

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

КАЛІНСКИЙ ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

Допускається до захисту:  
завідувач кафедри інформаційних  
технологій,  
д.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Т.В. Нескородєва  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ВИВЧЕННЯ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ  
ПИЛУ ТА АЕРОЗОЛІВ У ПОВІТРІ**

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Кваліфікаційна (магістерська) робота

Науковий керівник:  
В. Г. Крижановський, професор  
кафедри інформаційних технологій,  
доктор технічних наук,  
професор

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Оцінка \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
(бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: \_\_\_\_\_

(підпис)

Вінниця 2022

## АНОТАЦІЯ

**Калінский П. В. Вивчення сенсорів IoT для вимірювання концентрації пилу та аерозолів у повітрі.** Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» Спеціалізації «Фізика» Освітньої програми «Технології інтернету речей» Донецький національний університет імені Василя Стуса Вінниця 2022.

У кваліфікаційній (магістерській) роботі досліджено роботу однопроменевого оптичного пиломіра. Наведено розрахунок схеми, та моделювання роботи.

Ключові слова: Пил, оптичний пиломір, аерозолі, Інтернет речей.

60 с., 24 рис., 27 джерела.

### ABSTRACT

**Kalinskyi P.V. Study of IoT sensors for measuring the concentration of dust and aerosols in the air.** Specialty 105 "Applied Physics and Nanomaterials" Specialization "Physics" of the Educational Program "Technologies of the Internet of Things" Vasyl Stus Donetsk National University Vinnytsia 2022.

In the qualification (master's) work, the operation of a single-beam optical sawmill was investigated. Calculation of the scheme and simulation of work are given.

Keywords: Dust, optical sawmill, aerosols, Internet of Things.

60 p., 24 fig., 27 source.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ПИЛ ТА АЕРОЗОЛІ У ПОВІТРІ .....	8
1.1 Основні положення.....	8
1.1.1 Класифікація пилу та аерозолів у повітрі.....	8
1.1.2 Стандарти якості атмосферного повітря .....	15
1.1.3 Дія пилу на організм людини.....	20
1.2 Вимірювання запиленості повітря.....	29
1.2.1 Методи визначення запиленості повітря.....	29
1.2.2 Прилади для виміру пилу в повітрі.....	30
1.2.3 Пиломіри в Інтернеті речей.....	36
1.3 Висновки до розділу .....	39
РОЗДІЛ 2 РОЗГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ОПТИЧНИХ ПИЛОМІРІВ.....	40
2.1 Метод роботи оптичного пиломіра .....	40
2.2 Елементи оптичного пиломіра.....	45
2.3 Висновки до розділу .....	49
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОГО ПИЛОМІРА .....	50
3.3 Висновки до розділу .....	55
ВИСНОВКИ .....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	57
ДОДАТОК А.....	60

