначені вище α й ω , і далі перейти від зображення до оригіналів функцій

$$\begin{aligned} \frac{As + B}{s^2 + a_1 s + a_0} + \frac{C}{s} &= \frac{As + A\alpha - A\alpha + B}{s^2 + a_1 s + a_0} + \frac{C}{s} = \frac{A(s + \alpha) + (B - A\alpha)}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{C}{s} = \\ &= \frac{A(s + \alpha)}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{(B - A\alpha)}{\omega} \times \frac{\omega}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{C}{s} \Rightarrow \\ &\Rightarrow -\frac{1}{a_0} e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{-\frac{a_1}{a_0} + \frac{1}{a_0} \alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t + \frac{1}{a_0}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Зведемо знайдені компоненти (5.7) і (5.8), згідно з (5.6)

$$\begin{aligned} y(t) &= b_1 \frac{1}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t - \\ &- b_0 \frac{1}{a_0} e^{-\alpha t} \cos \omega t + b_0 \frac{-\frac{a_1}{a_0} + \frac{1}{a_0} \alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t + b_0 \frac{1}{a_0}. \end{aligned}$$

Остаточно одержимо рішення рівняння (5.1) або перехідну функцію АЛ при східчастому збурюванні у вигляді

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} - \frac{b_0}{a_0} e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{b_1 - a_1 \frac{b_0}{a_0} \alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t. \quad (5.9)$$

Визначимо тепер реакцію (5.1) на імпульсний вплив. У цьому випадку, як указувалося, $f(t) = \delta[t]$, $F(s) = 1$, а рішення в операторній формі має вигляд

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{b_1(s + \alpha) + (b_0 - b_1 \alpha)}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} = \\ &= \frac{b_1(s + \alpha)}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{(b_0 - b_1 \alpha)}{\omega} \times \frac{\omega}{(s + \alpha)^2 + \omega^2}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Перейшовши від зображень до оригіналів, одержимо рішення вихідного рівняння для ідеального імпульсного впливу

$$y(t) = b_1 e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{b_0 - b_1 \alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t. \quad (5.11)$$

Використовуючи отримані вирази (5.9) і (5.11), оцінимо на ідентифікованій моделі (5.2) збурювання, що вносить схема вимірювального каналу оптичного лічильника частинок.

Нижче на рис. 5.5 представлений графік перехідного процесу при одиничному східчастому збурюванні по постійному струмові, тобто до розділового конденсатора C_p .

Як бачимо, вихідний сигнал досяг одиничної величини за час близько 60 мкс, що погоджується з експериментальними даними, наведеними вище, тому можна вважати, що отримана модель (5.1) і її окремий випадок (5.2) адекватні запропонованій схемі АЛ і можуть бути використані при його подальших дослідженнях, конструюванні й коректуванні.

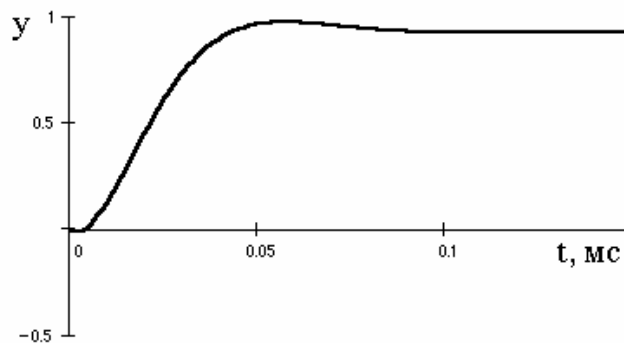


Рисунок 5.5 – Графік перехідного процесу в моделі (5.2) при одиничному східчастому збурюванні

Повний час перехідного процесу при східчастому впливі оцінюється величиною 90 мкс, який можна вважати мінімальним часом для виявлення задніх фронтів імпульсів, що виникають від окремих частинок.

Таким чином, для ефективного виявлення частинок пилу, часовий проміжок між надходженням у робочий світловий пучок АЛ нової частинки й виходом з нього попередньої не повинен перевищувати згаданої величини. Цей показник можна використати при оцінці граничної концентрації контрольованого пилу й швидкості пропускання його через вимірювальний канал АЛ.

Характер перехідного процесу $y = f(t)$ при імпульсному збурюванні представлений на рис. 5.6.

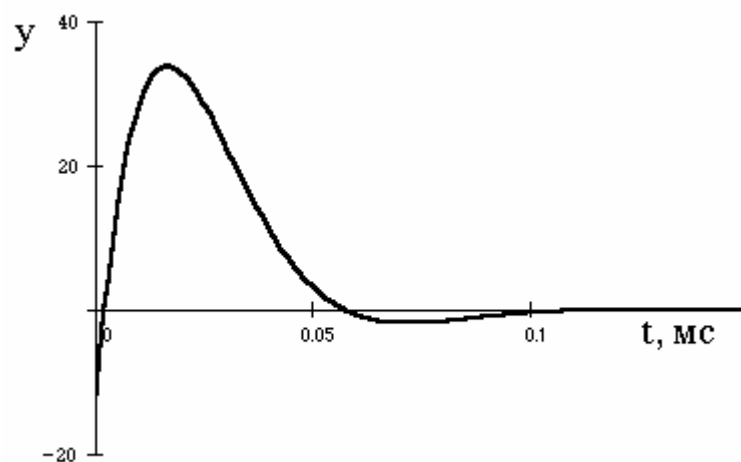


Рисунок 5.6 – Графік перехідного процесу моделі (3.21) при одиничному імпульсному збурюванні

Представлена залежність характеризує спотворення, внесені схемою АЛ у фактичний імпульс ослаблення світлового потоку частинкою пилу по його передньому й задньому фронтах. Так, при детектуванні позитивної напівхвилі фактичний імпульс розшириться на величину близько 55 мкс. Це становить приблизно 25% від реальної тривалості електричного імпульсу, що спостерігається при прольоті досить великої частинки пилу через оптичний канал датчика зі швидкістю 4–7 м/с.

Характер перехідного процесу підтверджує зроблене вище припущення про перетворення прямокутного імпульсу, що збурює, у реальний, позитивний викид якого близький до трикутного. Наявність негативного викиду обумовлений коливальними властивостями електронної схеми АЛ, а його амплітуда ступенем демпфірування цих коливань. Мінімізувати негативний викид сигналу можна підбором параметрів R , $C1$ і $C2$ коригувальні ланки, наведеній на рис.5.2.

Отримана математична модель АЛ може бути використана для його наступного проектування. Вона дозволяє оперативно оцінювати вплив змін

параметрів схеми, а також проаналізувати й інші важливі її характеристики, наприклад, частотну характеристику, вибрати параметри коригувальної RC ланки, істотно скоротивши етап макетування схеми АЛ.

Збурювання, що вносить схема АЛ, можна оцінити також шляхом рішення рівняння вільної системи, тобто, дорівнявши праву частину рівняння (5.2) нулю. Одержимо

$$y'' + 106y' + 6020y = 0. \quad (5.12)$$

Це рівняння має аналітичне рішення у вигляді функції [140]

$$y = e^{-53t} (\cos 58t + 0,91 \sin 58t), \quad (5.13)$$

графік якої наведений на рис. 5.7.

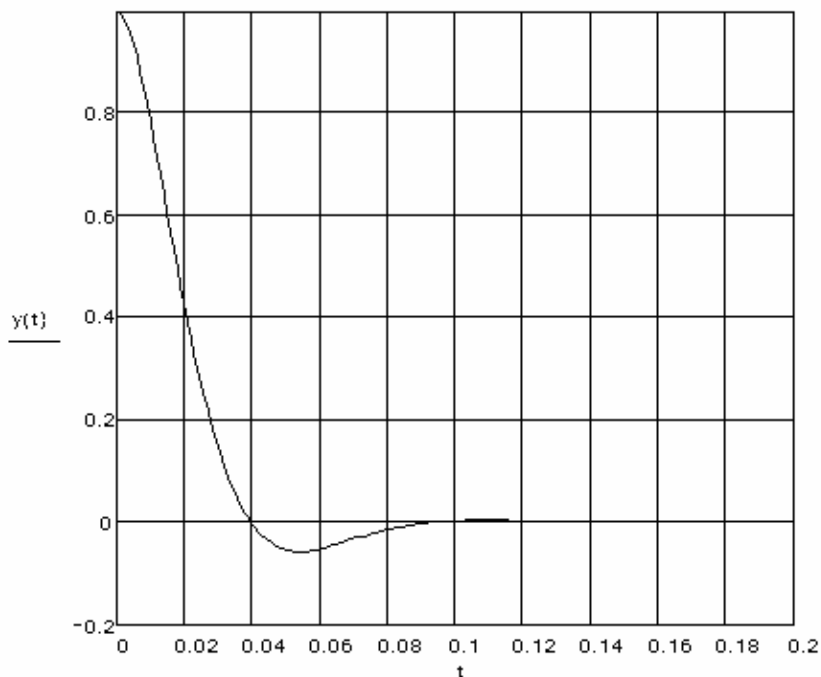


Рисунок 5.7 – Графік переходного процесу вільної системи, отриманий в Machcad (по осі абсцис час відкладений у мс)

Тривалість переходного процесу для вільної системи склала близько 35 мкс, що погоджується з рішенням, наведеним на рис 5.6 й експериментальними даними. Це ще раз підтверджує адекватність моделі (5.2) і вона може бути використана при подальших дослідженнях і проектуванні АЛ.

5.3. Компонування вимірника вмісту загальної маси пилу, що витає в повітрі, на основі АЛ

Для реалізації контролю запиленості повітря розробленим на основі абсорбційного лічильника методом необхідно виконати:

- реєстрацію частинок пилу запропонованим АЛ;
- обробку (відсічення) імпульсного електричного сигналу АЛ, його інтегрування й компенсацію частини шуму;

- урахування густини речовини й формування показань, що відповідають вмісту загальної маси пилу, що витає в повітрі.

Перераховані процедури визначають компоновання функціональної схеми вимірника масового вмісту пилу в повітрі гірничих виробок, що наведена на рис. 5.8.

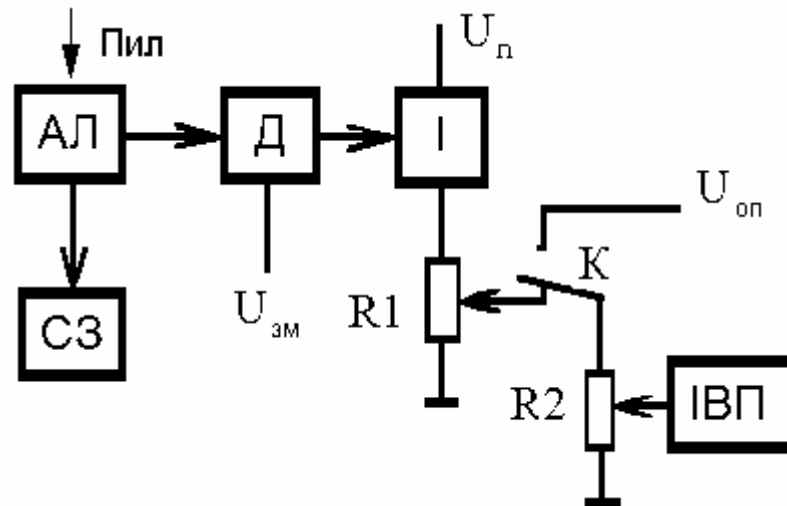


Рисунок 5.8 – Функціональна схема вимірника вмісту загальної маси пилу: АЛ – абсорбційний лічильник частинок пилу; СЗ – сигналізатор забруднення оптичного каналу; Д – детектор з керованим відсіченням сигналу на рівні $U_{зм}$; І – інтегратор; R1 – резистор керування коефіцієнтом перетворення схеми; R2 – резистор установлення густини речовини контрольованого пилу; К – ключ переведення схеми з режиму виміру в режим установлення густини речовини пилу; U_n й $U_{оп}$ – джерела опорної напруги; ІВП – цифровий індикатор масового вмісту пилу.

Розглянемо роботу схеми. Як первинний перетворювач виступає АЛ, що забезпечує виконання першої процедури, тобто реєстрацію частинок пилу, що витають. Його робота розглядалася вище.

З виходу АЛ імпульси, що виникають при прольоті частинок через вимірювальний канал, надходять на детектор Д, яким служить прецизійний випрямляч середнього значення імпульсної напруги з інтегратором І. Ця частина схеми реалізує другу процедуру. Вона забезпечує обробку (усічення) імпульсного електричного сигналу, що виникає від частинок пилу, що пролітають, і його інтегрування з наступним накопиченням сигналу, пропорційного площі усічених імпульсів.

Особливістю схеми, що реалізує запропонований принцип відсічення нижньої частини імпульсів, є можливість керування рівнем детектування за допомогою напруги зміщення – $U_{зм}$, що визначає ту частину сигналу АЛ, яка буде накопичуватися інтегратором І.

Як показано раніше, можна відігнути шум на рівнях, що задають у частках його середньоквадратичного значення – ”сигма”. При цьому необхідно визначити фактичне його значення. На практиці для цього досить визначити

вольтметром напругу на виході детектора Д при відсутності напруги зміщення ($U_{зм} = 0$) і частинок пилу у вимірювальному каналі АЛ, що буде відповідати середньому ефективному значенню змінного шумового сигналу й складе близько 70 % середньої амплітуди шуму. Цю величину можна вважати приблизно рівною одному середньоквадратичному відхиленню шумової функції ("1 сигма") при нормальному законі її розподілу (див. рис. 4.4, 4.5.) і використати при настроюванні необхідного рівня $U_{зм}$. При цьому варто мати на увазі, що частина шуму потрапить на вхід інтегратора й буде спотворювати фактичні показання концентрації пилу, тому ця частина шуму повинна бути виключена вирахуванням з сигналу ІВП. Із цією метою інтегратор зміщається постійною напругою U_n , протилежною за знаком шумовому сигналу. У практичній схемі величина U_n саме й визначає частку шуму, що повинна бути присутня у загальному вихідному сигналі, а регулюванням $U_{зм}$ виконується установкою нуля показань ІВП при відсутності пилу.

Реалізація наступної процедури, що зводиться до урахування густини речовини пилу й формуванню показань, що відповідають вмісту загальної маси пилу, що витає в повітрі, забезпечуються елементами схеми: R1, R2, К та ІВП. При цьому резистор R1 служить для управління коефіцієнтом перетворення схеми АЛ пасивним способом негативного регулювання, тобто шляхом ослаблення в потрібному ступені сигналу, наявного на виході інтегратора І. Використовується резистор R1 при градуюванні вимірника запиленості після встановлення відповідності фактичної концентрації пилу отриманому електричному сигналу ІВП. Інші компоненти схеми необхідні для урахування густини речовини пилу за апріорним даними відповідно до методу, запропонованому раніше, з почерговим відображення на табло ІВП або встановленої густини речовини пилу, або контрольованого значення запиленості.

Вибір необхідного режиму здійснюється ключем К. Так, у режимі установки густини речовини пилу переводять ключ К з нормально замкнутого стану, що відповідає режиму виміру, у верхнє на рис. 5.7 положення. У результаті цього, на резистор R2 надходить опорна напруга U_{on} . Зміною положення потенціометра R2 домагаються на цифровому табло ІВП показань, які б дорівнювали необхідній густині речовини пилу, наприклад 1300 кг/м^3 , що характерна для вугільного пилу. Примітно, що верхнє за схемою положення движка R2 буде відповідати максимально можливій густині при обраній опорній напрузі U_{on} .

Як установлене раніше, максимальне значення густини речовини промислового пилу може перевищувати 9000 кг/м^3 , тому верхню межу вибирають залежно від того, який пил буде контролюватися. Так, для вуглепородного пилу максимум густини його речовини може становити $2500\text{-}3000 \text{ кг/м}^3$.

Послу установки необхідної густини речовини пилу переводять схему ключем К у режим виміру концентрації. При цьому подальше урахування густини буде виконуватися автоматично за рахунок того, що резистор R2

виступає як аналоговий дільник максимального значення густини речовини пилю на встановлене. У результаті, коефіцієнт передачі схеми буде прямо пропорційний прийнятому значенню густини речовини пилю, тобто, чим вище значення встановленої густини, тим вище й коефіцієнт передачі схеми. Запропонований спосіб урахування густини речовини пилю за апіорним даними реалізований у промисловому зразку приладу [103].

5.4. Методи й засоби перевірки працездатності та метрологічних характеристик засобів контролю запиленості, що базуються на АЛ

Згідно з запропонованим лічильно-інтегральним методом, абсолютні значення величини ослаблення робочого світлового потоку при контролі вмісту пилю безпосередньо не використовуються, але ставляться у відповідність фактичній концентрації пилю в повітрі, що вимагає обов'язкового градуювання запропонованих засобів контролю вмісту пилю шляхом порівняння з даними про запиленість повітря, отриманими стандартизованим методом або іншим еталонним засобом. Після градуювання потрібна перевірка його збереження під час експлуатації робочих приладів. Таким чином, для практичного використання оптичного вимірника запиленості потрібно виконувати наступні операції:

- градуювання вимірника на типовому пилю в гравіметричних показниках, мг/м³;
- регулярна оперативна перевірка оптико-електронного тракту вимірника, яку доцільно здійснювати електричним шляхом;
- періодична перевірка приладу в запиленій атмосфері (на пиловому стенді чи у виробничих умовах) або за допомогою імітатора пилю.

5.4.1. Типова схема градуювання

У зв'язку з відсутністю стандартизованих непрямих засобів виміру вмісту пилю, як зразковий (еталонний) при градуюванні приймається гравіметричний метод з відбором проб запиленого повітря на фільтри. При цьому градуювання може проводитися на місці реальної експлуатації, зокрема безпосередньо у гірничих виробках, або на пиловому стенді. Звичайно, гравіметричний метод теж не є ідеальним і вносить свою похибку в результати вимірів запиленості, яку можна мінімізувати відповідним плануванням й обробкою результатів вимірів [143].

Оцінимо граничну погрішність гравіметричного методу для визначення можливості реалізації градуювання на практиці. Вона складається із суми не виключених систематичної й випадкової погрішності [144]. При цьому систематичні погрішності обумовлені:

- погрішністю відбору проб запиленого повітря на фільтр;
- погрішністю зважування фільтра на аналітичних вагах.

У свою чергу погрішність відбору проб повітря θ_{np} обумовлена:

- погрішністю аспіратора (його ротаметра) (θ_a);
- погрішністю секундоміра (θ_c);
- погрішністю виміру температури повітря, що обчислюють за формулою

$$\theta_T = \frac{\theta_{мер} \cdot 100}{273 + t_n}, \quad (5.14)$$

де $\theta_{мер}$ – погрішність термометра, °C; t_n – температура повітря, °C;

- погрішністю виміру атмосферного тиску, що обчислюють за формулою

$$\theta_p = \frac{\theta_\sigma \cdot 100}{p}, \quad (5.15)$$

де θ_σ – погрішність барометра, мм; p – тиск атмосфери, мм.рт.ст. (кПа).

Насамкінець, погрішність відбору проб повітря розраховують за формулою

$$\theta_{np} = \sqrt{\theta_a^2 + \theta_c^2 + \theta_T^2 + \theta_p^2}. \quad (5.16)$$

Отже оцінимо погрішність θ_{np} при типових значеннях її складових:

$\theta_a = 4\%$, $\theta_c = 0,5\%$; $\theta_{мер} = \pm 0,5\%^\circ C$; $t_n = 20^\circ C$; $\theta_\sigma = \pm 0,5$ мм; $p = 760$ мм (101,3 кПа). Вона складе

$$\theta_{np} = \sqrt{4^2 + 0,5^2 + 0,17^2 + 0,07^2} = 4,04\%.$$

Як бачимо, θ_{np} визначається в основному погрішністю ротаметра, що контролює об'єм протягнутого через аерозольні фільтри повітря.

Погрішність зважування проби пилу на аналітичних вагах оцінюється величиною

$$\theta_\sigma = \frac{2 \cdot \theta_{ваг} \cdot 100}{\Delta m}, \quad (5.17)$$

де $\theta_{ваг}$ – погрішність ваг, мг; Δm – маса пилового осаду на фільтрі, мг.

Так, при погрішності ваг $\theta_{ваг} = 0,1$ мг і мінімальному прирості ваги фільтра в 1 мг

$$\theta_\sigma = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 100}{5} = 4\%.$$

Тепер оцінимо границю суми не виключених систематичних погрішностей за формулою

$$\theta_z = K \sqrt{\Sigma \theta_i^2}, \quad (5.18)$$

де K – коефіцієнт, обумовлений необхідною довірчою ймовірністю (при довірчій імовірності 0,95 $K = 1,1$), а $\Sigma\theta_i^2 = \theta_{np}^2 + \theta_e^2$ – для гравіметричного методу.

Таким чином, оцінка погрішності гравіметричного методу складе

$$\theta_2 = 1,1\sqrt{4,04^2 + 4,0^2} = 5,7 \approx 6\%.$$

У зв'язку з тим, що підтримка постійної концентрації пилу в повітрі при градуванні протягом серії вимірів не завжди можлива, то виникає додаткова випадкова погрішність, оцінка якої утруднена або навіть неможлива. Тому при градуванні й перевірці випадкову погрішність виключають або знижують до мінімуму шляхом збільшення числа спостережень та усереднення результатів спостережень.

Як бачимо, погрішність гравіметричного методу визначається в основному не виключеною складовою систематичної погрішності, що оцінюється величиною $\pm 6\%$ і може бути при необхідності знижена до $\approx 4\%$ у випадку використання замість ротаметра (погрішність 4%) вимірної діафрагми, каліброваної з погрішністю 1% , а також збільшенням маси пилового осаду на фільтрі вище 5 мг . Це дозволяє використати гравіметричний метод як зразковий (еталонний) метод для перевірки засобів контролю, заснованих на непрямому оптичному методі, із границею погрішності 25% , передбаченою вимогами стандарту до повітря робочої зони.

При цьому метрологічний запас складе $4-6$, що дозволяє розраховувати на не перевищення границі погрішності для оптичного методу, що при порівняльній схемі градування складе: $25 - 6 = 19\%$.

Градування пропонується проводити за порівняльною схемою (рис. 5.9), на одному або декількох видах пилу.

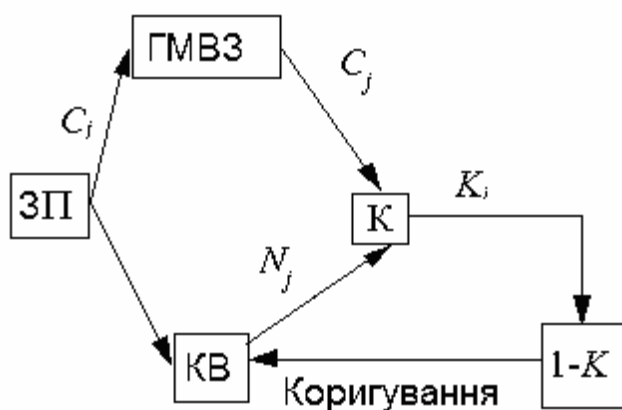


Рисунок 5.9 – Схема градування: ЗП – запилене повітря або пилоповітряний потік; C_i – концентрація пилу, створювана у камері, $\text{мг}/\text{м}^3$; ГМВЗ – гравіметричний метод виміру запыленості; C_j – концентрація пилу, визначена за допомогою ГМВЗ, $\text{мг}/\text{м}^3$; КВ – вимірник, що калібрують (градуують); N_j – концентрація відповідно показань КВ; $K_j = N_j / C_j$ – відносне показання КВ; K – середнє значення відносної концентрації після серії дослідів

Виміри, як відзначалося, можуть проводитися в умовах реальної промислової експлуатації або у пиловій камері (пиловому стенді), де створюється запилене повітряне середовище або пило-повітряний потік з концентрацією пилу \tilde{C} в необхідному діапазоні, що одночасно вимірюється ГМВЗ і КВ. Результати вимірів зіставляють, а потім коректують чутливість КВ на величину $\Delta = 1-K$, після чого КВ вважають градуїованим у гравіметричних показниках. При цьому показання КВ з погрішністю градуювання будуть збігатися з дійсним значенням концентрації пилу.

Слід зазначити, що розглянута методика градуювання передбачає ізокінетичний відбір проб запиленого повітря на аерозольні фільтри при низьких швидкостях контрольованого потоку ($< 2-3$ м/с), коли погрішність відбору проби визначається в основному погрішністю ротаметра або вимірної діафрагми. При високих же швидкостях потоку запиленого повітря, коли можливе порушення ізокінетичності, а також при відборі проб у місцях експлуатації, де складно визначити напрямок потоку, треба забезпечити ізокінетичність відбору, тобто рівність швидкості потоку швидкості аспірації повітря на фільтр.

5.4.2. Оперативна перевірка оптико-електронної схеми АЛ

У відомих лічильниках аерозольних частинок, наприклад АЗ–2М [40], що являє собою стаціонарний електронно-оптичний прилад для контролю вмісту частинок пилу в повітрі, передбачена досить складна оптико-механічна система контролю стану схеми. Ця система формує калібровані імпульси шляхом збурювання робочого світлового потоку диском спеціальної форми з отворами, що обертається за допомогою електродвигуна. Система має низьку надійність через наявність оптичних і механічних елементів, а тому не може бути використана при роботі в умовах гірничих підприємств.

Аналіз функціональної схеми запропонованого АЛ, а також результати дослідження його динамічних характеристик дозволили запропонувати відносно простий спосіб періодичної перевірки його вимірювального тракту (рис.5.10), захищений патентом України [61].

Технічне рішення полягає в тому, що в схему лічильника уведений електронний ключ 12, приєднаний паралельно джерелу світла, а також керований генератор імпульсів 11, вихід якого приєднаний до керуючого ланцюга електронного ключа, а вхід підключений паралельно резистору 10, що слугує датчиком електричного струму джерела світла 2. При цьому блок 8 сигналізує про вміст пилу в повітрі, а блок 9 – про величину забруднення оптичного каналу. Така схема дозволяє збудити в схемі імпульси, подібні до імпульсів від великих частинок пилу, причому їхня амплітуда на виході електронної схеми не буде залежати від струму через джерело світла 2, що зростає при забрудненні оптичного каналу. Це досягається тим, що частота імпульсів генератора 11 управляється напругою, що падає на резисторі 10. Таким чином, ослаблення світла у вимірювальному каналі від забруднення останнього компенсується збільшенням частоти генератора 11, що забезпечує

підтримку каліброваного сигналу стабільним у межах компенсаторних можливостей ланцюга стабілізації спрямованого світлового потоку в АЛ.

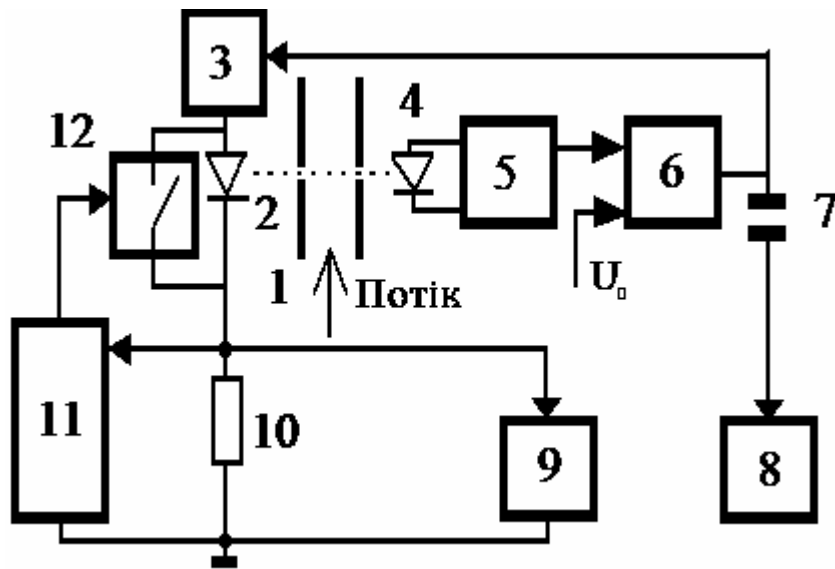


Рисунок 5.10 – Функціональна схема вимірника запиленості з елементами калібрування штучними електричними імпульсами

Реалізація запропонованого способу передбачає введення додаткового режиму перевірки стану схеми. Причому при вимірах вмісту пилу електронний ключ 12 розімкнутий, а живлення генератора 11 відключене, а схема працює в режимі вимірювання концентрації пилу.

У режимі ж перевірки АЛ подають живлення на генератор 11, що починає генерувати короткі імпульси. Вони приводять до періодичного замикання ключа 12, від чого короткочасно знижується струм через напівпровідникове джерело світла 2, а тому й світловий потік в оптичному каналі, аналогічно впливу частинок пилу. У результаті, у схемі АЛ утворюються штучні калібровані імпульси напруги, які надходять у сигналізатор 8, що формує відповідний сигнал. Рівень останнього характеризує ступінь перетворення збурень світлового потоку в електричний сигнал, тобто визначає коефіцієнт перетворення всього вимірювального тракту приладу, а вихід сигналу за припустимі межі вкаже на порушення в схемі, які підлягають усуненню, наприклад шляхом, регулювання або очищення каналу АЛ, що забруднився вище припустимого рівня.

Тривалість каліброваних імпульсів може бути різною, але порівнянна із тривалістю імпульсів, що виникають від частинок пилу. Це обумовлено параметрами конденсатора $C7$, що повинен однаково пропускати й робчі й калібровані імпульси.

Теоретична реакція схеми АЛ на східчастий вплив за постійним струмом наведена на рис. 5.5. Якщо пропустити такий сигнал через конденсатор $C7$, одержимо реакцію на східчає збурювання за змінним струмом. Перевірка реакції була виконана на експериментальному зразку схеми АЛ. Отримана осцилограма має вигляд, представлений на рис. 5.11.

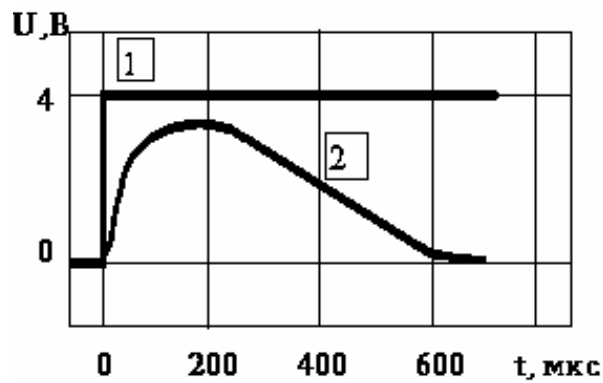


Рисунок 5.11 – Перехідний процес в АЛ за змінним струмом при східчастому збурюванні схеми: 1 – східчасте збурювання; 2 – крива перехідного процесу.

Як бачимо, при східчастому збурюванні світлового потоку сигнал АЛ за змінним струмом повертається у вихідний стан за час близько 600 мкс із характерним максимумом в області 100 – 200 мкс. Цю область можна вважати максимальною для тривалості каліброваного імпульсу при обраних параметрах коригувальної ланки, $R=3,9$ кОм, $C1=3,3$ мкф і $C2=0,1$ мкф, наведеній на рис.5.2.

Далі простежимо зміни реальних імпульсів при зменшенні тривалості імпульсу 1, що подається від генератора 11 (рис.5.12).

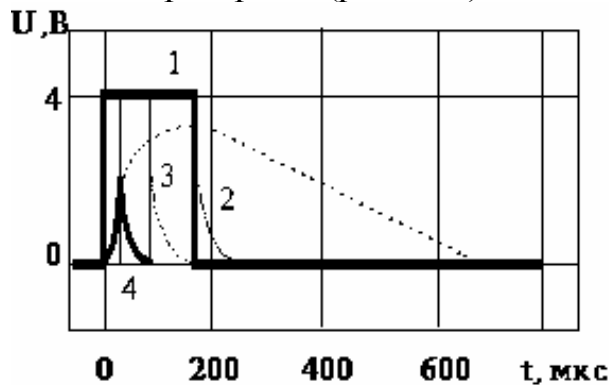


Рисунок 5.12 – Зміна реальних імпульсів в АЛ, відповідно 2, 3, 4, при зменшенні тривалості прямокутного імпульсу 1, що подається від генератора

Як бачимо на рис. 5.12, амплітуда реального імпульсу 2 при подачі прямокутного імпульсу тривалістю близько 160 мкс, через наявність зворотного зв'язку уже не може бути вище. Подальше підвищення тривалості обумовить поступове зниження рівня сигналу. Зменшення ж тривалості каліброваного імпульсу приведе до зниження його реальної амплітуди (імпульси 3 й 4), що дозволяє при одній і тій же частоті проходження імпульсів імітувати частинки різних розмірів. При цьому імпульс стає близьким до трикутного (імпульс 4). Таким чином, тривалість каліброваних імпульсів, що використовуються для перевірки схеми, рекомендується вибирати в області зростання кривої перехідного процесу в АЛ при східчастому збурюванні. У нашому випадку, у діапазоні приблизно до 200 мкс. При цьому варто ще орієнтуватися й на

одержуваний вихідний сигнал блоку 8, що має відповідати середині діапазону контрольованих концентрацій пилу, наприклад концентрації пилу в 100 мг/м^3 . Тоді щораз при перевірці приладу від каліброваного генератора повинні формуватися показання, наприклад у межах 100 ± 10 . При цьому вихід показань за зазначені межі вкаже на неприпустимі порушення в схемі АЛ, що повинні виключатися шляхом переналагоджування приладу.

5.4.3. Методи й засоби періодичної перевірки

Періодичну перевірку метрологічних характеристик або працездатності засобів контролю, виконаних на базі АЛ, можна здійснити як з використанням пилу, так і за допомогою його імітаторів. У першому випадку перевірка здійснюється так само, як і при первинному градуванні за розглянутою вище порівняльною схемою. До недоліків такого методу варто віднести його високу трудомісткість. У другому випадку, що є значно менш трудомістким, використовують імітатори пилу, одним із яких можна вважати розглянутий вище електричний генератор, що моделює проліт частинки шляхом створення штучних електричних імпульсів. Однак більше природним для АЛ є імітація частинки, що рухається, наприклад, ниткою, що короткочасно рухається в оптичному каналі АЛ, з певною частотою перетинаючи робочий світловий потік у тому ж місці, де звичайно пролітають частинки пилу.

Схема механічного імітатора великих частинок зі зворотно-поступальним рухом каліброваної по діаметру нитки наведена на рис.5.13.

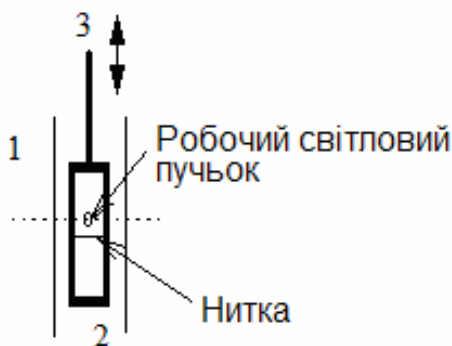


Рисунок 5.13 – Механічний імітатор частинок пилу зі зворотно-поступальним рухом каліброваної по діаметрі нитки: 1 – впускний патрубок лічильника; 2 – рамка з натягнутою посередині ниткою; 3 – приводний шток рамки.

Працює імітатор у такий спосіб. Легка металева рамка з ниткою 2 через шток 3 приводиться у зворотно-поступальний рух електромагнітною системою динамічного гучномовця, що збуджується від звукового генератора з регульованою частотою 80 – 300 Гц. При цьому калібрована нитка, що виконана зі скловолокна діаметром близько 5 мкм, періодично перетинає робочий світловий потік, викликаючи його збурювання, подібно великій частинці пилу. У результаті, виникає імпульс, як при прямому, так і зворотному ході штока 3. Підбором частоти й амплітуди коливань рамки з ниткою були

отримані стійкі імпульси тривалістю від 0,1 до 5 мс різної амплітуди, форма яких аналогічна імпульсам від частинок пилу розміром більше 25 - 30 мкм. При цьому вдавалося імітувати в АЛ концентрації пилу приблизно від 15 до 1200 мг/м³. До недоліків такої системи можна віднести наявність механічних елементів, що рухаються, і складність закріплення тонкої нитки на рамці.

Як альтернатива механічному імітаторові був запропонований оптико-електронний імітатор пилу, що імітує проліт частки в АЛ за рахунок освітлення короткочасними імпульсами (стробами) певної частоти пластинки з молочного скла, що поміщається при перевірці на шляху робочого світлового потоку АЛ. Схема такого імітатора наведена на рис.5.14.

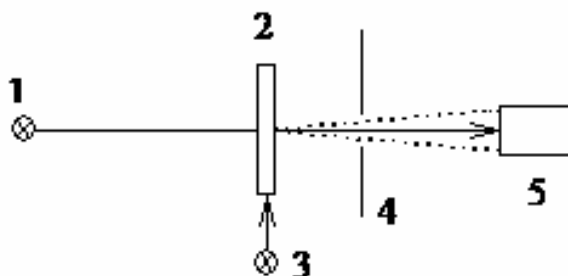


Рисунок 5.14 – Схема оптико-електронної імітації частинок пилу, що пролітають: 1, 4, 5 – відповідно, джерело робочого світлового пучка, точкова діафрагма діаметром 0,6-0,8 мм й фотоприймач АЛ; 2 – пластина з оптичного молочного скла; 3 – імпульсне джерело підсвічування імітатора.

Принцип роботи запропонованої імітації заснований на короткочасному збурюванні робочого світлового потоку АЛ короткими оптичними імпульсами (стробами), що подаються від напівпровідникового джерела світла 3, розміщеного у торці пластини 2, виконаної з молочного скла із включеннями дрібних частинок оксиду кальцію, зокрема МС-13 [145]. При цьому можливі два варіанти роботи імітатора.

У першому випадку частинки, що перебувають у товщі молочного скла, висвітлюються короткочасно, створюючи імпульс розсіювання в напрямку фотоприймача в конусі, обмеженому на рис. 5.14 пунктирними лініями. Цей імпульс розсіювання викликає короткочасне зростання світлового потоку на фотоприймачі, що й створює ефект прольоту частинки.

У другому випадку, одержання більше природного для АЛ ефекту короткочасного ослаблення спрямованого світлового пучка (як від частинки, що пролітає) досягається короткочасним знеструмленням джерела світла 3, включеним на постійне світіння (затемнюючий строб).

В обох випадках запропонований імітатор являє собою окремий пристрій, що встановлюється у відбірному патрубку АЛ при перевірці його працездатності та визначенні метрологічних параметрів. Причому при відсутності стробуючих імпульсів молочне скло створює ефект забруднення оптичного каналу лічильника, що в АЛ компенсується системою стабілізації спрямованого світлового пучка. Тому товщина й мутність молочного скла вибиралася з такою умовою, щоб не викликати надмірного ослаблення спрямованого світлового пучка. Так, пластина зі скла марки МС-13 товщиною

2 мм, викликала ослаблення світлового потоку в АЛ приблизно на 15%, що компенсувалося системою стабілізації АЛ як забруднення оптичного каналу.

Достоїнство такого імітатора полягає в тому, що він не має механічних частин, що рухаються, і дозволяє формувати стабільні імпульси необхідної, частоти, тривалості й амплітуди, порівнянні з реальними, що утворюються частинками пилу, що пролітають через АЛ.

5.5. Висновки

1. Розроблена функціональна схема абсорбційного лічильника зі стабілізацією інтенсивності спрямованого світлового потоку в його каналі забезпечує формування інформаційних імпульсів від частинок пилу, частота, амплітуда й тривалість яких однозначно пов'язані з їх концентрацією і швидкістю руху, а також компенсацію забруднення оптичного каналу осілим пилом. Отримана математична модель лічильника у вигляді диференціального рівняння другого порядку дозволяє оперативно оцінювати вплив змін параметрів схеми, а також аналізувати інші характеристики, що необхідні при проектуванні.

2. Функціональна схема розробленого вимірника вмісту пилу на основі абсорбційного лічильника забезпечує: реєстрацію частинок пилу з наступним формуванням електричних імпульсів; відсічення їх нижньої частини на рівні, обумовленому параметрами шуму; накопичення електричного сигналу, пропорційного площі імпульсів за обраний проміжок часу; компенсацію присутньої в сигналі частини шуму установкою нуля, а також автоматичне урахування густини речовини пилу після її завдання за апріорним даними та формування показань, що відповідають вмісту загальної маси пилу в повітрі.

3. Градування вимірника запиленості, виконаного на основі лічильника, може виконуватися шляхом порівняння його показань із даними гравіметричного методу контролю запиленості, що використовується як зразковий (еталонний). Збільшити метрологічний запас можна за рахунок підвищення точності контролю об'єму протягнутого аспіратором повітря – з 4 % до 1 % та підвищенням маси проби пилу на аерозольному фільтрі вище 5 мг.

4. Оперативну перевірку достовірності показань вимірника і працездатності його оптико-електронної схеми запропоновано виконувати шляхом формування у приладі штучних каліброваних імпульсів напруги, а періодичну – за допомогою імітаторів пилу у вигляді тонкої скляної нитки, що рухається, або світлових імпульсів від додаткового джерела світла, що періодично збурюють спрямований світловий пучок абсорбційного лічильника.

6. ДВОХСТУПІНЧАСТИЙ КОНТРОЛЬ ВМІСТУ ПИЛУ В ПОВІТРІ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЧАСТИНОК

6.1. Способи виділення інформації про вміст тонкої фракції в загальній масі пилу

Контроль загального й тонкого пилу, який називають двоступінчастим, передбачає визначення вмісту як загальної маси пилу, що витає, так і його тонкої (респірабельної) фракції, що переважно потрапляє в легені працюючих. Фактично він розширює область контрольованих параметрів запиленого потоку й повинен базуватися на дослідженнях, що проводяться після визначення загального масового вмісту пилу в повітрі. У такому контексті способи й засоби двоступінчастого контролю представляються як розвиток лічильно-інтегрального методу на основі розробленого абсорбційного лічильника (АЛ) шляхом забезпечення додаткової функції, що відповідає запропонованій концепції розвитку методів і засобів контролю запиленості й сучасному рівню його розвитку. Нижче приводяться результати розробки й випробувань як засобів контролю загального масового вмісту пилу, так і засобів двоступінчастого контролю запиленості повітря.

Аналіз характеристик дисперсності пилового аерозолу показав, що при безпосередньому контролі запиленості, а також при створенні методів і засобів її контролю, доцільно орієнтуватися або на найбільш характерні розподіли дисперсного складу пилу, використовуючи які можна обчислити вміст фракцій, що цікавлять, або додатково до визначення загальної маси пилу виконувати оцінку вмісту тонкої (респірабельної фракції).

Раніше створені прилади для контролю дисперсного складу пилу утворили два напрямки. В одному використаний принцип амплітудної селекції імпульсів, що реєструють на виході оптичного лічильника частинок (рахунковий метод), а в іншому, – принцип визначення дисперсного складу аерозолів за характером зміни розсіювання світлового потоку частинками (інтегральний метод).

Додатковий аналіз світової тенденції в розвитку засобів контролю дисперсного складу пилу, порошоків або розмірів частинок (шматочків) здрібненого матеріалу, наведений в [37, 40, 44, 63-65, 105, 146, 147], орієнтує на створення оперативних методів і засобів контролю дисперсності безпосередньо в потоці здрібненого матеріалу. При цьому мікроскопічний аналіз, поряд із ситовим аналізом, потребують відбору проб з потоку та залишаються зразковими для оцінки фактичного розподілу розмірів частинок [39, 66, 115, 148].

Дотримуючись принципів прийнятої концепції, дослідимо можливість застосування запропонованого лічильно-інтегрального методу для двоступінчастої гравіметрії безпосередньо в потоці запиленого повітря на основі селективних властивостей самого оптичного методу. Такий підхід не вимагає багатоканальної селекції частинок або прецизійного сканування

дифракційної картини, а припускає забезпечення двопозиційного режиму роботи засобів контролю, при якому визначається або загальна маса пилу, або маса його тонкої фракції. Забезпечити його пропонується шляхом двоступінчастої оптико-електронної селекції електричних імпульсів, що утворюються в АЛ.

Попередньо виконаємо аналіз двоступінчастого методу контролю запиленості повітря, метою якого є визначення необхідної границі розподілу пилу на тонку й грубу фракції й можливості її реалізації запропонованим лічильно-інтегральним методом на основі АЛ.

6.1.1. Аналіз двоступінчастого методу контролю запиленості повітря

Предметом аналізу є Йоганесбургська й Лос-аламоська криві розподілу пилу на тонку й грубу фракції, рекомендовані авторитетними міжнародними організаціями охорони здоров'я (рис. 1.2) [9], а також рекомендовані Інститутом гігієни праці й профзахворювань (Росія) границі поділу пилу [6], згідно якого масова частка частинок (D), що пройшли через розділовий пристрій, при густині речовини пилу 1000 кг/м^3 становить: для частинок розміром (діаметром) 2 мкм – 0,95; для частинок 5 мкм – 0,4-0,6, а для частинок розміром 10 мкм – 0,05. Така дискретна залежність виділення частинок у тонку фракцію рекомендована для країн, де прийнято контролювати у першу чергу загальну масу пилу, але враховувати при цьому й вміст тонкого пилу, у той час, як Йоганесбургська й Лос-аламоська криві орієнтовані на контроль тільки тонкого пилу з ігноруванням вмісту грубої фракції пилу. Тому при визначенні границь розподілу пилу на дві фракції будемо орієнтуватися на вимоги [6], з яких виходить, що відсоток виділення в тонку фракцію частинок розміром 5 мкм повинен становити 40...60%, а, отже, розмір частинок, що розділяють тонку фракцію навпіл, повинен перебувати приблизно в межах 4...6 мкм.

Одержимо функцію кривої розподілу пилу на тонку й грубу фракції, що пройде через область зазначених розмірів частинок. Для цього апроксимуємо дані Інституту гігієни у вигляді кривих другого порядку з урахуванням розкиду значень частки частинок розміром 5 мкм у вигляді поліномів:

$$D=1,458-0,286d+0,014d^2 \text{ - для значення } D(5) = 0,4; \quad (6.1)$$

$$D=1,192-0,123d+0,0008d^2 \text{ - для значення } D(5) = 0,6; \quad (6.2)$$

$$D=1,325-0,203d+0,008d^2 \text{ - для середнього значення - } D(5) = 0,5. \quad (6.3)$$

Нижче для порівняння наведені апроксимуючі вирази, відповідно, для Йоганесбургської й Лос-аламоської кривих розподілу пилу:

$$D=0,995-0,019d^2; \quad (6.4)$$

$$D=2,176-0,782 d+0,105d^2-0,005 d^3 \approx 1,763-0,467 d+0,0032d^2, \quad (6.5)$$

Для подальшого аналізу нанесемо отримані залежності на загальний графік, представлений на рис 6.1.