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

**ТЕС** – Теплова електростанція

**ГДК** – Гранично допустима концентрація

**ОБРВ** – Орієнтовний безпечний рівень впливу

**ГДК<sub>мр</sub>** – Максимально разова гранично допустима концентрація

**ГДК<sub>сд</sub>** – Середньодобова гранично допустима концентрація

**ГОСТ** – Державний стандарт

**ГДК<sub>рз</sub>** – Гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони

**ГДК<sub>мр.рз</sub>** – Максимальна разова концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони

**ГДК<sub>сз.рз</sub>** – Середньозмінна гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони

**ГДК<sub>пн</sub>** – Гранично допустима концентрація шкідливої речовини біля промислового підприємства

**ОБРВ** – орієнтовно безпечні рівні впливу

**ТДК<sub>рз</sub>** – Тимчасово допустима концентрація хімічної речовини у повітрі робочої зони

**ОДК<sub>рз</sub>** – Орієнтовно допустима концентрація хімічної речовини у повітрі робочої зони

**ГДК<sub>пн</sub>** – Гранично допустима концентрація шкідливої речовини в атмосферному повітрі населеного пункту

**ГДК<sub>пн.мр</sub>** – Максимальна разова концентрація шкідливої речовини у повітрі населених місць

**ГДК<sub>пн.сд</sub>** – Середньодобова гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі населених місць

**ІЗА** – Індекс забруднення атмосфери

**AQI** – Air quality index (індекс якості повітря)

**ТЕЦ** – Теплова електростанція

**ХОЗЛ** – Хронічна обструктивна хвороба легень

**НІСМЯАП** – Національна інформаційна система моніторингу якості атмосферного повітря

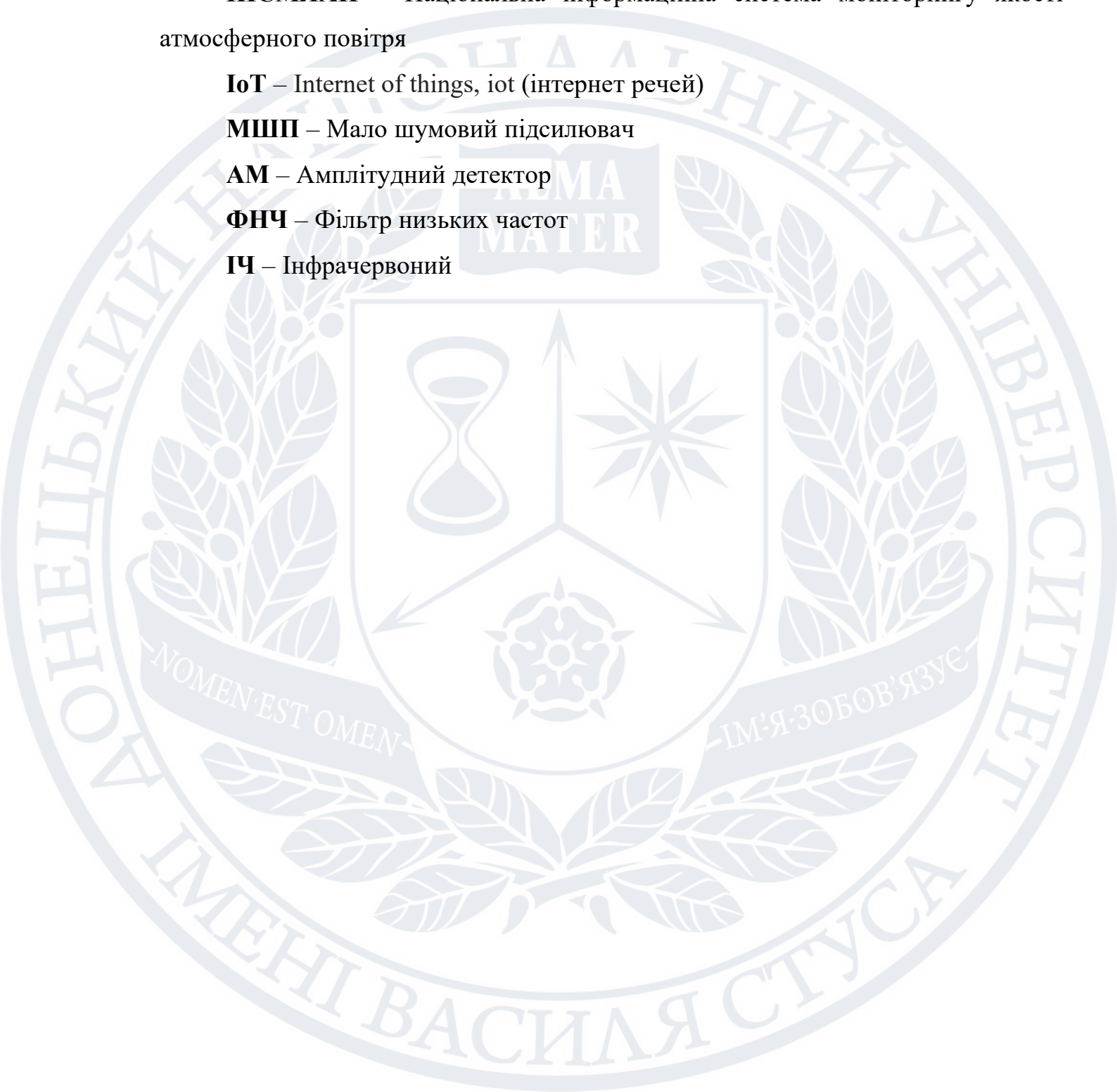
**ІоТ** – Internet of things, iot (інтернет речей)

**МШП** – Мало шумовий підсилювач

**АМ** – Амплітудний детектор

**ФНЧ** – Фільтр низьких частот

**ІЧ** – Інфрачервоний



## ВСТУП

Інтенсифікація та зростання обсягів виробництва, зумовлені науково-технічним прогресом та різким збільшенням населення Землі, незважаючи на вдосконалення технології та техніки очищення газових викидів та економічні санкції проти підприємств, що забруднюють атмосферу, спричинили збільшення загальної маси викидів шкідливих речовин. Найбільше викидів з аерозолів – аеродисперсні системи, що складаються з твердих або рідких частинок, зважених у повітрі. Аерозолі можна розподілити на пил, дим і туман. Наразі неможна проводити ефективне виробництво в більшості галузей промисловості без завдання шкоди для навколишнього середовища, саме в металургії, гірничному виробництві, в створенні та використанні будівельних матеріалів, що вимагає висліджуванням за викидами в атмосферу пилу і газу.