Як бачимо, залежність (6.3) для значення $D(5) = 0,6$ через малість квадратичного елемента (коефіцієнт при d^2 дорівнює 0,0008) вироджується в пряму лінію $D \approx 1,2 - 0,12d$ (рис. 4.1, пунктирна лінія 4). Ця пряма є на графіку правою границею області розподілу пилу на тонку й грубу фракції. Функція (6.1) для значення $D(5) = 0,4$ – близька до Лос-аламоської (на рис. 6.1 лінія 2). Її можна вважати лівою границею області розподілу частинок.

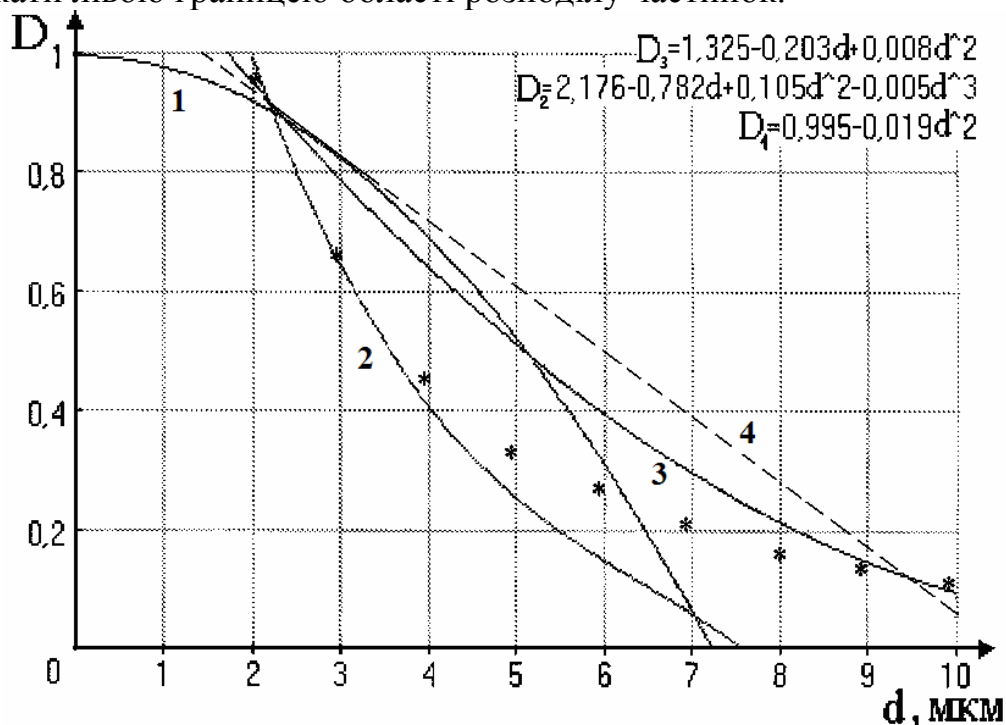


Рисунок 6.1 – Криві розподілу пилу на дві фракції: 1 й 2 – Йоганесбургська й Лос-аламоська, відповідно; 3 й 4 – відповідно середня крива, згідно [6], і її права границя; (* – точки, що відповідають кривій чутливості оптичного абсорбційного методу, порядок визначення яких буде розглянутий нижче)

Таким чином, шукана функція розподілу частинок на тонку й грубу фракцію повинна перебувати між лініями 2 й 4. Тому наступний аналіз полягав у тому, щоб забезпечити поділ вихідного імпульсного сигналу АЛ, що відповідає загальній запиленості повітря, саме в зазначеній області.

6.1.2. Сепарація частинок пилу на основі АЛ

Властивість великої кількості малих частинок ослаблювати світло сильніше, ніж такої ж кількості по масі великих частинок, що проаналізована на попередньому етапі досліджень, указує на те, що оптичний метод може виступати сепаратором масового вмісту тонкого й грубого пилу із плавною кривою поділу. Цю властивість, використано для контролю тонкого пилу в інтегральному фотометрі “ТМdigital” [29,31], у якому отримана функція поділу, що нагадує Лос-аламоську криву.

Оцінимо характер і вид кривої подібної сепарації в області тонкого пилу для оптичного лічильно-інтегрального методу, заснованого на використанні

АЛ. Для цього розрахуємо потоки сумарного ослаблення світла сукупністю сферичних частинок масою 1 мг з розмірами від 2-х до 10-ти мкм. (аналогічно даним табл. 4.3, де розрахунки виконані з великим кроком у всьому досліджуваному діапазоні розмірів частинок пилу). Результати розрахунків наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Ослаблення світла об'ємом, що містить 1 мг сферичних частинок з густиною речовини 1000 кг/м^3 (1 мг/мм^3) в області поділу пилу на тонку й грубу фракції

Розмір частинок d , мкм	Число частинок при загальній масі 1 мг N_d , тис. шт./мг	Сумарні потоки ослаблення світла частинками			
		$S_p \cdot N_d$, мм ² /мг (у дужках наведені нормовані значення)	$S_p^{**} \cdot N_d$, мм ² /мг при відсіченні шуму на рівні:		
			1,5 “сигма”	2 ”сигма”	3 “сигма”
1	2	3	4	5	6
2	2,5E+08	1548 (1)	29	5,4	0,83
3	7,4E+07	1022 (0,66)	42	7,95	1,22
4	3,1E+07	741 (0,48)	53	9,9	1,51
5	1,6E+07	573 (0,37)	62	11,6	1,77
6	9259259	460 (0,3)	69	12,9	1,97
7	5830904	379 (0,24)	66	13,9	2,12
8	3906250	317 (0,2)	62	14,5	2,22
9	2743484	269 (0,17)	60	15,8	2,28
10	2000000	232 (0,15)	59	23,8	2,32

Порівняємо отримані дані з рекомендованими кривими розподілу пилу на дві фракції. Для цього нормуємо теоретичні значення сумарного потоку ослаблення абсорбційного методу $S_p \cdot N_d$ відносно величини 1548, що відповідає потоку ослаблення частинками розміром 2 мкм, (отримані значення занесені в колонку 3 табл. 6.1 у дужках) і нанесемо їх на рис. 6.1 у вигляді “*” для порівняння з різними кривими розподілу пилу. Розташування цих точок на графіку дозволяє зробити висновок, що теоретична крива чутливості АЛ забезпечує методичну сепарацію частинок, причому лінія поділу практично повністю опиниться в рекомендованій області між кривими 2 й 4.

Таким чином, теоретично АЛ виступає як розділовий пристрій, що пропускає тонкий пил, придушуючи при цьому грубу фракцію. Такий висновок створює протиріччя між завданнями визначення вмісту загальної маси пилу й вмісту його тонкої фракції тим самим АЛ. Дійсно, відповідно до першого завдання потрібно вирівняти чутливість методу до частинок різного розміру, а до другого, – навпаки, потрібна їх сепарація.

Можливість рішення першого завдання доведена раніше на основі відсічення підстави реального імпульсного сигналу АЛ, що забезпечує істотне зниження внеску малих частинок і вирівнювання чутливості методу до частинок різного розміру. Друге ж завдання контролю тонкої фракції пов'язане

з необхідністю сепарації частинок самим АЛ і для розв'язання згаданого протиріччя може бути вирішено двома способами.

Перший спосіб полягає в тому, що сигнал АЛ виділяють без відсічення. При цьому буде забезпечено виділення тонкого пилу за кривою розподілу, позначеною на рис. 6.1 у вигляді “*”. Така сепарація приводить до деякого завищення маси тонкого пилу, оскільки лінія розподілу дещо виходить за межі необхідної області поділу, починаючи із частинок розміром більше 9 мкм.

Таким чином, при реалізації першого способу двоступінчастого контролю одним АЛ вміст тонкого (респірабельного) пилу буде визначатися при нульовому рівні відсічення сигналу лічильника, а контроль вмісту загальної маси пилу – при відсіченні сигналу на рекомендованому раніше рівні. У цьому випадку потрібне наступне масштабування (штучне зниження) сигналу АЛ, пропорційного вмісту тонкого пилу, оскільки його абсолютне значення перевищить сигнал від загальної маси пилу, що витікає із зіставлення величин перетинів ослаблення світла частинками, наведених у стовпцях 3 й 4 табл. 6.1. Крім того, при визначенні вмісту тонкого пилу буде потрібно вирахувати сигнал шуму (установкою нуля при відсутності пилу), що у цьому випадку не несе корисної інформації. Слід зазначити, що при такому способі двоступінчастої гравіметрії одержувана інформація про вміст загального й тонкого пилу взаємно незалежна.

Другий спосіб зводиться до подальшого підвищення рівня відсічення сигналу АЛ до виділення тільки грубої фракції пилу, тобто до відсічення сигналу на другому рівні – U_2 , при якому $|U_2| \geq |U_1|$, як показано на рис. 6.2, відповідно до теоретичних висновків запропонованого методу усічення сигналу АЛ.

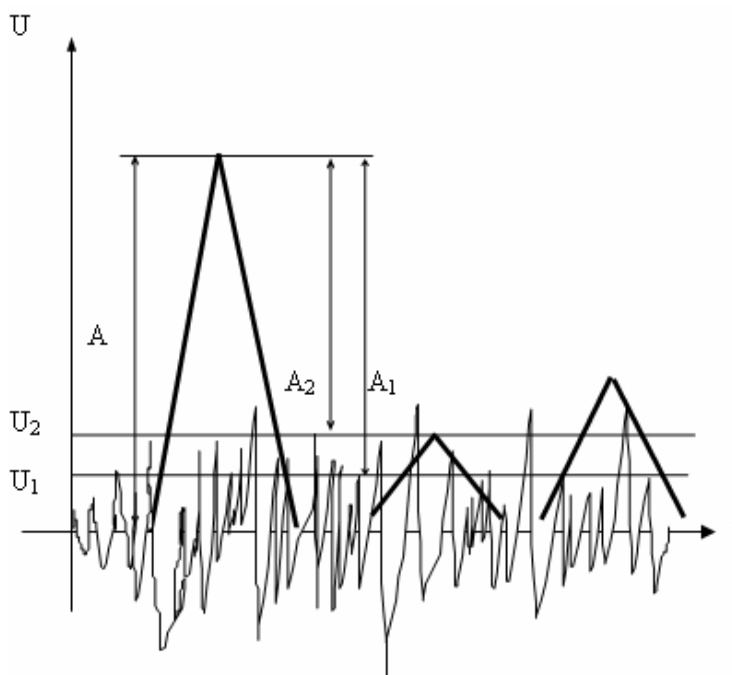


Рисунок 6.2 – Ілюстрація способу двоступінчастого контролю на основі дворівневого відсічення сигналу АЛ (A , та A_1 ; A_2 – відповідні амплітуди: дійсна й ті, що фактично реєструються та визначають площі імпульсів).

Цей спосіб дозволить зменшити чутливість АЛ до частинок малих розмірів, що, як указувалось, мають малу масу, але велику сумарну поверхню, яка й приводить до значної похибки класичного оптичного методу.

Відсічення сигналу на другому рівні приведе до ще більшого зниження внеску тонкого пилу, причому внесок грубого пилу мінятиметься незначно. Тому одним АЛ можна спочатку визначити вміст загальної маси пилу, а потім – масу грубої його фракції, відповідно при відносно низькому першому рівні відсічення та більш високому – другому. У цьому випадку вміст тонкого пилу можна одержати як різницю значень вмісту загальної маси пилу та грубої його фракції.

Очевидно, що при другому способі вимірник на базі АЛ являє собою пристрій, що пропускає грубий пил, на відміну від розділових пристроїв, які його затримують. Тому частку частинок, що пройшли через АЛ, варто представити у вигляді $D^* = 1 - D$. Тоді шукана функція перетворення АЛ для виділення грубого пилу з (6.3) перетвориться в

$$D^* = 1 - D = -0,325 + 0,203d - 0,008d^2 ; \text{ для } D(5 \text{ мкм}) = 0,5. \quad (6.6)$$

Для забезпечення функції перетворення (6.6) необхідний вибір прийняттого другого рівня відсічення (U_2) електричного сигналу АЛ.

Вибір зробимо на основі аналізу сумарних потоків ослаблення світла монодисперсною системою частинок, при відсіченні шуму на рівнях, що відповідають двом і трьом його середньоквадратичним відхиленням – ”сигма”, орієнтуючись на те, що обрані рівні відповідають перетинам частинок з розмірами близько 8 й 10 мкм. Відповідні сумарні потоки ослаблення для тонкого пилу наведені в у колонках 5 й 6.

Зіставлення необхідної залежності (6.6) з нормованими даними стовпця 5 табл.6.1 показало (рис. 6.3), що частка частинок розміром 2 мкм, віднесених до грубої фракції на рівні відсічення шумового сигналу – 2”сигма”, дещо завищена, а частка частинок розміром 7-9 мкм у такій же мері занижена, але загалом близька до необхідної залежності поділу.

При відсіченні сигналу на рівні 3”сигма” спостерігається значне зниження внеску тонкого пилу, обумовлене практично повним придушенням сигналу від шуму й відповідно малих частинок. Тому другий рівень, тобто U_2 , необхідний для виділення грубої фракції пилу, варто вибрати на рівні близько 2”сигма”. Одночасно цей рівень повинен відповідати амплітуді імпульсів, що виникають від частинок розміром близько 8 мкм.

Очевидно, що при такому способі двоступінчастої гравіметрії сигнали, що відповідають загальній масі пилу і його грубій фракції будуть порівнянні за значеннями, відрізняючись лише на малу величину маси тонкого пилу, причому маса грубої фракції буде завжди менше загальної маси пилу, що не вимагатиме наступного масштабування, як у попередньому способі.

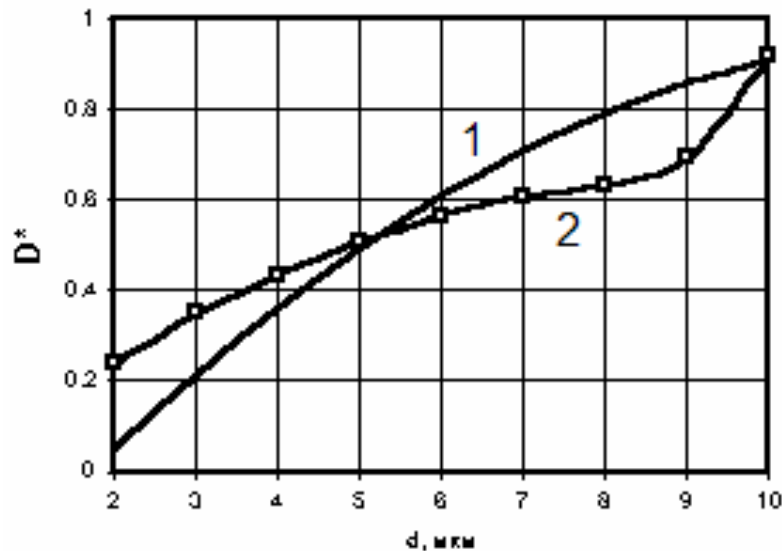


Рисунок 6.3 – Сепарація тонкого пилу в АЛ: 1 – необхідна функція виділення частинок у грубу фракцію; 2 – частка частинок, що попадають в грубу фракцію при відсіченні сигналу АЛ на рівні 2-х “сигма”.

В остаточному підсумку, одержавши достовірні значення вмісту загальної маси пилу і його грубої фракції при двох обраних рівнях ($|U_2| \geq |U_1|$) відсічення сигналу АЛ, можна розраховувати на те, що їхня різниця теж достовірно відобразить вміст тонкого пилу. Хоча погрішність визначення вмісту тонкого пилу таким способом оцінюється у 1,4-2 рази більш високою, ніж при першому способі, оскільки вирахування вмісту грубого пилу із загальної маси обумовить алгебраїчне підсумовування погрішностей. У зв'язку із чим, при двоступінчастій гравіметрії другим способом вимога до точності визначення загальної маси пилу повинна бути більше жорсткішою. При цьому для підвищення точності останньої необхідно збільшити ступінь придушення тонких фракцій за рахунок відсічення шуму на рівні, що становить близько 1,5“сигма”, що відповідає придушенню шуму на 85 % його первісної величини або ймовірності пропущення шуму $p = 0,15$. Одночасно цей рівень повинен відповідати амплітуді імпульсів, що виникають від частинок розміром 5-6 мкм. (Результати розрахунків сумарних потоків ослаблення на рівні 1,5“сигма”, що рекомендовані для контролю загальної маси пилу при двоступінчастому контролі запиленості, наведені в колонці 3 табл. 6.1).

6.1.3. Обґрунтування конструктивних параметрів АЛ для контролю масового вмісту загального й тонкого пилу

До основних конструктивних параметрів АЛ слід віднести його оптичну базу, довжину проточного каналу, швидкість потоку в ньому, розміри корпусу й ін., тобто ті параметри, які будуть визначатися параметрами запиленого потоку, а також вимогами охорони праці до його контролю.

Визначимо спочатку оптичну базу АЛ, тобто відстань між елементами його оптичної пари. При цьому до уваги приймалася необхідність контролю

пилу в повітрі робочої зони, що характеризується концентраціями, які змінюються в області гранично допустимої концентрації (ГДК) пилу або в області технічно досяжних на конкретному устаткуванні значень.

Відповідно до вимог охорони праці в шахтах, ГДК пилу, що містить вільний двооксид кремнію (пил небезпечний по силікозу), становить 1 мг/м^3 , а для інертного пилу, зокрема чисто вугільного, не перевищує 10 мг/м^3 , у той же час технічно досяжні рівні запиленості поблизу шахтних агрегатів (вугільний чи прохідницький комбайн) можуть коливатися в досить широких межах і досягати $200 \dots 500 \text{ мг/м}^3$ і більше. Маючи на увазі гігієнічний контроль, варто орієнтуватися на діапазон вимірів концентрації від 1 до 200 мг/м^3 , а при контролі технічно досяжних рівнів запиленості – від 10 до 500 мг/м^3 . Тому АЛ, що працює в повітрі робочої зони, повинен забезпечити просторове виявлення окремих частинок пилу при верхньому рівні його концентрації $200 \dots 500 \text{ мг/м}^3$. Для оптичних аналізаторів це можливо при товщині запиленого шару повітря, що не перевищує 4 см, більше якої вже спостерігається вторинне розсіювання світла на частинках і порушується пропорційність ослаблення світла залежно від концентрації частинок [150]. З урахуванням цього, оптична база АЛ вибиралася нами свідомо менше 4 см, – у межах 1...2 см (10...20 мм), при внутрішньому діаметрі входного патрубку АЛ – $a = 0,5 \dots 1,5 \text{ см}$.

Наступним фактором, що визначає конструкцію засобів на основі АЛ, є наявність або відсутність аспіратора повітря. Зокрема, застосування аспіратора (рис. 6.4) вимагає забезпечення ізокінетичного відбору струменя запиленого повітря з потоку [42] і безвихрового надходження потоку через вхідний патрубок АЛ.

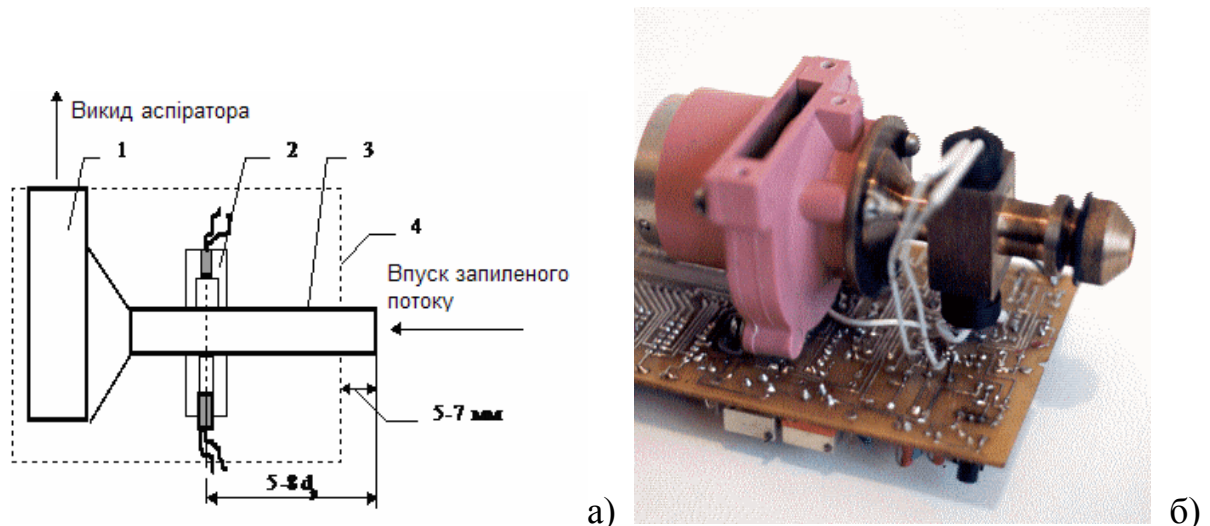


Рисунок 6.4 – Схема (а) і загальний вид (б) АЛ із аспіратором: 1 – аспіратор (повітрорудка); 2 – елементи оптичної пари; 3 – впускний патрубок; 4 – корпус.

З урахуванням першої вимоги швидкість потоку в патрубок повинна вибиратися досить високою, щоб відповідати найбільш імовірній максимальній швидкості потоків повітря робочої зони. На робочих місцях ця швидкість за правилами безпеки у шахтах рідко перевищує $4 \dots 6 \text{ м/с}$, тому можна обмежитися такими ж значеннями швидкості аспірації повітря через АЛ. Для забезпечення

безвихрового втікання у впускний патрубок АЛ струму повітря за даними наших досліджень він повинен виступати на 5-7 мм над корпусом.

Відмовитися від аспіратора можна в тому випадку, коли АЛ призначається для використання в потоках, що рухаються примусово, наприклад у гірничих виробках, що провітрюються, а також, коли необхідно одночасно контролювати швидкість цього потоку. У цьому випадку конструкція АЛ може бути виконана у вигляді обтічного циліндричного корпусу з поперечним проточним вимірювальним каналом (рис.6.5).

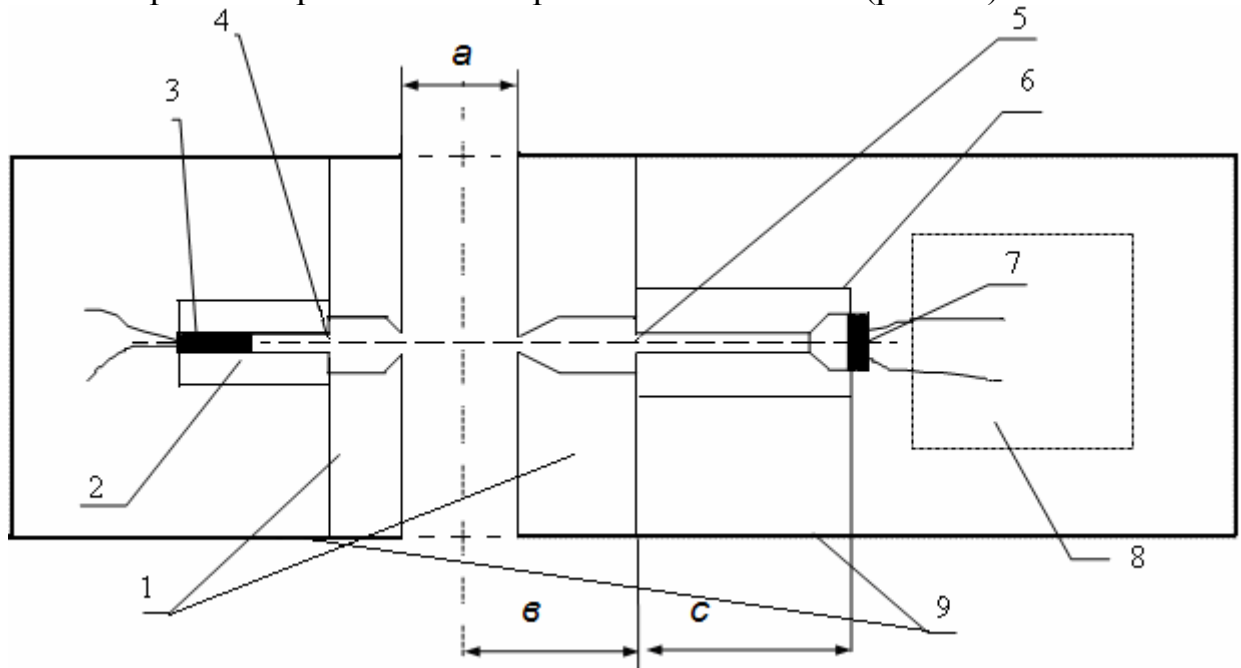


Рисунок 6.5 – Схема проточного АЛ: 1 – циліндричний корпус; 2 й 6 – втулки для розміщення джерела світла й фотоприймача, відповідно; 3 – світловий діод; 4 й 5 – оптичні польові діафрагми; 7 – фотодіод; 8 – плата електронного перетворювача; 9 – елементи циліндричного кожуха.

Характерно, що при обтіканні такого корпусу повітрям, швидкість його в проточному каналі практично не відрізняється від швидкості потоку, що набігає (при дотриманні співвісності каналу й потоку в межах $\pm 10^\circ$), що перевірено за допомогою мініатюрного термоанемометра. Це обумовлено наявністю перепаду тиску при обтіканні циліндра потоком повітря, що створює додаткову тягу в проточному каналі, що істотно компенсує місцевий опір проточного каналу й тертя повітря в ньому.

В осьові отвори циліндричного корпусу 1 з отвором діаметром a , установлені з одного боку втулка 2 зі світловим діодом 3, а з іншого боку – втулка 6 з фотодіодом 7. На внутрішніх торцях втулок 2 й 6 закріплені діафрагми 4 й 5, що забезпечують оптичне формування вимірювального об'єму лічильника у вигляді тонкого спрямованого пучка світла перетином S . Корпус із перерахованими деталями й платою 8 з елементами схеми електронного перетворювача розміщений у кожусі 9.

Оскільки збурювання фотоструму частинками пилу становить одиниці або частки нА, то потрібен вибір перетворювачів, які повинні забезпечити:

- високе підсилення імпульсного сигналу;
- прийнятний рівень власних шумів електронної схеми;
- стійкість до перешкод і наведень по живленню.

Розглянемо й виберемо основні конструктивні параметри наведених у попередньому розділі схем АЛ, що визначає його метрологічні властивості, а саме:

- перетин спрямованого пучка світла – S або його діаметр;
- розмір (діаметр) проточного вимірювального каналу – a ;
- відстань b від осі проточного каналу до точкової польової діафрагми 5;
- розмір (діаметр) отвору точкової діафрагми 5;
- відстань c – від діафрагми до фотоприймача.

Величина $S \cdot a = V_o$ являє собою вимірювальний об'єм АЛ, у якому для повного просторового виявлення окремих частинок пилу повинне перебувати не більше однієї досить великої частинки. При прийнятій максимальній концентрації пилу $200-500 \text{ мг/м}^3$ і мінімальному розмірі частинки, що реєструється, 2 мкм шуканий об'єм V_o складе приблизно $3-5 \text{ мм}^3$. Таким чином, при a , рівному 10 мм (1 см), одержимо $S=0,3-0,5 \text{ мм}^2$.

Відстань b виберемо в межах від 5 до 10 мм , або $\approx 8 \text{ мм}$ по конструктивних міркуваннях, з урахуванням розміщення діафрагми на відстані $2-4 \text{ мм}$ від стінки проточного вимірювального каналу, що трохи збільшить оптичну базу лічильника, але запобіжить забрудненню точкової діафрагми 5.

Положення фотоприймача щодо згаданої діафрагми й діаметр її отвору визначають кутову апертуру фотоприймача 2θ . Тому наступний параметр c вибираємо, орієнтуючись на мінімальні, реально реалізовані на практиці, величини $\theta=3...5^\circ$. При діаметрі отвору діафрагми $0,6 \text{ мм}$ величина c складе приблизно $8-12 \text{ мм}$. Для підвищення розв'язної здатності АЛ діаметр отвору діафрагми можна було б знизити, за умови урахування дифракції на її крайках, до $0,3 \text{ мм}$, але при цьому сильно впаде світловий потік, що досягає фотоприймача, а відповідно корисний сигнал, що уже не можливо буде виділити на рівні шумів. Компенсувати це зниження рівня сигналу можна підвищенням потужності джерела світла або використанням лазерного випромінювача.

6.1.4. Компонування схеми й вибір параметрів її перетворювачів у випадку двоступінчастого контролю

Функціональна схема вимірника вмісту загальної маси пилу розглянута у попередньому розділі. Вона дозволяє реалізувати запропоновані вище способи двоступінчастого контролю запиленості одним АЛ, а також й інші функції, шляхом організації додаткового вимірювального каналу, практично ідентичного основному. Функціональна схема багатоцільового вимірника, що

запропонована в [136, 151] не тільки для контролю вмісту пилу, але й для визначення швидкості запиленого потоку, представлена на рис. 6.6.

Оскільки принцип роботи вимірювального каналу схеми, що забезпечує контроль масового вмісту пилу, докладно розглянутий у попередньому розділі, зупинимося на особливостях наведеної схеми. Так, до її складу уведений комутатор аналогових сигналів – КАС, що забезпечує обробку інформації із трьох вимірювальних каналів, шляхом підключення їх до ПОС, відповідно до необхідної черговості. При замкнутому ключі 1 КАС контролюється струм напівпровідникового джерела світла, а на цифровий індикатор (ЦІ) виводиться інформація про забруднення оптичного каналу лічильника (у вигляді знака “Г”) після перевищення цього струму припустимої величини. Це важливо для забезпечення надійності результатів контролю запиленості й перевірки працездатності схеми, оскільки пил є одночасно як контрольованим фактором, так і таким, що забруднює оптичний канал.

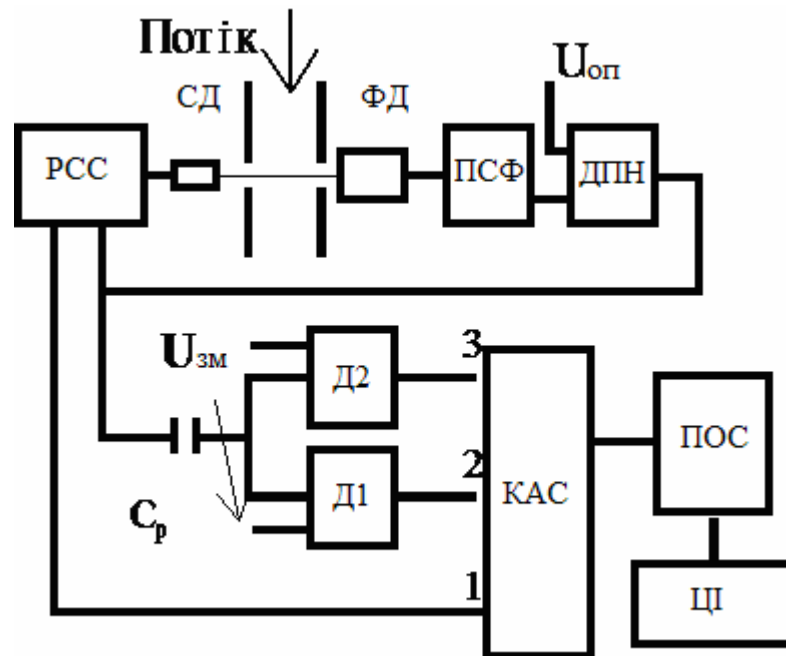


Рисунок 6.6 – Функціональна схема багатоцільового вимірника параметрів запиленого потоку: СД – світловий діод; ФД – фотодіод; ПСФ – перетворювач струму фотодіода в напругу; ДПН – диференціальний підсилювач напруги; $U_{оп}$ – опорна напруга; РСС – регулятор струму світлового діода; C_p – розділовий конденсатор; Д1 і Д2 – детектори з регульованим рівнями відсіченням; $U_{зм}$ – напруги зсуву вольт-амперних характеристики детекторів; КАС – комутатор аналогових сигналів; ПОС – пристрій обробки сигналів; ЦІ – цифровий індикатор

При замкнутому ключі 2 у вимірювальному каналі, що містить детектор Д1 зі зсувом в 1,5 “сигма”, забезпечується контроль вмісту загальної маси пилу. Додатковий детектор Д2 з керованим порогом відсічення сигналу, утворює 3-ій вимірювальний канал. При замкнутому ключі 3 КАС цей канал дозволяє реалізувати обоє запропоновані способи двоступінчастої гравіметрії, – як при

нульовому рівні відсічення сигналу (контроль тонкого пилю), так і при більше високому, ніж у детекторі Д1 (контроль грубого пилю). У першому випадку ПОС забезпечує масштабування сигналу в каналі 3, а в другому – обчислення різниці сигналів каналу 2 й 3 для одержання величини, що дорівнює вмісту тонкої фракції.

Тепер розглянемо й виберемо найбільш важливі параметри елементів розглянутої схеми, які необхідні в розробці експериментальних або дослідних зразків технічних засобів контролю запиленості повітря.

СД – світловий діод. Типовими його параметрами є:

- випромінювана потужність, яку рекомендується вибирати в межах від 5 до 50 мВт за фактором енергоспоживання (при такій потужності випромінювання світлові діоди або напівпровідникові лазерні діоди, залежно від типу, споживають від джерела живлення до 500 мВт, причому для світлових діодів випромінювана потужність у безперервному режимі роботи звичайно не перевищує 200 мВт [152]);

- довжина хвилі випромінювання, обумовлена двома суперечливими факторами: спектральним діапазоном ефективного перетворення світлового потоку в електричний струм, максимум якого для кремнієвих фотоприймачів (фотодіодів) припадає на довжину хвилі 0,9 мкм [153] й ослабленням світла на частинках, що зростає зі зменшенням довжини хвилі світла. Оскільки немає досить потужних напівпровідникових джерел світла з довжиною хвилі коротше червоного світла (0,65 мкм), вибираємо довжину хвилі випромінювання в діапазоні від червоної границі видимого діапазону (0,65 мкм) до ближнього інфрачервоного (0,92-0,94 мкм). Цій умові відповідають світлові діоди й лазерні діоди на основі GaAs, максимум випромінювання яких припадає на довжину хвилі 0,9 мкм [154];

- діаграма спрямованості, що характеризується кутом розбіжності світлового пучка (звичайно становить величину порядку 20 градусів для світлових діодів із приклеєною лінзою й 40...50 градусів – для лазерного діода, що випускається без лінз і тому вимагає додаткового оптичного формування світлового пучка [152]).

ФД – фотодіод. Вирішальними його параметрами варто вважати, по-перше, розмір фоточутливої поверхні, що у запропонованій схемі АЛ визначає апертуру фотоприймача, і тому повинна бути мінімальною, а по-друге, – спектральний діапазон, що повинен відповідати спектральному діапазону джерела світла. Цим вимогам відповідають кремнієві фотодіоди, які утворюють ефективну оптичну пару зі згаданими вище напівпровідниковими джерелами світла [153]. Для нормування розміру світлочутливої поверхні доцільно перед віконцем фотоприймача встановити польову діафрагму діаметром 1,2-1,4 мм;

ПСФ – перетворювач струму фотодіода в напругу. Зміна фотоструму при прольоті частинок становить відповідно до розрахунків за формулою (4.1) від частки до десятків нА, тому, для забезпечення перетворення його до величини в 0,5 - 1,5 В, зручної для наступного використання, необхідний перетворювач струм-напруга з коефіцієнтом перетворення порядку 10 В/мкА. Такій вимозі

відповідають перетворювачі, виконані на інтегральних операційних підсилювачах [154];

ДПН – диференціальний підсилювач напруги. Вибирається з високим коефіцієнтом підсилення по напрузі (бажано 100-200 тисяч [155]) для забезпечення високого коефіцієнта стабілізації світлового потоку у вимірювальному каналі. Це, у свою чергу, забезпечить мінімальний дрейф нуля, що важливо при вимірі малих концентрацій пилу;

$U_{оп}$ – опорна напруга. Це напруга, що визначає рівень світлового потоку у вимірювальному каналі АЛ, а значить і струму джерела світла. Залежить вона від типу мікросхем, напруги джерела живлення, типу світлового діода й ін. З урахуванням низької напруги живлення мікросхем (3-5 В), що звичайно використовують у портативних пристроях, вибираємо $U_{оп}$ свідомо нижче в межах від 0,5 до 1,5 В.

РСС – регулятор струму світлового діода (джерела світла). Повинен забезпечувати стабілізацію й регулювання струму в межах від 30 до 60-80 мА, з урахуванням типового максимально припустимого значення в 100 мА й можливого розкиду параметрів світлових діодів [152]. Мінімальний запас для автоматичного підвищення струму через джерело світла при забрудненні оптичного каналу повинен становити не менш 15 % від номінального значення, але не більше 25-30 %, оскільки подальше підвищення струму приводить до підвищення температури світлового або лазерного діодів та зміни їх вольт-амперних і спектральних характеристик.

C_p – розділовий конденсатор. Разом із вхідним опором наступного детектора електричних імпульсів (Д1 або Д2) утворює RC ланцюг, постійна часу якого визначає пропускну здатність схеми для імпульсного сигналу. Постійна часу цього ланцюга вибирається за умови повного пропускання корисних імпульсів від частинок, але затримки високочастотного паразитного шуму. Тривалість корисного імпульсу на рівні його підставі склала $t_{пр} \approx 0,1-0,2$ мс при швидкості потоку повітря у вхідному патрубку 4-6 м/с та діаметрі робочого пучка світла близько 0,5 мм.

Д1 і Д2 – аналогові детектори сигналу АЛ із регульованим відсіченням. Для реєстрації імпульсів, що виникають від частинок розміром більше 2 мкм, детектори повинні мати лінійну характеристику перетворення, починаючи із частки мВ, тому будувати їх необхідно за схемою активного детектора на основі операційного підсилювача з діодом у ланцюзі зворотного зв'язку [155].

$U_{зм}$ – напруга зсуву вольт-амперної характеристики детекторів (Д1 або Д2) для керування рівня відсічення. Вибирається з урахуванням параметрів шуму у межах від 1 до 2“сигма”. Мінімальне значення цієї напруги може відповідати концентрації загальної маси пилу від 0.5-1 до 5-10 мг/м³. При цьому повинне бути передбачене регулювання цієї напруги зсуву в кожному з детекторів.

КАС – комутатор аналогових сигналів. Повинен відповідати типовим вимогам. У найпростішому випадку його можна виконати на звичайних перемикачах. При використанні ж мікропроцесора для обробки сигналу комутатор варто виконати на керованому мультиплексорі [156].

ПОС – пристрій обробки сигналів. Це – інтегруючий вольтметр із діапазоном вхідних напруг порядку 20-100 мВ. Постійна часу його не повинна перевищувати 4-8 с при контролі динаміки запиленості й настроюванні вимірника концентрації пилу. Для усереднення поточних результатів вимірів, час інтегрування бажано збільшити до 30-100 с, що спростить градуювання вимірника. Значне збільшення постійної часу або часу інтегрування сигналу (до хвилин, годин, або доби) може бути реалізоване на основі цифрового перетворення сигналів. При цьому пристрій може бути виконано, наприклад, на базі 8-ми розрядної мікро-ЕОМ [157].

ЦІ – цифровий індикатор. Для відображення максимальних значень концентрації 200-500 мг/м³ і додатково ще одиниці в 4-ом розряді для сигналізації гранично припустимої запиленості ЦІ повинен мати не менш 3,5 десяткових розрядів. У випадку використання мікропроцесора для обробки сигналів число розрядів індикатора може бути збільшене до 8, з урахуванням необхідності одночасного відображення інформації про вміст загальної маси пилу і його тонкої фракції.

6.2. Експериментальні дослідження характеристик розроблених засобів контролю запиленості на пилових стендах

З огляду на те, що в розробці засобів контролю загального масового вмісту пилу й засобів його двоступінчастого контролю передбачено використання того ж самого АЛ, доцільно привести результати виконаних експериментальних досліджень спільно. Перелічимо основні завдання досліджень.

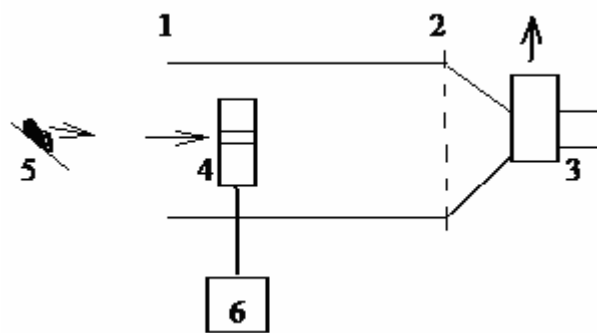
1. Оцінка мінімальних розмірів частинок, що виявляють запропонованим АЛ.
2. Побудова функції перетворення вимірника масового вмісту пилу, що базується на АЛ.
3. Перевірка сепарації вимірником тонкої або грубої фракції пилу із загального його вмісту.

6.2.1. Оцінка мінімального розміру частинок, що виявляє АЛ

Для рішення першого завдання використано пило-повітряний стенд, схема й зовнішній вигляд якого представлені на рис. 6.7.

Стенд виконаний у вигляді труби 1 довжиною близько 1,2 м та діаметром 0,2 м із закріпленим на ній вентилятором 3, що додатково забезпечувався ватно-марлевым фільтром для попередження викиду пилу в приміщення. У сполученні труби із фланцем вентилятора для вирівнювання й згладжування потоку встановлювалася решітка 2.

Регулюванням продуктивності вентилятора 3 у середній частині труби 1, де розміщувався випробовуваний АЛ, створювався потік зі швидкістю близько 5 м/с, тобто приблизно дорівнював значенню швидкості повітря у вхідному патрубку АЛ, що забезпечувало ізокінетичність.



а)



б)

Рисунок 6.7 – Схема (а) і загальний вид (б) універсального пило-повітряного стенда розімкнутого типу: 1–труба; 2 – решітка; 3 – вентилятор із електроприводом від постійного струму; 4 – випробовуваний АЛ; 5 – лопатка із частинками пилу; 6 – осцилограф

Частинки пилу відомих розмірів подавалися за допомогою лопатки 5. Підхоплені потоком, вони затягувалися у вимірювальний канал АЛ. Імпульси, що виникали в АЛ, спостерігалися на екрані осцилографа 6 і зіставлялися з рівнем вихідної шумової напруги.

Для оцінки розв'язних властивостей АЛ були використані спори рослин заздалегідь відомих розмірів, які традиційно використовують при дослідженнях засобів виявлення частинок пилу, а саме: лікоподію – розміром близько 20-25 мкм; головні – розміром близько 8 мкм; гриба дощовика – 2-5 мкм.

У результаті досліджень установлено, що спори лікоподію збуджували в АЛ імпульси амплітудою близько 20 мВ, у той час, як середнє значення амплітуди шуму склало величину близько 2 мВ при розмаху від мінімального значення до максимального в межах від 0,5-1 мВ до 5 мВ, тобто корисні імпульси на порядок перевищували шум. Спори головні викликали імпульси, які візуально відрізнялися від шуму, а їхня амплітуда була порівнянна з максимальними викидами амплітуди шумової напруги й оцінювалася величиною 4-5 мВ. І нарешті, спори гриба дощовика викликали зміну характеру шуму, який оцінювався на екрані осцилографа величиною 0,5-1 мВ, що цілком достатньо для виділення імпульсів разом із певною часткою шуму.

Таким чином, мінімальний розмір частинок, що виявляють по амплітуді запропонованим АЛ, визначений мінімальним розміром спор гриба дощовика, що, як зазначено вище, становить близько 2 мкм.

6.2.2. Побудова функції перетворення вимірника

Методика рішення другого завдання базувалася на використанні порівняльної схеми градуювання, розглянутої в попередньому розділі, що, як відзначалося, може бути реалізована в умовах реальної промислової експлуатації або в пиловій камері. Важливо, щоб концентрація пилу \tilde{C} в пилоповітряному потоці мінялася в необхідному діапазоні й контролювалася одночасно гравіметричним і вимірником запиленості повітря, створеним на основі запропонованого лічильно-інтегрального методу з розробленим АЛ.

Функції показань вимірника запиленості повітря або залежності $N = f(C)$ (функція показань N вимірника запиленості повітря від фактичного вмісту загальної маси пилу в повітрі C) отримувалися нами на зразках приладів, розроблених і виготовлених у різний час за участю авторів. Деякі з них представлені на рис 6.8 – 6.10.

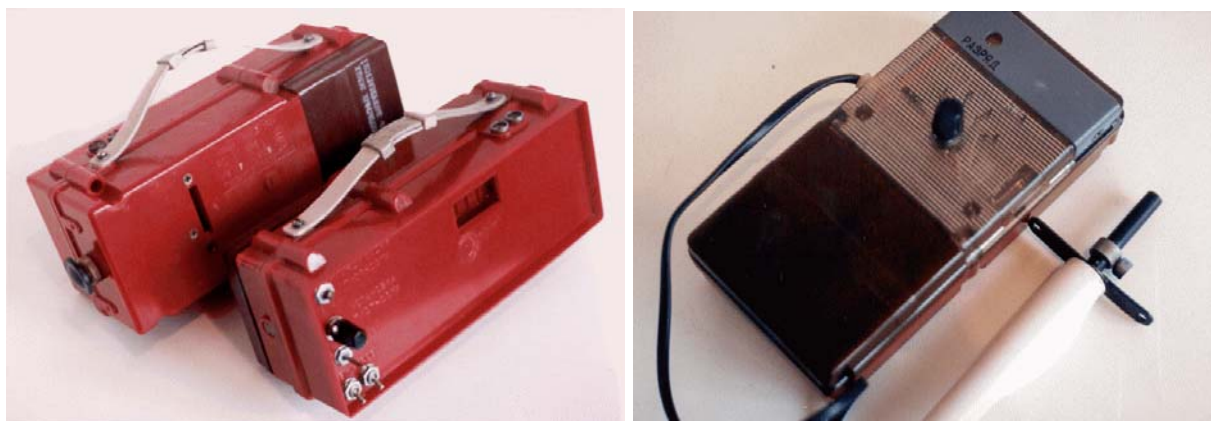


Рисунок 6.8 – Вимірник запиленості шахтної атмосфери: загальний вид промислового зразка вимірника з лицьової й тильної сторони (зліва); загальний вид оптичного імітатора З, що входить у комплект

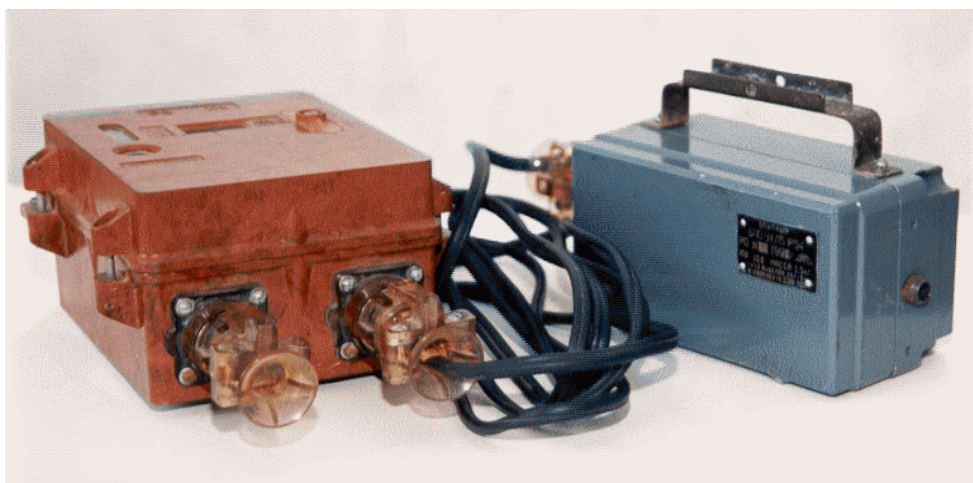


Рисунок 6.9 – Дослідний зразок стаціонарного датчика запиленості повітря

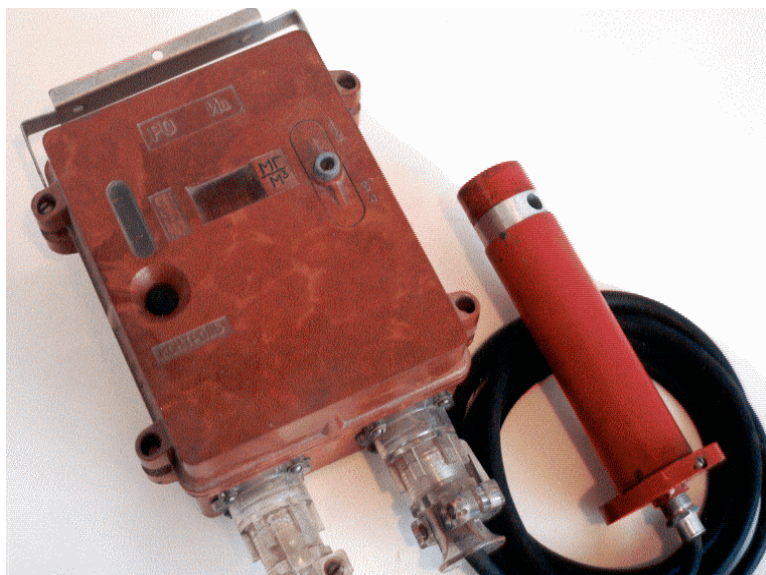


Рисунок 6.10 – Експериментальний зразок датчика запиленості із проточним первинним перетворювачем (без побудника витрати повітря).

Дослідження проводилися в лабораторних умовах або на промислових об'єктах, включаючи вугільні шахти, гірничо-збагачувальні комбінати, підприємства з виробництва шин і хімічних добрив. Більш детально зупинимося на лабораторній пиловій установці, в якій використовується пилова камера у вигляді короба з убудованим у неї вентилятором для перемішування частинок пилу. Модифікований варіант одержав назву установки для створення запиленого повітря – УСЗП, що атестована органами Держстандарту у встановленому порядку. Схема й зовнішній вигляд установки наведені на рис. 6.11 й 6.12.

УСЗП дозволяє градувати вимірники запиленості, оснащені аспіратором та цифровим табло для реєстрації вимірюваної величини масової концентрації пилу, що дозволяє спостерігати за показаннями через вікно пилової камери. Працює вона в такий спосіб.

Пил, що видувається з подавальника пилу 3, через трубку із внутрішнім діаметром близько 5 мм направляється в камеру поблизу лопат вентилятора 2, що сприяє його швидкому перемішуванню. Інтенсивність подачі пилу задається регулятором 4, а фактичне значення концентрації визначаються шляхом відбору проби на аерозольні фільтри АФА-ВП-10, що вставляються в патрон 8

Інтенсивність аспірації повітря через фільтр задається регулятором 7 і контролюється ротаметром 6. Одночасно з набором проби реєструються показання вимірника 9, що випробовується, середні значення якого зіставляються з фактичною запиленістю повітря (остання визначається за величиною осаду на аерозольному фільтрі).

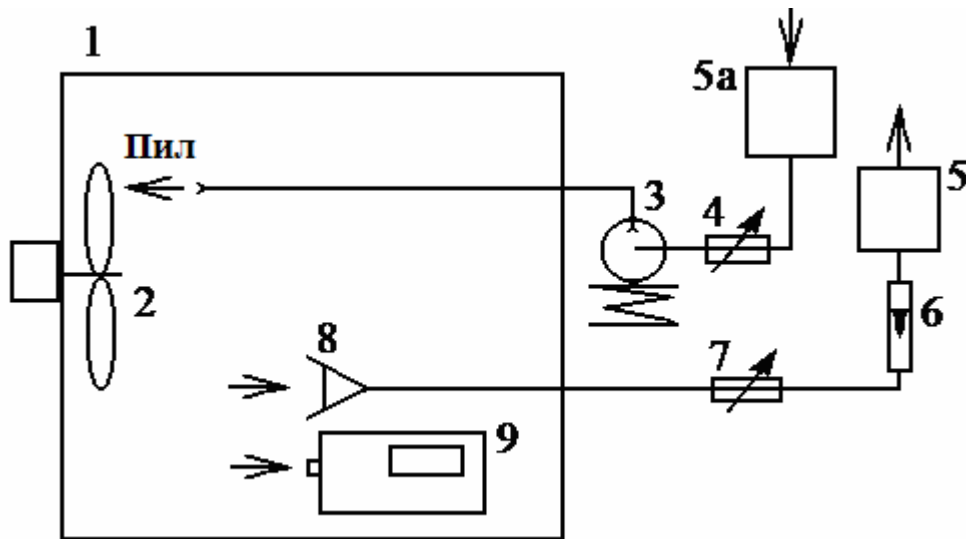


Рисунок 6.11 – Схема установки для створення запиленого повітря (УСЗП): 1 – пилова камера; 2 – вентилятор; 3 – подавальник пилу; 4; 7 – регулятори витрати повітря; 5; 5а – повітродувки; 6 – ротаметр або вимірювальна діафрагма; 8 – патрон з аналітичним аерозольним фільтром; 9 – вимірник запиленості з автономним аспіратором, що підлягає випробуванню

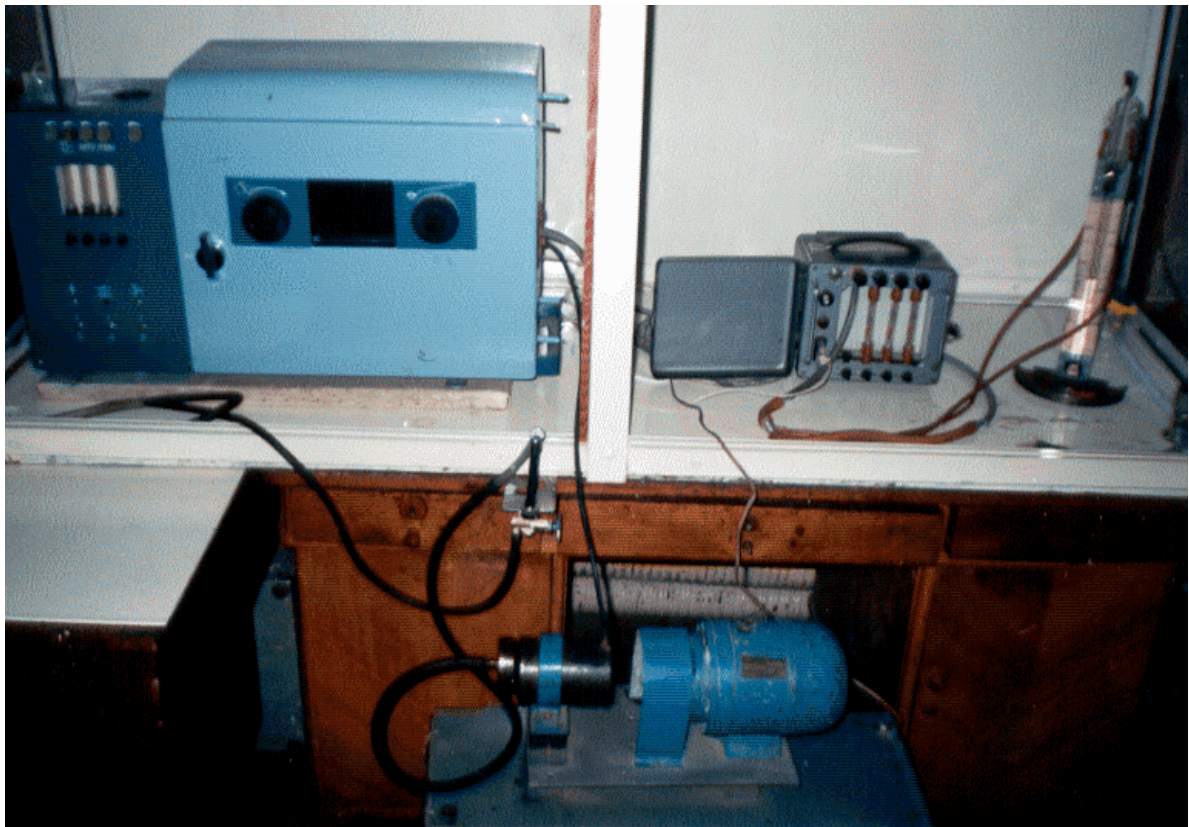


Рисунок 6.12 – Зовнішній вигляд УСЗП

Отримані на цій установці й в інших умовах експериментальні залежності $N = f(C)$ для вугільного пилу нами узагальнені й представлені у вигляді точкового графіка і його лінійного тренда на рис 6.13.

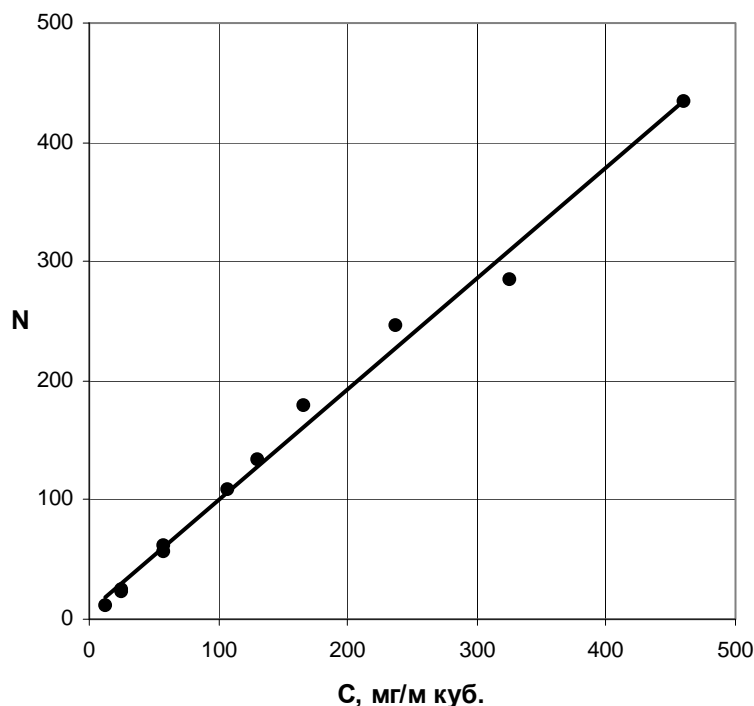


Рисунок 6.13 – Експериментальна залежність $N = f(C)$, отримана на вугільному пилу

Аналіз графіка показує, що при вмісті пилу в повітрі до 100 мг/м^3 відносна величина $K = N/C$ – близька до 1 з відхиленням не більше $\approx 7\%$, тому функція перетворення приладу $N = f(C)$ теж близька до лінійної. В області концентрацій $110 \dots 250 \text{ мг/м}^3$ спостерігається деяке завищення показань відносно фактичних. Приблизно на 12% . Після $450 \dots 500 \text{ мг/м}^3$ виявляється тенденція до зниження показань, що при концентраціях порядку $1200 \dots 1500 \text{ мг/м}^3$ досягає $25 \dots 30\%$. Це пояснюється падінням розв'язної здатності АЛ, коли в його вимірювальному обсязі одночасно перебуває значна кількість достатньо великих частинок (теоретично більше однієї).

Установлено також, що вид залежності $N = f(C)$ вимірника при відсіченні сигналу АЛ нагадує сильно витягнуту латинську букву S (рис. 6.14 крива 1). Експериментальні точки на початку діапазону (до приблизно 100 мг/м^3) лягали трохи нижче ідеальної лінійної залежності, у середині – трохи вище, а наприкінці діапазону спостерігалось зниження показань вимірника відносно фактичної концентрації.

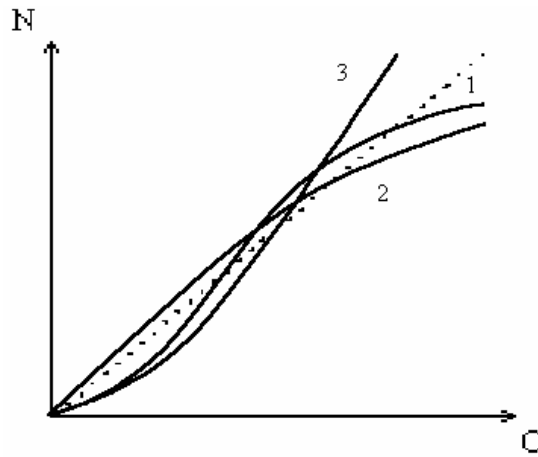


Рисунок 6.14 – Якісний вид характерних залежностей $N = f(C)$: 1 – у випадку відсічення сигналу АЛ на рівні шуму; 2 – без відсікання сигналу; 3 – при відсіченні сигналу на другому більше високому рівні; пунктир – ідеальна пряма

Характерно, що вид залежності 1 визначається наступними чинниками. По-перше, – наявністю відсічення сигналу АЛ, що підтверджується порівнянням її з лінією 2, отриманою без відсікання. При цьому зниження показань на початку діапазону пояснюється зменшенням внеску тонкого пилу, частка якого в повітрі при малих і помірних концентраціях завжди вище, ніж при високих [9]. По-друге, – обраним рівнем відсікання. Так, відсічення сигналу АЛ на більш високому рівні робить характеристику $N = f(C)$ на початку діапазону більше ввігнутої (лінія 3).

Таким чином, точка перегину найбільш вигідної з погляду точності S -подібної залежності буде переміщатися по діапазону концентрацій при зміні рівня відсічення сигналу АЛ. Положення цієї точки залежить також від розмірів вимірювального об'єму лічильника, зменшення якого підвищує виявлення окремих частинок при малих концентраціях, куди й зміщується зазначена точка перегину. Спостерігається також зниження показань в області високих концентрацій, тобто звужується діапазон контрольованих концентрацій. Так, зменшення діаметра пиловідбірної патрубку АЛ із 10 до 5 мм (тобто вдвічі) знизило максимальну границю діапазону контрольованої концентрації з 500 до приблизно 300 мг/м³.

Відносно сталий характер отриманої залежності $N = f(C)$ при обраному рівні відсічення дозволяє компенсувати виявлену S -подібну нелінійність і підвищити точність виміру шляхом коректування сигналу при його цифровій обробці в ПОС, згідно з методикою сполучення нелінійного аналогового датчика з ЕОМ, наведеної в [158]. Для цього нами отримана модель S -подібної залежності $N = f(C)$ у вигляді полінома третього ступеня виду

$$N(x) = 0,00146x^3 - 0,0497x^2 + 9,94x, \quad (6.7)$$

де x – сигнал АЛ у мВ, що надходить на відображення в ПОС і нормований у межах від 0 до 50 мВ, відповідно до діапазону концентрацій 0-500 мг/м³.

Нижче наведені експериментальні дані відповідності інтегрального сигналу АЛ фактичній концентрації C та відображуваний на цифровому табло після коректування відповідно до моделі (6.7):

x , мВ	1,13	2,36	6,2	13,5	24,7	43,5
C , мг/м ³	11,9	24,3	58	130	237	459
$N(x)$, мг/м ³	11,2	23,2	60	128,8	237,3	458,9

Зіставлення відповідних пар значень C і $N(x)$ показує, що коректування наблизило характеристику до практично лінійної залежності, а незначні відхилення обумовлені випадковою погрішністю визначення фактичної концентрації гравіметричним методом. При цьому встановлений типовий коефіцієнт перетворення концентрації у вихідну напругу вимірника, що склав $x/C \approx 0,1$ мВ/(мг/м³) або 100 мкВ/(мг/м³). Ця величина використана нами при виборі параметрів аналого-цифрового перетворювача сигналу в ПОС.

Отримана на вугільному пилу характеристика вимірника загального масового вмісту пилу зіставлявся з характеристиками, що одержувались на різних видах пилу. При цьому оцінювався вплив кольорів пилу і густини його речовини.

Як відомо вугільний пил є чорним. Його антиподом може виступати карбамідний пил, що виглядає чисто білим при аналогічній густині речовини 1300 кг/м³. Незважаючи на рівність густини речовини цих видів пилу, що апіорі враховується при вимірах відповідною її установкою в приладі, на карбамідному пилу були отримані показання, занижені відносно вугільного приблизно на 38 % (рис. 4.15). Інакше кажучи, білий карбамідний пил послабляє світло гірше, ніж чорний вугільний, як ми вважаємо, за рахунок переломлення світла в оптично прозорому карбаміді, через що частина його переломлюється частинкою за законами геометричної оптики та відхиляється від спрямованого пучка світла під досить малими кутами й попадає у фотоприймач, тобто не бере участі в ослабленні.

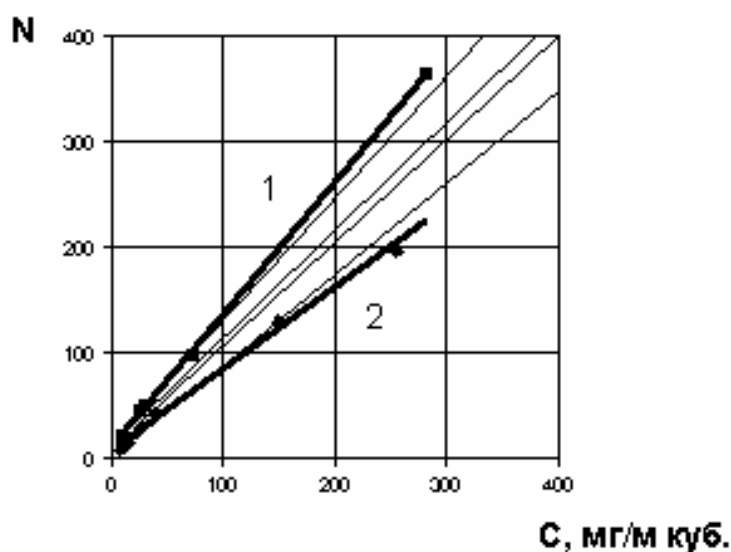


Рис.4.15. Зіставлення характеристик $N = f(C)$, отриманих для вугільного (1) і карбамідного пилу (2)

Проводилася також перевірка показань приладу, налагодженому на вугільному пилу, при вимірах вмісту інших видів пилу з урахуванням густини речовини. Так, для сланцевого пилу сірих кольорів густиною речовини 2500 кг/м^3 відхилення виявилися істотно меншими, ніж для карбамідного. Вони коливалися від 3 до 8%. Аналогічні відхилення для порошку сірки жовтих кольорів (густина сірки – 2300 кг/м^3) не перевищили 32%, для білого тальку такої ж густини отримані відхилення до 39%, тобто практично такі, як і на карбамідному пилу. Залізорудний пил з густиною близько 4700 кг/м^3 дав заниження показань на 12-15%. Аналогічні відхилення отримані й для гранітного пилу.

Таким чином, перевірка показала, що експериментальні залежності зазначених вище видів пилу укладаються в область, розташовану між вугільним й карбамідним. Це вказує на можливість універсального градування вимірника по одному «середньому» або найбільш характерному пилу, наприклад по гранітному. Очевидно, у випадку калібрування приладу по середній лінії, як показано на рис.6.15, його відхилення для більшості видів пилу не перевищать граничної величини $\pm 25\%$.

6.2.3. Перевірка сепарації вимірником грубої й тонкої фракції пилу із загального його вмісту

Перевірка інформаційного виділення тонкої фракції пилу із загального його вмісту проводилася на вимірнику, виконаному за схемою, наведеною на рис. 6.6, з перемиканням режимів виміру [135]. Дослідження проводилися на карбамідному пилу, що, як відмічалось являє собою білий порошок, що дозволило перевірити вплив кольорів пилу на сигнал АЛ й при виділенні тонкої фракції.

У подавальник пилу засипався просіяний на ситі 63 мкм товарний карбамідний порошок із середнім розміром частинок близько 20 мкм і масовим вмістом тонкої фракції, що становить приблизно 25% загальної маси пилу, при цьому концентрація в камері змінювалася шляхом східчастого регулювання подачі повітря через подавальник пилу.

Після встановлення необхідного значення концентрації, що оцінювалася за показаннями цифрового табло досліджуваного вимірника, починався відбір проби запиленого повітря на фільтр. Одночасно проводився відлік і запис поточних значень вмісту загальної маси пилу або його грубої фракції по табло вимірника. Для цього ключ комутатора КАС (див. рис.6.6) по черзі перемикався в положення 2 або 3, а на цифровому табло приладу – ЦІ відображались відповідні значення концентрації. При цьому вміст тонкого пилу визначався як різниця обмірюваних величин. За час набору на фільтр кожної проби проводився запис від 4 до 16 спостережуваних на табло значень, а отримані середні значення ставилися у відповідність значенню концентрації пилу в камері, визначеному за пробою повітря гравіметричним методом. Отримані таким шляхом результати вимірів представлені на рис 6.16 й 6.17.

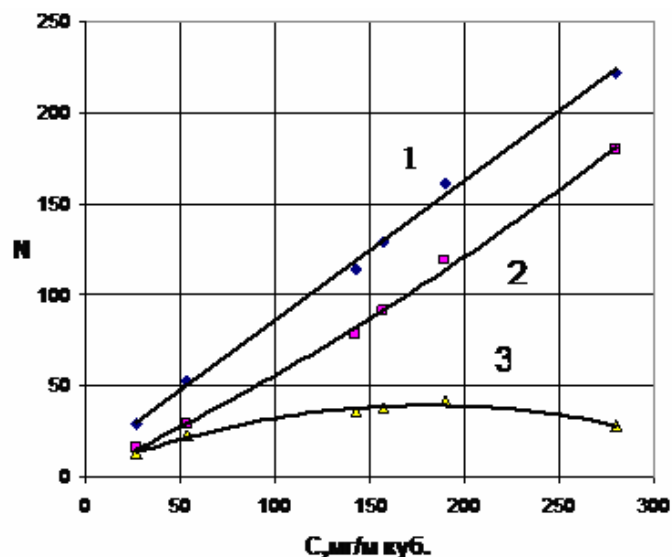


Рисунок 6.16 – Експериментальні функції перетворення двоступінчастого вимірника : 1 – для загального масового вмісту пилу (N); 2 – для грубої фракції (N_g); 3 – для тонкої фракції, обчисленої як $N_r = N - N_g$,

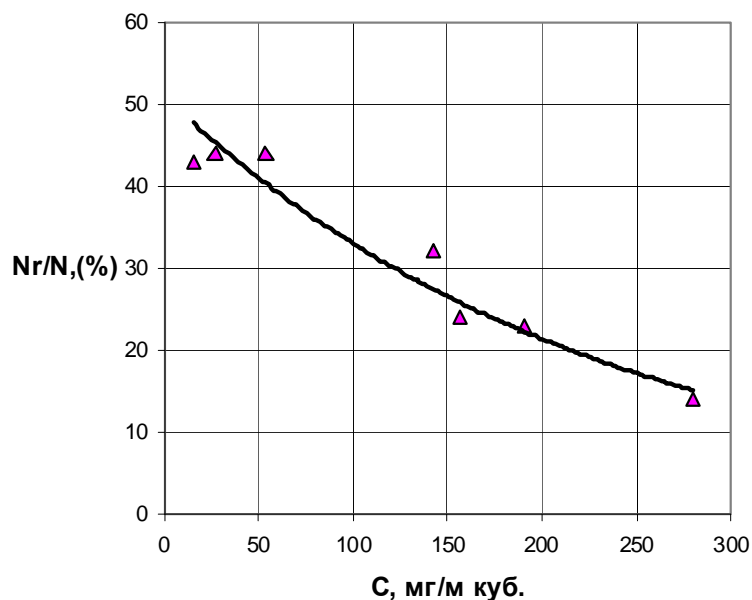


Рисунок 6.17 – Відносний вміст тонкого пилу

Згідно з рис. 6.16, значення вмісту загальної маси пилу – N (лінія 1), що отримані вимірником на основі АЛ, практично лінійно корелюються з даними гравіметричного контролю C . Залежності ж вмісту грубої – N_g й тонкої фракції – N_r , відповідно криві 2 й 3, дещо відрізняються від прямих. Це обумовлено збільшенням відносного вмісту грубої фракції пилу зі зростанням загальної концентрації в іспитовій камері, основною причиною якого є збільшення швидкості повітря в подавальнику пилу. Причому відносний вміст тонкого пилу N/N_r , % (рис. 6.17) на початку діапазону загальної концентрації, до приблизно 60 мг/м^3 , склав близько 44 % і далі монотонно знижувався до 14 %. Карбамідний же порошок, що завантажувався в подавальник пилу, як

указувалося, містив 25 % тонкого пилу. Таким чином, отримана величина тонкого пилу виявилася спочатку завищеною, що цілком з'ясовано, якщо врахувати, що з подавальника пилу при малій швидкості повітря могли не видуватися найбільш крупні частинки. Крім того, могла позначитися й часткова втрата інформації про вміст грубої фракції пилу через відсічення підстави імпульсів, на що вказувалося при теоретичному аналізі запропонованого способу. Останнє відносно низьке значення 14 % могло бути також результатом збільшення числа малих частинок, що одночасно перебувають у вимірному об'ємі, сукупність яких реєструвалися АЛ, як окремі великі частинки.

У цілому, отримані результати підтверджують можливість сепарації й виміру тонкої фракції пилу за допомогою АЛ. Спостережуваний ввігнутий й опуклий характер залежностей (див. криві 2 й 3 на рис. 6.16), отриманих відповідно для грубого й тонкого пилу, перебуває в повній відповідності з висновками, зробленими щодо виду характеристик вимірника $N = f(C)$ при зміні відносного вмісту тонкого пилу в повітрі.

6.3. Пропозиції з конструювання портативного вимірника запиленості з мікропроцесорною обробкою сигналу

Розробка пропозицій проводилася шляхом макетування й включала наступні аспекти:

- зміну схеми відбору запиленого повітря, відповідно до вимог діючого керівництва по боротьбі з пилом у частині відбору запиленого повітря для визначення масового вмісту пилу в атмосфері гірничих виробок;
- побудову схеми вимірника запиленості повітря з мікропроцесорною обробкою сигналу АЛ;
- удосконалення конструкції імітатора пилу, призначеного для калібрування приладу.

6.3.1 Вибір схеми аспірації запиленого повітря в АЛ

Відповідно до вимог керівництва з боротьби з пилом відбір запиленого повітря для визначення масового вмісту пилу в атмосфері гірничих виробок повинен проводитися перпендикулярно напрямку повітряного потоку у виробці. Однак в запропонованій конструкції відбір і викид запиленого повітря проводиться у взаємно перпендикулярних напрямках, що обумовлено використанням для аспірації відцентрового вентилятора (рис.6.4). Тому при виконанні згаданої вимоги вихлопний отвір приладу виявляється спрямованим або зустрічно, або за повітряним вентиляційним потоком гірничої виробки. Це приводить до перепаду тиску в проточному каналі АЛ, що обумовлений швидкісним напором вентиляційного потоку гірничої виробки. Перепад тиску, що утворюється, гальмує або прискорює потік у каналі, викликаючи порушення ізокінетичності відбору запиленого повітря. У результаті, з'являється різниця

між вимірюваною концентрацією частинок пилю й фактичним її значенням у вентиляційному потоці гірничої виробки. Отже, зростає погрішність виміру масового вмісту пилю в повітрі робочої зони.

З огляду на викладене, пропонується конструктивно забезпечити усмоктування й викид запиленого повітря в приладі або з одного його боку, наприклад, з тильної (задньої) стінки приладу, або із прямо протилежних сторін корпусу. Отже, пропонується робити відбір, наприклад, з боку задньої стінки, а викидати з боку лицьової, або усмоктувати повітря із правої бічної стінки, а викидати – з боку лівої, як показано на рис 6.4 (а, б, в).

У першому випадку (відбір і викид з боку задньої стінки приладу) доцільно розмістити впускний і випускний отвори один над іншим, що забезпечить симетрію відносно контрольованого повітряного потоку, тобто не критичність до його напрямку. У цьому випадку не має значення, звідки буде дути повітря, - ліворуч або праворуч відносно приладу при розміщенні лицьової панелі із цифровим табло перед оператором.

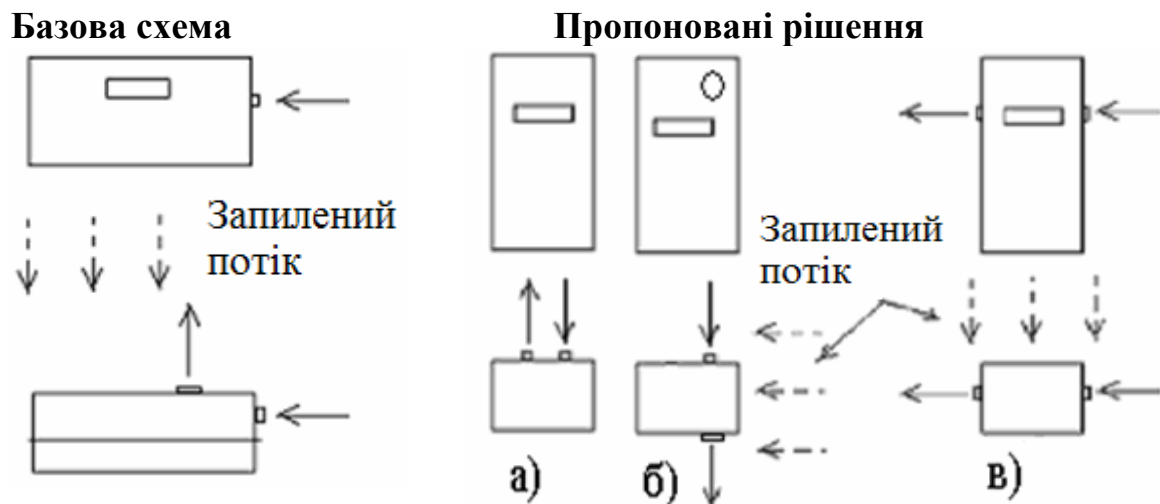


Рисунок 6.18 – Напрямок усмоктування й викиду запиленого повітря в приладі (існуюча схема й пропоновані варіанти рішень: а, б, в)

Реалізація пропонованих рішень, зажадає наступних змін конструкції:

1) Базова схема має бути перекомпонована. Замість горизонтального компонування, варто перейти до вертикального. При цьому вісь оптичної пари АЛ повинна розташовуватися, як і вісь проточного пиловідбірного каналу, в одній горизонтальній площині для виключення падіння частинок пилю на джерело світла або фотодіод.

2) У випадку використання схем аспірації запиленого повітря в оптичний канал приладу, представлених на рис. 6.18 б, в, необхідно відмовитися від відцентрового вентилятора, оскільки він повертає потік, що викидається, на 90° відносно осі усмоктування, що й обумовило відзначений вище недолік існуючої конструкції (див. рис. 6.18, ліворуч).

Слід зазначити, що при використанні схеми, наведеної на рис. 6.18 а, можна зберегти існуючий аспіратор, облаштувавши усередині корпусу приладу канал у вигляді гнучкої трубки, як показано на рис. 6.19.

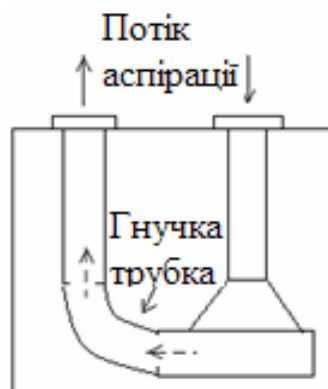


Рисунок 6.19 – Поворот потоку повітря, що аспірується, усередині корпусу приладу за допомогою гнучкої трубки

Співвісність потоків усмоктування й викиду забезпечує осьовий вентилятор. При цьому, його використання зменшить електроспоживання портативного приладу, оскільки дозволить підтримувати необхідну об'ємну швидкість аспірації в прямоточному каналі при меншій потужності приводного електродвигуна.

6.3.2 Вибір вентилятора для аспірації

Як більш раціональні, з погляду зниження габаритів аспіратора і приладу в цілому, варто вважати доцільними схеми, наведені на рис.1 б и в, тобто робити відбір запиленого повітря з боку задньої стінки, а викидати з боку лицьової панелі або відбирати із правої бічної стінки, а викидати – з лівої (у положенні приладу перед оператором). При такому компонуванні доцільне використання мініатюрного осьового вентилятора, призначеного для охолодження комп'ютерних мікросхем. Загальний вигляд такого вентилятора в зборі й розібраному стані представлений на рис. 6.20 а, б.



а)



б)

Рисунок 6.20 – Загальний вигляд мініатюрного осьового вентилятора: а) - товщиною 10 й 20 мм із різними крильчатками в зборі й б) - у розібраному стані

Особливістю таких вентиляторів є те, що крильчатка вентилятора напесована на ротор електродвигуна, являючи собою єдину конструкцію (двигун-вентилятор), у яку, крім того, вмонтована й схема керування. Причому крильчатка виконує одночасно роль рухливого кожуха, що захищає обмотки статора й схему керування від потрапляння пилу, завдяки малому зазору. Перевірка вентиляторів, що працювали тривалий час, показала, що через зазор проникає тільки пил у вигляді тонких волокон, у той час як звичайні досить великі частинки викидаються із зазору відцентровими силами й лише найбільш тонкі фракції пилу проникають під кожух.

Зазначені вентилятори мають широкую номенклатуру типорозмірів (мінімальний габарит 40x40x10). Електродвигун такого осьового вентилятора живиться постійною напругою до 12 В та є безколекторним, тобто схема керування не містить комутаційних контактів, що іскрять, як у двигуні попереднього аспіратора. Отже, утворюється менше перешкод по ланцюгах живлення й електромагнітного характеру, до яких чутливий вимірювальний тракт, як АЛ, так і всього приладу в цілому. Це обумовлено високими коефіцієнтами підсилення вимірювальних перетворювачів вимірника запиленості.

На закінчення відзначимо, що при потужності електродвигуна порядку 100 мВт, напрузі 10 В, а також використовуваних у схемах конденсаторах і низької індуктивності 4-х обмоток статора, прогнозується досить високий рівень іскробезпечності, що важливо в умовах вугільних шахт небезпечних по газу і пилу, хоча виробники вентиляторів його не регламентують. Крім того, у портативному приладі бажано використати вентилятор мінімального розміру 40x40 мм, але при ширині не 10 мм, а 20 мм, тобто з більш широкою крильчаткою, що підвищує напір аспірації без істотного збільшення споживання потужності за рахунок зниженої частоти обертання. Макет АЛ із таким вентилятором представлений на рис. 6.21.

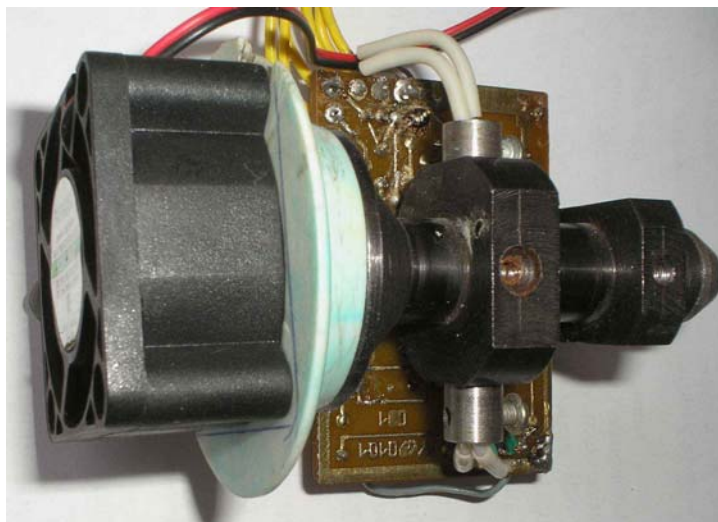


Рисунок 6.21 – Макет АЛ із вентилятором розміром 40x40x20 мм

6.3.3. Побудова функціональної схеми вимірника з мікропроцесорною обробкою сигналу АЛ

Вирішальним фактором при побудові функціональної схеми вимірника з мікропроцесорною обробкою сигналу АЛ стала можливість компенсувати повільно мінливе забруднення оптичного каналу осілим пилом й одночасне виділення імпульсів від частинок, концентрація яких в повітрі визначається, що й було реалізовано в практичній схемі з цифровою обробкою. Схема передбачає використання ріс або авг мікнтрлерів (МК), оснащених 10-розрядними АЦП (рис. 6.22).

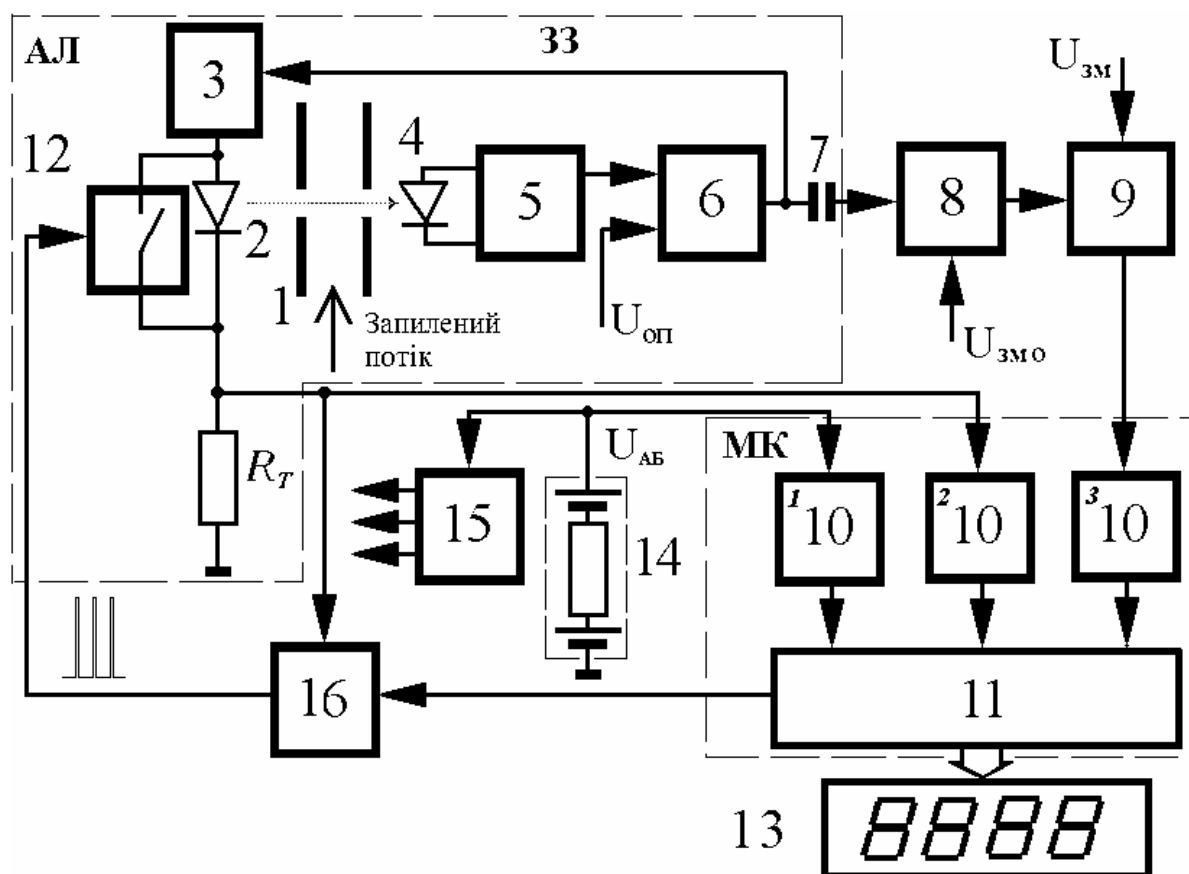


Рисунок 6.22 – Функціональна схема вимірника запиленості повітря з мікроконтролером (МК): 1 – проточний вимірювальний канал; 2, 4 – напівпровідникова оптична пара з діафрагмами; 3 – регулятор струму джерела світла за ланцюгом зворотного зв'язку (ЗЗ); 5 – перетворювач струму фотодіода в напругу; 6 – підсилювач напруги сигналу; 7 – розділовий конденсатор; 8 – активний детектор імпульсів; 9 – підсилювач постійного струму; 10 – три канали АЦП, убудованого в МК; 11 – арифметико-логічні компоненти МК; 12 – електронний ключ; 13 – цифровий індикатор; 14 – батарея акумуляторів живлення; 15 – перетворювач напруги для живлення елементів схеми; 16 – генератор каліброваних імпульсів (ГКІ); R_T – тарований резистор.

Блок-схема побудована на основі АЛ (на рис 6.22 АЛ виділений пунктиром), що, як відзначалось, являє собою фотометр із проточним вимірювальним каналом 1, через який проходить запилене повітря. У стінках каналу розміщені елементи оптичної пари 2 й 4 з діафрагмами та електронними компонентами, що слугують для формування спрямованого світлового пучка невеликого об'єму та електричних імпульсів від частинок пилу, що пролітають крізь оптичний канал. Параметри утворених імпульсів (частота, амплітуда й тривалість) однозначно пов'язані з концентрацією пилових цих частинок в повітрі. Через розділовий конденсатор 7 імпульси надходять у блоки 8 й 9, які виконують функції попереднього посилення, детектування й подальшого посилення, тобто забезпечують формування аналогового сигналу, що реєструється й обробляється МК для одержання у режимі виміру значення концентрації пилу в мг/м^3 . Рівень відсічення шуму, а значить і пропущення його частини, забезпечується величинами $U_{\text{зм}0}$ й $U_{\text{зм}}$.

Крім того, здійснюється стабілізація спрямованого світлового пучка у вимірювальному об'ємі, за рахунок автоматичного регулювання струму світлового діода 2 за ланцюгом зворотного зв'язку (ЗЗ) за допомогою вузла 3. При цьому забруднення оптичного каналу осілим пилом приводить до збільшення струму світлового діода, а зростання його світлового потоку компенсує забруднення. Стале значення струму світлового діода, у порівнянні з початковим, служить мірою забруднення оптичного каналу осілим пилом. Струм через нього контролюється за величиною напруги на резисторі R_T .

Таким чином, у приладі формується інформація про вміст пилу в повітрі, і сигналізація граничного забруднення оптичного каналу.

Передбачена також періодична перевірка стану всього вимірювального тракту (режим калібрування). Для цього служать електронний ключ 12, приєднаний паралельно світловому діоду 2, і генератор каліброваних імпульсів 16, вихід якого приєднаний до керуючого ланцюга електронного ключа, а вхід підключений паралельно резистору R_T . Включається генератор по команді МК (11) у режимі калібрування приладу. При цьому короткі імпульси генератора приводять до періодичного замикання ключа 12, від чого короткочасно знижується струм через світловий діод 2, а тому й світловий потік в оптичному каналі. В результаті, у вимірювальному каналі приладу утворюються штучні імпульси напруги, подібні до імпульсів від досить великих частинок пилу. Формується вихідний сигнал, що характеризує ступінь перетворення збурень світлового потоку в електричний сигнал, тобто визначає коефіцієнт перетворення всього вимірювального тракту. Вихід сигналу за припустимі межі свідчить про порушення в схемі, що вимагає усунення шляхом очищення каналу, регулювання АЛ або інших компонентів схеми. Особливістю такого технічного рішення є те, що генератор 16 являє собою перетворювач "напруга-частота", що управляється напругою на R_T . Тому забруднення оптичного каналу супроводжується збільшенням частоти генератора, що забезпечує підтримку каліброваного сигналу на виході приладу незмінним (у межах можливостей компенсуючого ланцюга стабілізації спрямованого світлового потоку в АЛ)

Напруга на батареї живлення й аналогові сигнали, сформовані при вимірах і калібруванні, надходять відповідно в канали (1, 2, 3) 10-розрядного АЦП. Розв'язна здатність АЦП по напрузі оцінюється як $x_m/1024$, де x_m – верхнє граничне значення напруги, мВ. При опорній напрузі 2,5 В, що рекомендована для АЦП, мінімальна його ступінь складе $2500/1024=2,44$ мВ. Якщо аналоговий вимірювальний сигнал на верхній границі діапазону (500 мг/м^3) підсилити до опорного, то мінімальна концентрація, яку виявить прилад, складе відповідно $0,488 \text{ мг/м}^3$, тобто приблизно $0,5 \text{ мг/м}^3$. Це вдвічі вище необхідного для приладу, діапазон, якого починається з 1 мг/м^3 , тому посилення сигналу можна знизити до 1,25 В. При цьому на цифровому індикаторі з трьох розрядів діапазон концентрацій складе 1-999 мг/м^3 . Таким чином, на виході блоку 9 корисна напруга при верхній граничній концентрації пилу у 500 мг/м^3 повинна становити не менш 1,25 В.

У перспективі для контролю більш низьких концентрацій рекомендується застосування 12-розрядного АЦП.

Режим контролю стану (чутливості) схеми забезпечується іншому каналом АЦП. У цьому режимі мікропроцесор формує послідовність каліброваних імпульсів, частота яких пов'язана з напругою, що падає на резисторі RT. Сформовані імпульси, як й в аналоговій схемі, подаються на ключ 12. Частота імпульсів змінюється залежно від фактичного струму випромінюючого діода, у порівнянні з початковим. Ступінь зміни частоти імпульсів від напруги на резисторі RT установлюється при програмуванні таймера мікропроцесора.

Загальний алгоритм роботи ріс-процесора або авт-контролера припускає виконання наступних основних функцій:

1 - вимір напруги сигналу АЛ у мВ, перетворення його в цифровий код і результат на цифрове табло (діапазон 0-500);

2 - вимір напруги на резисторі RT у ланцюзі випромінюючого світлового діода, перетворення його в цифровий код з наступним використанням його для:

- порівняння із граничним струмом, причому при перевищенні останнього на табло формується знак Г – брудний оптичний канал, який виводиться тільки в режимі виміру в старшому розряді цифрового табло;

- керування частотою каліброваних імпульсів (формується одним із таймерів мікроконтролера) залежно від фактичного струму випромінюючого діода;

3 - вимір напруги акумуляторної батареї, перетворення його в цифровий код з наступним використанням для відображення на табло (режим б) і для порівняння з мінімально припустимим. При меншій напрузі формується знак L – ліміт роботи акумуляторної батареї вичерпаний, тобто батарея розряджена;

4 - перетворення цифрового коду АЦП й інших цифрових величин у код для відображення на 4-х розрядному цифровому табло з 8-ми сегментними індикаторами (восьмий сегмент Н – кома). Старший розряд використовують для відображення знаків, що відповідають кожному режиму, а три наступних для відображення цифр. Кома на кінці цифрового табло мигає з періодом 1 с (формується таймером реального часу).

6.3.4. Пропозиції щодо імітатора пилових часточок, призначеного для періодичного калібрування приладу

У попередньому розділі, як альтернатива механічному імітаторові був запропонований оптико-електронний імітатор пилу (див. рис. 5.14), що імітує проліт частинки в АЛ за рахунок освітлення короткочасними імпульсами певної частоти пластинки з молочного скла, що поміщається при перевірці на шляху робочого світлового потоку та розсіює світло. Для забезпечення однозначності показань приладу при роботі з імітатором запропоновано конструкцію зонда, що представлена на рис. 6.23.

Скло пластини 1 містить частинки CaO , які розсіюють спрямоване на них світло від світлового діоду 3 у різні боки. Оскільки при калібруванні імітатором скляна пластина перебуває в оптичному каналі АЛ на шляху спрямованого світлового пучка (на рисунку показаний пунктиром), то в полі зору фотодіода АЛ перебуватиме періодично (імпульсно) освітлюване поле, тобто на тлі робочого світлового потоку формується додатковий спалах світла із частотою генератора 3, що показаний на рис. 5.14. Спалах буде сприйматися схемою АЛ як, частинка, що короткочасно пролітає.

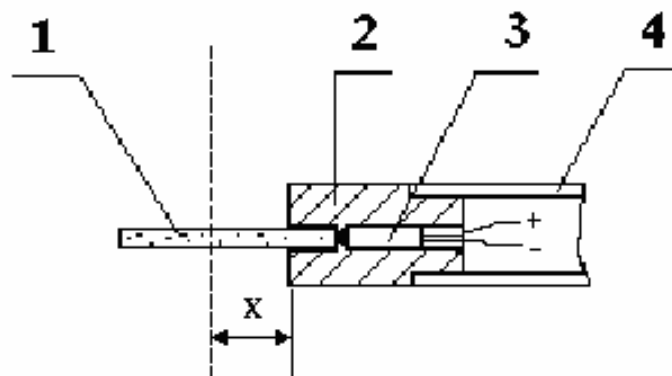


Рисунок 6.23 – Зонд імітатора зі скляною пластинною (пунктиром показаний напрямок (положення) осі світлового пучка АЛ, а X її відстань до торця втулки: 1 – пластина з молочного скла; 2 – втулка із прорізом для фіксації скляної пластини; 3 – світловий діод; 4 – шток імітатора.

Конструктивно такий зонд імітатора виконується на основі попереднього імітатора (див. рис 6.8 б), тільки в торці штока зонда встановлюється втулка 2 із закріпленою в її прорізі скляною пластинною 1, а світловий діод 3, упирається в торець пластини 1. Місце стикування пластини зі діодом доцільно залити прозорою епоксидною смолою, як імерсійною рідиною.

На виготовленому лабораторному макеті імітатора оцінювалася величина сигналу вимірника запиленості на різних частотах підсвітлюючих імпульсів (на чотирьох фіксованих частотах) при різному положенні скляної пластини в каналі вимірника запиленості. Для цього мінялася відстань X (шляхом переміщення імітатора в каналі АЛ) і записувалися показання приладу на

різних частотах. Вихідне положення торця втулки імітатора визначалося, при введенні зонда імітатора в канал АЛ, за перекриттям світлового пучка, що супроводжується відображенням на табло знака Г. Потім трошки висуваючи імітатор назад з каналу АЛ, одержували положення, для якого $X = 0$. Далі, поступову висуваючи імітатор у межах довжини скляної пластини, одержували залежність показань вимірника від положення імітатора на кожному із чотирьох діапазонів імітатора. Результати представлено на рис.6.24.

Як бачимо, віддалення оптичної осі АЛ від краю втулки імітатора на всіх дискретних по частоті точках імітатора спочатку приводить до зниження показань, а потім спостерігається область значень, які змінюються мало. Далі показання зростають аж до збігу оптичної осі АЛ із крайкою скляної пластини. Інтерес представляє область значень, які змінюються мало, і розташована на відстані, приблизно, від 1 до 3,5 мм від згаданої осі.

Таким чином, розміщуючи скляну пластину імітатора в каналі приладу так, щоб крайка втулки перебувала від оптичної осі АЛ на відстані 1,5...3 мм, одержимо показання приладу, нечутливі до малих переміщень. Це дозволить компенсувати неточності при виготовленні імітатора або фіксації його положення спеціально передбаченим упором на його штоку. За рахунок цього буде забезпечена більше достовірна передача одиниці концентрації від одного імітатора до різних робочих зразків при виготовленні й підвищить стабільності показань при перевірці кожного приладу від імітатора, що повинна входити в комплект до вимірника запиленості.

Показання

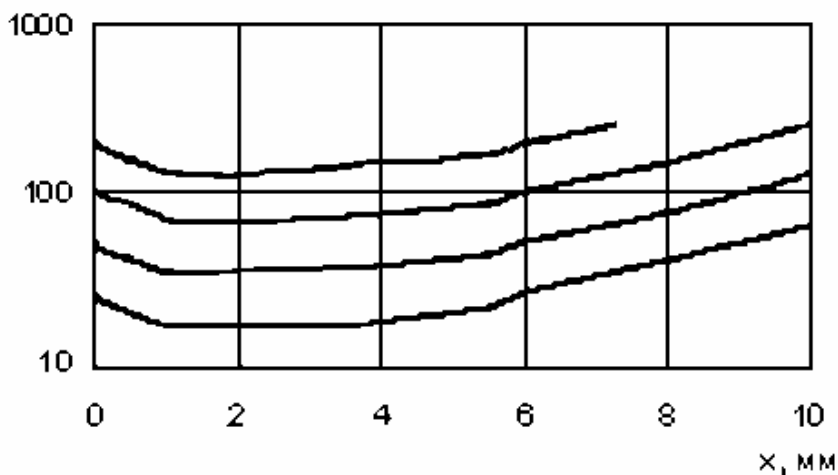


Рисунок 6.24 – Залежність показань вимірника (у логарифмічній шкалі) від положення імітатора на кожному із чотирьох діапазонів імітатора

Оскільки отримані значення показань у зазначеній області трохи нижче необхідних для перевірки показань приладу в кожній з 4-х точок діапазону виміру приладу, необхідно пропорційно збільшити частоту проходження імпульсів генератора імітатора, приблизно, в 4 рази, а наступне підстроювання робити зміною частоти при фіксованому положенні зонда імітатора в каналі вимірника запиленості повітря.

6.4. Висновки

1. Оптичний лічильно-інтегральний метод виявлення частинок пилу, реалізований на основі абсорбційного лічильника – АЛ, дозволяє виконати інформаційну сепарацію тонкого й грубого пилу, відповідно до рекомендацій авторитетних міжнародних організацій охорони здоров'я, без механічного поділу фракцій з мінімальними перекручуваннями контрольованого запиленого потоку.

2. Засоби, розроблені на основі АЛ, дозволяють забезпечити одночасний контроль вмісту загальної маси пилу й вибірково тонкої або грубої його фракції. При цьому контроль вмісту тонкого пилу можна забезпечити двома способами: без відсічення сигналу АЛ або шляхом вирахування вмісту грубої фракції, тобто обчисленням вмісту тонкого пилу як різниці загальної й грубої. Причому необхідні обчислення й виправлення можуть бути виконані за допомогою вбудованої в прилад мікро-ЕОМ.

3. Розроблений АЛ забезпечує реєстрацію частинок пилу, починаючи з мінімальних розмірів 1-2 мкм, а формування сигналів про вміст загальної маси та фракцій пилу здійснюється шляхом обробки вихідного сигналу АЛ у двох ідентичних вимірювальних каналах, що відрізняються лише різними рівнями його відсічення.

4. Функція перетворення засобів, створених на основі АЛ, близька до лінійної. Причому певна нелінійність перед індикацією визначеного вмісту пилу може бути при необхідності скомпенсована обробкою сигналу АЛ із використанням запропонованої математичної моделі на основі реальної функції перетворення, що може бути реалізована за допомогою убудованого в прилад мікропроцесора.

5. Дано пропозиції з конструювання портативного вимірника запиленості з мікропроцесорною обробкою сигналу. Запропоновано схеми відбору запиленого повітря, відповідно до вимог керівництва з боротьби із пилом у вугільних шахтах у частині відбору запиленого повітря для визначення масового вмісту пилу в атмосфері гірничих виробок. Побудовано схему вимірника запиленості повітря з мікропроцесорною обробкою сигналу АЛ з використанням ріс або авт мікроконтролерів (МК), оснащених 10-розрядним АЦП. Запропоновано конструкцію імітатора пилу, призначеного для періодичного калібрування приладу на основі пластинки з молочного скла, що періодично підсвічується та імітує проліт частинок пилу через вимірюваний канал приладу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах [Текст]: /Т.1. Затверджено наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 18 січня 1996 р. №7. – К.: Видав. Основа, 1996. – 418 с.
2. Инструкция по контролю запыленности воздуха на предприятиях горнорудной и нерудной промышленности [Текст]. – М.: Недра, 1981. – 18 с.
3. Методические указания на гравиметрическое определение пыли в воздухе рабочей зоны и в системах вентиляционных установок № 1719–77 / Утверждены 18.04.77 г. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 18 с.
4. ГОСТ 12.1.005 – 88. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно – гигиенические требования // Система стандартов безопасности труда. Ч.1. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 296 с.
5. Измерение и нормирование аэрозолей фиброгенного действия [Текст]. – М.: Изд-во СЭВ, 1982. – 128 с.
6. Метод измерения концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия в рабочей зоне [Текст]. – М.: Ин - т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1975. – 25с.
7. Гродель Г.С. Методы пылевого контроля в угольной промышленности и за рубежом [Текст]/ Гродель Г.С. // Уголь Украины. – 1971. – №8. – С. 48 – 51.
8. Армбрустер Л. Измерение и оценка концентрации пыли в различных странах [Текст]/ Армбрустер Л. // Глюкауф, 1994. – №5/6. – С.19 – 20.
9. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах / Под ред. Г.Д. Лидина. – М.: Наука, 1979. – 196 с.
10. Кудряшов В.В. Направления в разработке приборов пылевого контроля [Текст]/ Кудряшов В.В., Воронина Ю.В. // Проблемы современной рудничной аэрологии. – М.: Наука, 1974. – С. 208 – 214.
11. Виглин В.Е. Сопоставимость результатов при реализации пылевого контроля [Текст]/ Виглин В.Е., Поляков В.А., Беленков Е.М. // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – М.: ЦНИЭИуголь. – 1979. – №8. – С. 7 – 9.
12. Гагауз Ф.Г. Сравнительные исследования гравиметрических методов определения концентрации пыли на рабочих местах [Текст] / Гагауз Ф.Г. – Кривой – Рог, 1979. – 9 с. – Деп. в ин – те Черметинформация 19.09.1979, №742.
13. Гродель Г.С. Датчики системы дистанционного контроля запыленности воздуха в угольных шахтах [Текст]: Требования, определяемые назначением системы и условиями эксплуатации / Гродель Г.С., Яремаченко П.П. – Макеевка-Донбасс.: МакНИИ, 1976. – 10 с.
14. Голинько В.И. Контроль пылевых выбросов [Текст] / Голинько В.И., Колесник В.Е. // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1995. – №6. – С. 53 – 56.
15. Moroz W.J. A Portable Counter and Size Analyzer for Airborne Dust / Moroz W.J., Withstandler V.D., Anderson G.W. A // The Review of Scientific Instruments, 1970. – Vol. 41. – №7. – P. 978 – 983.

16. Контроль выноса пыли из доменной печи [Текст] / Б.П. Довгалюк, Ю.М. Самарец, А.В. Клименко, Н.Е. Пильгуй // Автоматизация горнорудного и металлургического производства. – Киев: Техніка, 1968. – С. 27 – 30.
17. Конти. Универсальный оптический зонд [Текст]/ Конти, Кэшдоллар, Либман // Приборы для научных исследований, 1982. – №3. – С. 41 – 42.
18. Клименко А.П. Непрерывный контроль концентрации пыли [Текст]/ Клименко А.П., Королев В.И., Шевцов В.И.. – К.: Техніка, 1980. – 181 с.
19. Аэрозоли [Текст]/ К. Спурный, Я. Йех, Б. Седлачек, О. Шторх. – М.: Атомиздат, 1964. – 260 с.
20. Борисенкова Р.В. Материалы по обоснованию гигиенических требований к методике пылевого контроля в угольных шахтах / Борисенкова Р.В., Лагунова С.И., Луценко Л.А.// Гигиена труда в горнодобывающей промышленности. – М.: Московский НИИ гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, 1978. – С. 46 – 51.
21. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах [Текст]/ П.М. Петрухин, М.И. Нецепляев, В.Н. Качан, В.С. Сергеев. – М.: Недра, 1974. – 304 с.
22. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли [Текст]/ Клименко А.П. – М.: Изд – во Химия, 1978. – 207 с.
23. Гаст Г. Приборы измерения пыли с показателем и регистрированием пропорциональности массы [Текст]/ Гаст Г. // Глюкауф, 1960. – №8. – С. 266 – 275.
24. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей [Текст]/ С.П. Беляев, Н.К. Никифорова, В.В. Смирнов, Г.И. Щелчков. – М.: Энергоиздат, 1983. – 232с.
25. Patnaik N.K. Respirable dust sampling instruments and the standards of airborn dustines in mines – global conspectus / Patnaik N.K. Ghose A.K. // J.of Mines Metals and Fuels, Vol. 26, 1978. – №11. – P. 369 – 375.
26. Partikelmebtechnik – quo vadis // Verfahrenstechnik, 1988. – 29. – №9. – S. 13 – 14.
27. А.с. СССР 356530. Устройство для определения запыленности газового потока / В.Н. Несин, Е.И. Павловский. – Оpubл. в Б.И., 1972. – №32.
28. Евдокимов В.И. Контроль запыленности воздуха в чистых комнатах с помощью прибора ЭИП [Текст]/ Евдокимов В.И. // Методы, приборы и системы контроля производственной среды, 1976. – Вып. 103. – С. 117 – 120.
29. Brewer H. Das Feinstaub – Streulicht fotomer TM – digital / Brewer H. // Staub – Reinhaltung der Luft, 1976. – 36. – №1. – P. 6 – 10.
30. Airborn Dust Vegerment System (SIMSLIN) / Rotherol & Mithchell Ltd. // Msnsng jornal, 1978. – Vol. 291. – № 7456.– P. 27.
31. Фотоэлектрический пылемер ТМ-дигиталь с цифровой индикацией [Текст]/ Амбрустер Л. ,Бройер Х., Нойлингер Г., Флекнерк Д. // Глюкауф, 1979. – Т.115. – №15. – С. 47 – 51.
32. Колесник В.Е. Разработка методов и средств дистанционного контроля запыленности воздуха в горных выработках шахт [Текст]: автореф. дисс. канд. техн. Наук / Колесник В.Е. – Днепропетровск: ДГИ, 12.04.1985. – 16.с.

33. Устройство для измерения концентрации дисперсной фазы аэрозоля [Текст]: а.с. №1291847 СССР, МКИ G 01 N 15/02. / В.А. Бойко, В.И. Голинько, В.Е. Колесник, А.А. Пац. – Оpubл. 23.02.87, Бюл. №7.
34. Пристрій для контролю вмісту пилу в газовому потоці [Текст]: пат.1390 Україна, МКВ G 01 N 15/06. / В.І. Голінько, В.Є. Колесник. – Оpubл.25.03.94, Бюл. №1.
35. Respicon TM – 3F: ein neues personengetragenes Mehrfraktionen – Staubmesssystem fur die Staubmessung im Arbeitsschutz, (A) Koch, W.; Dunkhorst, W.; Ludding, H. // Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 1997. – Heft 5, S. 177 – 184.
36. Голинько В.И. Совершенствование методов и техники пылевого контроля [Текст]/ Голинько В.И., Колесник В.Е. // Науковий вісник НГА України. – 1998. – № 1. – С. 45 – 49.
37. Леончик В.И. Измерения в дисперсных потоках [Текст]/ Леончик В.И., Маякин В.П.. – М.: Энергия, 1971. – 248 с.
38. Волохов М.И. Обеспыливание и контроль запыленности воздуха на рудниках [Текст] / Волохов М.И. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 320 с.
39. Недин В.В. Современные методы исследования рудничной пыли и эффективность противопылевой вентиляции [Текст]/ Недин В.В., Нейков О.Д.. – М.: Недра, 1967. – 169 с.
40. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст]/ Коузов П.А. – Л.: Изд – во Химия, 1974. – 280 с.
41. Фукс Н.А. Механика аэрозолей [Текст]: изд – во АН СССР / Фукс Н.А. – М. – 1955. – 352 с.
42. Левин Л.М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей [Текст] / Левин Л.М. – М.: Академиздат, 1961. – 267 с.
43. Тохберг Ж.Л. Методы и приборы автоматического контроля выбросов ТЭС [Текст]/ Тохберг Ж.Л., Зазаров М.С. – М.: Энергоиздат, 1986. – 144 с.
44. Торский П.Н. Трибоэлектрический пылемер [Текст]/ Торский П.Н. // Борьба с силикозом. – М.: АН СССР, 1953. Т.1. – С.167.
45. Способ калибровки контактно – электрических датчиков концентрации частиц дисперсных систем [Текст]: / А.с. №1449873 СССР.. Оpubл. 07.01.89. Бюл. №1.
46. Балашов С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Балашов, Ф.Г. Гуревич– М.: Статистика, 1980. – 240 с.
47. ГОСТ 22782.5 – 78. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты ”искробезопасная электрическая цепь”[Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 70 с.
48. Борн М. Оптика [Текст]/ Борн М., Вольф Е. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
49. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде [Текст]/ Шифрин К.С. – М-Л.: ГИТТЛ, 1951. – 288 с.
50. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами [Текст]/ Ван де Хюлст.. – М.: Издательство, 1961. – 536 с.
51. Логан Н.А. Обзор некоторых ранних работ по теории рассеяния плоских волн на сфере [Текст]/ Логан Н.А.. – ТИИЭР, 1965. – 53. – №8. – С. 895 – 908.

52. Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред [Текст] / Иванов А.П. – Минск: Наука и техника, 1969. – 624 с.
53. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами [Текст]/ Дейрменджан Д. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
54. Рассеяние света в дисперсной среде [Текст]/ Под редакцией А.П. Иванова. – Минск.: Наука и техника. – 1982. – 331 с.
55. Кудряшов В.В. К вопросу о точности косвенных методов пылевого контроля // Проблемы рудничной аэрологии [Текст]/ Кудряшов В.В.. – М.: Госгортехиздат, 1959, С. 257 – 261.
56. Забурдяев Г.С. Сопоставление гравиметрического и кониметрического методов определения запыленности воздуха [Текст]/ Забурдяев Г.С. // Рудничная аэрология и безопасность труда в шахтах. – ИГД им. Скочинского, 1972. – Вып.96. – С.30 –34.
57. Кравченко Н.Н. Выбор оптимального угла регистрации света, рассеянного большими частицами [Текст]/ Кравченко Н.Н. // Метрология, 1983. – №5. – С. 58 – 62.
58. Литвак В.И. Фотоэлектрические датчики в системах контроля управления и регулирования [Текст]/ Литвак В.И.. – М.: Наука, 1966. – 342 с.
59. Устройство для предохранения оптики фотоэлектрического пыле измерителя [Текст]: / а.с. №23456, НРБ.. Оpubл. 30.10.79.
60. Оптико-электронные схемы малоугловых измерителей концентрации частиц пыли [Текст]/ В.Е . Колесник, Ю.А. Днепренко. – Днепропетровский горный ин – т. – Днепропетровск, 1988. – 15 с . – Деп. в УкрНИИНТИ 19.05.88, № 1242 – Ук88.
61. Пристрій для контролю вмісту пилу в газовому потоці [Текст]: / пат.36926А України, МКВ G 01 N 15/06. / В.І. Голінько, В.Є. Колесник. – Оpubл. 16.04.01, Бюл. Промислова власність №3.
62. Хухрина Е.В. Пневмокониозы и их профилактика [Текст]/ Хухрина Е.В., Ткачев В.В.. – М.: Медицина, 1968. – 407 с.
63. Малевич Л.И. Двухступенчатая гравиметрия на горнорудных предприятиях Кривбасса [Текст]/ Малевич Л.И., Левицкая Л.М. // Горная экология. – 1980. – №10. – С. 52 – 54.
64. Карпов А.М. Двухступенчатый контроль запыленности рудничной атмосферы в шахтах ЧССР [Текст]/ Карпов А.М. // Научные основы создания высокопроизводительных механизированных и автоматизированных шахт. – М.: Изд.-во ВНИИГД, 1979. – Вып.13. – С. 145 – 152.
65. Онтин Е.И. Исследование дисперсного состава пыли угольных шахт [Текст]/ Онтин Е.И., Кустов И.И. // Совершенствование вентиляции и способов борьбы с пылью и газом в угольных шахтах: Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, вып. 171. – М.: 1978. – С. 53 – 61.
66. Гагауз Ф.Г. Электронно-микроскопические исследования промышленных пылей [Текст]/ Гагауз Ф.Г., Филлипенко Л.И., Левицкая Л.М. // Изучение физико-химических свойств пыли и возможность их использования в целях пылеулавливания. – М.: 1970. – С. 52 – 55.

67. Bauer, H.-D. Vergleichsmessungen zwischen Konimetrie und gravimetrischer Feinstaubprobenahme in Uranerzlagerstätten von Sachsen und Thüringen / Bauer, H.-D, Dahmann, D.// Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 1998 / Dahmann, D., Stoyke, G.. – Heft 4. – S. 153 – 160.
68. Шифрин К.С. Исследование прибора для измерения спектра частиц методом малых углов [Текст]/ Шифрин К.С., Голиков В.И. // Исследование радиационных процессов в атмосфере: Труды ГГО им. Воейкова. – Вып. – 170, 1965.
69. Базаров С.М. Оптический зонд для исследования структуры жидкой фазы влажного пара [Текст]/ Базаров С.М. Нахман Ю.В. // Исследование потока влажного воздуха в турбинных ступенях части низкого давления. – Л.: ЦКТИ, 1966. – Вып. 65. – С. 44 – 47.
70. Измерение дисперсности частиц двухфазного потока методом малых углов [Текст]/ И.Л. Лепешинский и др. // Турбулентные двухфазные течения. – Таллин, 1976. – С. 211 – 223.
71. Петров Г.Д. Определение спектра размеров частиц цилиндрической формы по малоугловой индикатрисе рассеяния [Текст]/ Петров Г.Д., Соколов Р.Н.// Инженерно-физический журнал, 1972, №5. – С. 890 – 893.
72. Примак А.В. Методы и средства контроля загрязнения атмосферы [Текст]/ Примак А.В., Щербань А.Н.. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 296.
73. Голинько В.И. Измерение скорости при контроле пылевых выбросов [Текст]/ Голинько В.И., Колесник В.Е. // Экотехнология и ресурсосбережение, 1999. – №1, – С. 48 – 60.
74. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. [Текст]: изд. 3-е, перераб. и доп / Кремлевский П.П.. – Л.: Машиностроение, 1975. – 776 с.
75. Андронов Н.В. Измерение расхода жидкости или газов [Текст]/ Андронов Н.В.. – М.: Энергоиздат, 1981. – 86 с.
76. Кочиш И.И. Измеритель скорости и направления воздуха ИСНВ [Текст]/ Кочиш И.И., Овсиенко Л.Г., Васюченко В.Д. // Уголь Украины, 1990. – №2. – С. 29 – 30.
77. Киясбейли А.Ш. Вихревые измерительные приборы. Библиотека приборостроителя [Текст]/ Киясбейли А.Ш. Перельштейн М.Е.– М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
78. Заикин А.И. Определение пылевой нагрузки у горнорабочих угольных шахт [Текст]/ Заикин А.И., Денисов В.П.// Гигиена труда в горнодобывающей промышленности. – М.: МосНИИ гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, 1978. – С. 51 – 52.
79. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах [Текст]/ П.М. Петрухин, Г.С. Гродель и др. – М.: Недра, 1981. – 248 с.
80. Борьба с пылью в очистных забоях [Текст]/ Г.С. Гродель, Ю.Н. Губский, Б.М. Кривохижа, А.В. Шпак. – К.: Техніка, 1983. – 71 с.
81. Борьба со взрывами угольной пыли в угольных шахтах [Текст]/ М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др. – М.: Недра, 1992. – 298 с.
82. Кривицкий М.Д. Радиоизотопный метод контроля пылевзрывобезопасности горных выработок [Текст]/ Кривицкий М.Д.// Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра, 1968.

83. Радиоизотопный датчик пылеотложения [Текст]/ М.Р. Кривицкий и др. // Новые промышленные технологии. – 1994. – №2. – С. 83 – 89.
84. Прибор для измерения количества осевшей пыли [Текст]/ а.с. 1341547 (СССР) / М.Д. Кривицкий, А.П. Дегтярев, В.И. Попсуев и др. Оpubл. в БИ, 1987, № 36.
85. Онтин Е.И. Расчетный способ определения пылеотложения в горных выработках, как основа нормализации сланцевой защиты [Текст]/ Онтин Е.И., Старков С.П. // Вопросы безопасности в угольных шахтах: Труды ВостНИИ. – Т.4 – М.: Недра, 1964.
86. Рябов А.В. Определение запыленности воздуха при обработке заготовок из серого чугуна [Текст]/ Рябов А.В, Кошарская Н.А., Шумлянский А.С.// Станки и инструмент. – 1980 . – N11. – С. 30 – 31.
87. Медведев Э.Н. Методика расчета и эффективности и обеспыливающей вентиляции [Текст]/ Медведев Э.Н.// Уголь Украины, 1999. – №1. – С. 35 – 37.
88. Непрерывный контроль пылевой обстановки и выбросоопасности при механизированной проходке выработок [Текст]/ А.И. Бобров, О.И. Кашуба, И.С. Фридман, А.С. Иванькова // Горный информационно – аналитический бюллетень / МГГУ. – М. – 2000. – Вып.1. – С. 129 – 132.
89. Разработка автоматизированной системы контроля пылевзрыво-безопасности горных выработок [Текст]/ М.И. Нецепляев, И.Л. Бабиченко, Ю.С. Ковтун, А.И. Любимова // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах. – Макеевка: Изд. МакНИИ, 1987. – С. 86 – 94.
90. Measurement and control of mine hazard demand modern equipment // Austral. Mining, 1978. – 70. – №2. – P. 52.
91. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности [Текст]/ Под ред. А.С. Кузьмича. – М.: Недра, 1982. – 240 с.
92. Некоторые закономерности динамики запыленности в выработках с конвейерной доставкой марганцевых руд [Текст]/ А.Ф. Милетич, К.В. Кузминов, И.Я. Колесник, В.П. Логвинов // Изв. вузов. Горный журнал, 1976.– №4. – С. 59 – 60.
93. Поздняков Г.А., Мартынюк Г.К. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях [Текст]/ Поздняков Г.А., Мартынюк Г.К. – М.: Недра, 1983. – 186 с.
94. Courbon P. Un capteur individuel pour les mesures d'empoussierage // "Ind. Miner. Mines et carrieres"/ Courbon P.. – 1987. – 69. – № AOUT – SEPT. – P. 430 – 432.
95. Усков В.И. Результаты стендовых испытаний пылепробонаборника типа 111А [Текст]/ Усков В.И., Поелуев А.П., Вьюгов Г.Н. // Вопросы вентиляции и борьбы с пылью и газом на угольных шахтах и разрезах.– М.: ВНИИГД, 1979. – Вып.183. – С. 103 – 105.
96. Krzystalik P. Przynrzady pomiarowe Plskiej sluzace do pomiaru stezenia zapylenia powietrza kopianego / Krzystalik P, Piskorska-Kalisz Z. // Wiadomosci gornicze, 1981. – №1. – S. 7 – 8.

97. Таубкин С.И. Пожаро - и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки [Текст]: / Таубкин С.И., Таубкин И.С.. – М.: Химия, 1976. – 264 с.
98. Кудряшов В.В. Свойства рудничной пыли и радиоизотопный метод определения запыленности воздуха [Текст]/ Кудряшов В.В., Химченко В.Ф. // Колыма. – 1969. – №6. – С. 31 – 33.
99. Петрянов- Соколов И.В. Аэрозоли [Текст]/ Петрянов- Соколов И.В., Сутугин А.Г.. – М.: Наука, 1989. – 144с.
100. Агроскин А.А. Физика угля [Текст]/ Агроскин А.А.. – М.: Недра, 1965. – 317 с.
101. Колесник В.Е. Оценка и учет плотности вещества промышленной пыли при контроле запыленности воздуха [Текст] / Колесник В.Е.: Сб. научн. трудов НГА Украины. №10, Проблемы аэрологии горнодобывающих предприятий. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 2000. – С. 53 – 57.
102. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст]/ Румшицкий Л.З.. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
103. Совершенствование оперативного контроля запыленности воздуха в угольных шахтах [Текст]/ В.И. Голинько В.Е., Колесник В.П., Белоножко, Б.М. Кривохижа // Уголь Украины. – 1996. – №8. – С. 37 – 39.
104. Бойко В.А. Шахтный фотопылемер для систем диспетчерского контроля [Текст]/ Бойко В.А., Голинько В.И., Колесник В.Е.// Снижение уровня вредных производственных факторов на горнорудных предприятиях. – М.: Недра, 1985.– С. 34 – 37.
105. Голинько В.И. Использование инерционной сепарации в устройствах для измерения концентрации пыли [Текст]/ Голинько В.И.. – Днепропетровск, 1979. – 14 с. – Деп. в ЦНИИЭИуголь 28.05.1979, № 1485.
106. Ксенофонтова А.И. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах [Текст]/ Ксенофонтова А.И. Бурчаков А.С. – М.: Недра, 1965. – 231 с.
107. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей / Фукс Н.А.. – М.: Изд – во АН СССР, 1961.–159с.
108. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст]/ Медников Е.П. – М.: Наука, 1987. – 220 с.
109. Бурчаков А.С. Динамика аэрозолей в горных выработках [Текст]/ Бурчаков А.С. Москаленко Э.М. – М.: Наука, 1965. – 68 с.
110. Кирин Б.Ф. Борьба с пылевыделением в шахтах [Текст]/ Кирин Б.Ф., Журавлев В.П., Рыжих Л.И. – М.: Недра, 1983. – 213 с.
111. Падва В.Ю. Распределение концентрации аэрозоля в турбулентном потоке // Водоснабжение и санитарная техника [Текст]/ Падва В.Ю.. – 1971. – №8. – С. 24 – 28.
112. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами [Текст]/ Бусройд Р.. – М.: Мир, 1975.– 480 с.
113. Очеретько В.Ф. Исследование распределения консистенции в двухкомпонентном потоке [Текст]/ Очеретько В.Ф.// Исследование однородных и взвесенесущих турбулентных потоков. – Киев.: Наукова думка, 1967. – С. 88 – 95.

114. Очеретько В.Ф. Скоростная структура двухкомпонентного потока [Текст] / Очеретько В.Ф. // Исследование однородных и взвесенесущих турбулентных потоков. – Киев.: Наукова думка, 1967. – С. 96 – 99.
115. Позин Е.З. Основы инженерного метода расчета гранулометрического состава угля разрушенного резанием [Текст]/ Позин Е.З., Меламед В.З. // Уголь. – 1971. – №10. – С. 1 – 6.
116. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха [Текст]: / Пирумов А.И. – М.: Строиздат, 1981. – 275 с.
117. Яремаченко П.П. Оценка погрешности измерений концентрации пыли [Текст]/ Яремаченко П.П. Смоляков В.В. // Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах. – Макеевка -Донбасс, 1981. – С. 78 – 81.
118. Керстен И.О. Аэродинамические испытания шахтных вентиляционных установок: Справочное пособие [Текст]/ Керстен И.О.. – М.: Недра, 1986. – 195 с.
119. Чернова Е.И. Засухин И.Н. К методике непрерывного автоматического контроля пыльности рудничного воздуха [Текст]/ Чернова Е.И. Засухин И.Н. // ЦНИГРИ –Вып.81,1968. – С. 38 – 43.
120. Рудничная вентиляция [Текст]: справочник / Н.Ф. Гращенков, А.Э. Петросян, М.А. Фролов и др. Под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1988. – 440 с.
121. Гродель Г.С. О требованиях к методике измерения концентрации пыли в угольных шахтах [Текст]/ Гродель Г.С., Яремаченко П.П. // Вопросы аэрологии и борьбы с пылью на угольных шахтах и разрезах.– М.: Недра, 1978. – Вып.170. – С. 54–55.
122. Яремаченко П.П. О местах, продолжительности и периодичности измерения запыленности воздуха [Текст]/ Яремаченко П.П.// Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С 79 – 83.
123. Эшби У.Р. Введение в кибернетику [Текст]/ Эшби У.Р.. – М.: Изд-во Иностранная литература, 1959. – 236 с.
124. Папеш З. Современная техника управления в горной промышленности [Текст]/ Папеш З. – М.: Недра, 1979. – 255 с.
125. Местер И.М. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания [Текст]/ Местер И.М., Засухин И.Н.. – М.: Недра, 1974. – 239 с.
126. Щербина Ю.А. Низкочастотная составляющая ЛДИС для измерения пульсаций концентрации примеси [Текст]/ Щербина Ю.А. // Оптические методы исследования. – Минск, 1978. – С. 23 – 25.
127. Козловский Е.А. Кибернетика в бурении [Текст]/ Козловский Е.А., Питерский В.М., Комаров М.А.. – М.: Недра, 1982. – 298 с.
128. Shah N.S. Technique in polydispersity measurement using Slon Arrington treatment / Shah N.S., Mehta P.V., Desai R.V. // Staub – Reinhaltung der Luft, 1978. – 38. – №2. – S.57 – 58.

129. Шифрин К.С. Коэффициент рассеяния света на больших частицах [Текст]/ Шифрин К.С. // Известия АН СССР: Серия географическая. – 14. – №1, 1950. – С. 64 – 69.
130. Шулейкин В.В. Физика моря [Текст]/ Шулейкин В.В.. – М.: Наука, 1968. – 1083 с.
131. Sfylths C.L. Problem of realizing the primary standart of light / Sfylths C.L., Jones O.C. // Journal of the Optical Society of America, 1962. – Vol.52. – №7. – P. 731 – 746.
132. Чернин С.М. Измерение температуры малых тел пиро – метрами излучения: Библиотека по автоматике [Текст]/ Чернин С.М., Коган А.В.. – Вып.607. – М.: Энергия, 1980. – 96 с.
133. Лекционные эксперименты по оптике [Текст]: Учебное пособие / С.Н. Пеньков, В.А. Полищук, О.М. Марченко, В.С. Михалев. – Под ред. Н.И. Колитеевского. – Л.: Изд – во Ленинградского ун – та, 1981. – 160 с.
134. Разработать экспериментальный образец сигнализатора негерметичности впускного тракта двигателей [Текст]: отчет о НИР /ДГИ/; Руководитель В.И. Голинько. – №ГР 01900006857, 1990. – 83 с.
135. Разработка технических средств контроля общего содержания пыли и ее респирабельной фракции в воздухе рабочей зоны [Текст]: Отчет о НИР / НГА Украины/; Руководитель В.И. Голинько. – №ГР 0198U005297, 1998. – 37 с.
136. Голинько В.И., Колесник В.Е. Оптико-электронные средства оперативного контроля запыленности шахтного воздуха [Текст]/ Голинько В.И., Колесник В.Е.// Горный информационно-аналитический бюллетень / МГГУ. – М. – 1999. – Вып.7. – С. 207 – 209.
137. Колесник В.Е. Повышение точности контроля содержания пыли оптическим абсорбционным счетчиком [Текст]/ Колесник В.Е. // Науковий вісник НГА України. – 2000. – №1. – С. 33 – 35.
138. А.ван дер Зил. Шумы при измерениях [Текст]/ А.ван дер Зил.. – М.: Мир, 1979. – 292 с.
139. Голинько В.И. Двухступенчатый контроль запыленности оптико-электронным абсорбционным счетчиком [Текст]/ Голинько В.И., Колесник В.Е., Заусалин А.В.: Сборник научных трудов НГА Украины. № 3, Том 5. Проблемы экологии горного производства и обеспечение безопасности жизнедеятельности. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 1998. – 174с.
140. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Корн Г., Корн Т. – М.: Наука, 1978. – 832 с.
141. Голинько В.И. Моделирование измерительного тракта оптико-электронного датчика запыленности воздуха / Голинько В.И., Колесник В.Е., Корсун В.И. // Горн. электромеханика и автоматика: Научн.-техн.сб.– 2000.– Вып. 64.– С. 90–96.
142. Жеверзев В.Ф. Специальный курс высшей математики для втузов [Текст] / Жеверзев В.Ф., Кальницкий Л.А., Сапогов Н.А.. – М.: Высшая школа, 1970. – 416 с.

143. Багланов Б.М. Планирование и обработка результатов эксперимента, связанного с замерами запыленности воздуха гравиметрическим методом // Труды Норильского индустриального института. Вып. 5. – Красноярск : 1970.
144. ГОСТ 12.1.016 – 79. Воздух рабочей зоны. Требования к методикам измерения концентрации вредных веществ // Система стандартов безопасности труда. Част 1. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – С. 160 – 172.
145. Каталог светорассеивающих стекол (оптических). – Л.: Опт. Ин-т им. С.И. Вавилова, 1975. – 43 с.
146. Марюта А.Н. Автоматический контроль гранулометрического состава сыпучих материалов [Текст]/ Марюта А.Н., Качан Ю.Г.– Киев-Донецк.: Вища школа, 1977. – 120 с.
147. А.с. №1500913 /СССР/. Фотоэлектрическое устройство для определения размеров и счетной концентрации частиц. – Оpubл 15.08.89. Бюл. №30.
148. Забурдяев Г.С. Определение концентрации тонкой пыли [Текст]// Рудничная аэрология и безопасность труда в шахтах. – М.:ИГД им. А. Скочинского, 1972. – Вып.94. – С. 24 – 30.
149. Голинько В.И. Контроль содержания пыли в воздухе рабочей зоны: Сборник научных трудов НГА Украины.№ 7, Том 3. – Разработка месторождений полезных ископаемых. Маркшейдерия и геология. Геоинформационные технологии в горном деле /Голинько В.И., Колесник В.Е.. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 1999. – С. 62 – 66.
150. Готовкин В.С. Автоматический непрерывный контроль загрязнения атмосферы [Текст]/ Готовкин В.С., Юрко Н.Н. // Технология и организация производства. – Киев, 1983. – №3. – С. 17 – 20.
151. V.I.Golinco, V.E.Kolecnik Development of means for a dust control in mines based on the optical particles detector // Eighth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection 1999 & International Symposium on Mine Environmental and Economical Issues 1999. Pivneak & Singhal (eds) .NMU of Ukraine, Dnipropetrovsk. – 1999. – P. 393 – 396.
152. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник / В.И.Иванов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
153. Мадьяри Б. Элементы оптоэлектроники и фотоэлектрической автоматики: Пер. с венг. [Текст]/ Под ред. С.В. Свечникова. – М.: Сов. радио, 1979. – 160 с.
154. Кривоносов А.И. Опто-электронные устройства. [Текст] – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
155. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов [Текст]. – М.: Радио и связь, 1991. – 376 с.
156. Гутников В.С. Интегральная Электроника В измерительных устройствах [Текст]. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд – ние,1988. – 304 с
157. Како Н. Датчики и микро [Текст] / Како Н., Яманэ Я.– ЭВМ: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 120 с.
158. Медведев Р.Б. АСУ ТП в металлургии: Учебное пособие / Медведев Р.Б., Бондарь Ю.Д., Романенко В.Д. – К.: Вища шк., 1987. – 256 с.

ЗМІСТ		с.
ВСТУП		3
1. АНАЛІЗ СТАНУ КОНТРОЛЮ УМОВ ПРАЦІ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПИЛОМ, НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ		4
1.1. Пиловий контроль на гірничих підприємствах і об'єктах		4
1.2. Граничні величини основних впливових чинників пилового контролю		7
1.3. Порівняльний аналіз і оцінка існуючих методів і засобів контролю умов праці за вмістом пилу в повітрі		10
1.4. Контроль вмісту тонкої і грубої фракцій пилу в повітрі робочої зони		14
1.5. Короткий аналіз методів контролю виносу пилу		16
1.6. Аналіз існуючих методів і засобів контролю пиловідкладення і пилового навантаження		18
1.7. Концепція розвитку й удосконалювання методів і засобів контролю факторів безпеки, зв'язаних з пилом		25
1.8. Висновки		26
2. АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЛУ І ПИЛОВИХ ПОТОКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РЕЗУЛЬТАТИ КОНТРОЛЮ УМОВ ПРАЦІ		28
2.1. Аналіз критичних для контролю статичних характеристик пилу		28
2.1.1. Оцінка й урахування густини речовини промислового пилу при контролі запиленості повітря		28
2.1.2. Характеристики дисперсного складу пилу		32
2.2. Урахування динаміки пилу при контролі його вмісту в газоповітряних потоках		35
2.2.1. Розміщення засобів контролю в запилених потоках		36
2.2.2. Визначення оптимального інтервалу часу усереднення контрольованих значень концентрації		42
2.3. Висновки		44
3. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МАСОВОГО ВМІСТУ ПИЛУ В АТМОСФЕРІ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ВІДОМИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ ОПТИКИ АЕРОЗОЛІВ		46
3.1. Використання потоків розсіювання й ослаблення світла частинками пилу для визначення їх масової концентрації в повітрі		46
3.2. Вибір методу контролю для контролю масового місту пилу на основі оптичних лічильників частинок		49
3.3. Основні положення теорії оптичного лічильно-інтегрального методу виявлення частинок		50
3.4. Аналіз абсорбційної схеми фотометрії окремих частинок		52
3.5. Висновок		55
4. ПРИНЦИПИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ, ЯКУ ОТРИМУЮТЬ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИМИ ЗАСОБАМИ ВИЯВЛЕННЯ ПИЛОВИХ ЧАСТИНОК В ПОВІТРІ		57
4.1. Теоретичний аналіз вихідного сигналу оптико-електронної схеми абсорбційного лічильника (АЛ)		57
4.2. Методи підвищення точності визначення масового вмісту пилу за інформацією, що отримують за допомогою АЛ		59

4.3. Вплив шуму схеми на регулювання інформаційного внеску малих частинок при усіканні електричного сигналу лічильника	65
4.4. Висновки	69
5. РОЗРОБКА СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ЗАГАЛЬНОГО МАСОВОГО ВМІСТУ ПИЛУ В ПОВІТРІ НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО АБСОРБЦІЙНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЧАСТИНОК	71
5.1. Побудова функціональної та структурної схеми абсорбційного лічильника частинок (АЛ)	71
5.2. Аналіз динамічних характеристик АЛ	73
5.3. Компонування вимірника вмісту загальної маси пилу, що витає в повітрі, на основі АЛ	79
5.4. Методи й засоби перевірки працездатності та метрологічних характеристик засобів контролю запиленості, що базуються на АЛ	82
5.4.1. Типова схема градування	82
5.4.2. Оперативна перевірка оптико-електронної схеми АЛ	85
5.4.3. Методи й засоби періодичної перевірки	88
5.5. Висновки	90
6. ДВОХСТУПІНЧАСТИЙ КОНТРОЛЬ ВМІСТУ ПИЛУ В ПОВІТРІ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЧАСТИНОК	91
6.1. Способи виділення інформації про вміст тонкої фракції в загальній масі пилу	91
6.1.1. Аналіз двоступінчастого методу контролю запиленості повітря	92
6.1.2. Сепарація частинок пилу на основі АЛ	93
6.1.3. Обґрунтування конструктивних параметрів АЛ для контролю масового вмісту загального й тонкого пилу	97
6.1.4. Компонування схеми й вибір параметрів її перетворювачів у випадку двоступінчастого контролю	100
6.2. Експериментальні дослідження характеристик розроблених засобів контролю запиленості на пилових стендах	104
6.2.1. Оцінка мінімального розміру частинок, що виявляє АЛ	104
6.2.2. Побудова функції перетворення вимірника	106
6.2.3. Перевірка сепарації вимірником грубої й тонкої фракції пилу із загального його вмісту	112
6.3. Пропозиції з конструювання портативного вимірника запиленості з мікропроцесорною обробкою сигналу	114
6.3.1 Вибір схеми аспірації запиленого повітря в АЛ	114
6.3.2. Вибір вентилятора для аспірації	116
6.3.3. Побудова функціональної схеми вимірника з мікропроцесорною обробкою сигналу АЛ	118
6.3.4. Пропозиції щодо імітатора пилових частинок, призначеного для періодичного калібрування приладу	121
6.4. Висновки	123
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	124
ЗМІСТ	135

Наукове видання

**Колесник Валерій Євгенійович,
Юрченко Анета Анатоліївна,
Чеберячко Сергій Іванович**

**КОНТРОЛЬ ЗАПИЛЕНОСТІ АТМОСФЕРИ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ
НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО ЛІЧИЛЬНО-ІНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДУ**

(Монографія)

Друкується в редакційній обробці авторів.

Підп. до друку 04.06.2013. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,6.
Обл.-вид. арк. 7,6. Тираж 50 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.