Виробничий пил є найпоширенішим шкідливим чинником виробничого середовища. Багато кількісні технологічні процеси і операції в виробництві, промисловості, при використанні транспорту, у сільському господарстві супроводжуються утворенням та виділенням пилу, впливу якого може діяти на велику кількість людей. Дуже багато пилу виникає при добуванні руди, та при вибухових роботах, у вугільній – при роботі комбайнів та породонавантажувальних машин, при сортуванні вугілля тощо. Вся промисловість будівельних матеріалів пов'язана з процесами дроблення, помолу, змішування та транспортуванні пилоподібної сировини та продукту (цемент, цегла, шамот та ін.). У нафтовій та газовій промисловості пильні роботи - буріння свердловин, електрозварювальні роботи, при неповному згорянні палива. У хімічній та нафтохімічній промисловостях багато виробництв (наприклад, каталізаторне) створюють багато пилу при роботі. У сільському господарстві пилу багато коли розпушують та удобрюють ґрунт, при використанні порошкоподібних пестицидів, очищенні зерна та насіння, бавовни, льону та ін. о може призвести до ураженню очей та шкіри, гострих та хронічних отруень

працівників. Деякі види виробничого пилу здатні до самозаймання і навіть вибуху, що дозволяє відносити пил не тільки до шкідливих, а й до небезпечних виробничих факторів. Тому боротьба з пилом є важливим гігієнічним та соціально-економічним завданням.

**Актуальністю дослідження** є те, що в умовах погіршення стану повітря важливо мати недорогий доступний прилад, щоб знати ступінь забруднення, і відреагувати на це.

**Метою дослідження** є сконструювати недорогий, легкий в втіленні прилад для оптимального виміру та зручного отримання результатів стану повітря.

**Завданням дослідження** є передача даних про стан повітря за допомогою інтернету речей.

**Об'єктом дослідження** є оцінка якості повітря за допомогою сенсорів інтернету речей

**Предметом дослідження** є сенсори виміру пилу

**Наукова новизна даної магістерської роботи** є створення недорогого, легкого в втіленні оптичного пиломіра для домашнього використання.

## РОЗДІЛ 1. ПИЛ ТА АЕРОЗОЛІ У ПОВІТРІ

### 1.1 Основні положення

#### 1.1.1 Класифікація пилу та аерозолів у повітрі

Запиленість повітря – важливий екологічний чинник. Пил може бути як токсичним, так і ні. Але навіть нетоксичний пил може адсорбувати на своїй поверхні газоподібні, пароподібні чи рідкі сполуки. Завдяки цьому змінюються його властивості та збільшується небезпека як для рослин, так і для тварин та людей. Пил стає небезпечним для людини коли має певну хімічну структуру, концентрацію, токсичний, здатний сорбувати забруднюючі речовини

Найбільше пилове забруднення повітря у містах спостерігається в місцях інтенсивного будівництва, поблизу промислових підприємств, ТЕС, пожвавлених автомагістралей. Для спостереження за станом повітря у містах встановлюють стаціонарні пости. Окрім концентрації хімічних сполук у повітрі визначають і вміст пилу та його гранулометричний склад.

Пил є дисперсною системою, в якій дисперсним середовищем є повітря, а дисперсною фазою тверді пилові частинки.

Пил – це аерозольна система, утворена твердими частинками диспергаційного походження. Частинки такого типу утворюються коли проходить дробіння твердих структур – дробленні руд та різних матеріалів, механічній обробці металів та інших речовин, при їх транспортуванні, перевантаженні та зберіганні, вітровій ерозії ґрунту та його сільськогосподарській обробці тощо.

Дим – аерозолі з твердими частинками, що утворилися в результаті конденсації перенасиченої пари, наприклад, при плавленні металів, їх зварюванні, горінні органічних речовин, а також в результаті хімікотехнологічних процесів. Іноді дим містить кілька рідких аерозольних частинок.

Туман - атмосферне явище, скупчення води в повітрі утворене дрібними



частинками водяної пари (при температурі повітря вище  $-10^{\circ}\text{C}$  - крапельки води, при  $-10 \dots -15^{\circ}\text{C}$  - суміш крапель води і кристаликів льоду, при температурі нижче  $-15^{\circ}\text{C}$  — кристалики льоду, що сяють у сонячних променях або у світлі місяця та ліхтарів) [1].

Пил може бути класифікований за декількома ознаками, у тому числі за своїм походженням.

Пилові часточки можуть мати різні розміри, колір, хімічну природу, форму. За розміром часток пил можна розподілити на тонкодисперсний (легкі і рухомі часточки розміром до кілька десятків мікрометрів, які довго утримуються в повітрі і в разі вдихання людиною можуть накопичуватися в легенях) та грубодисперсний (великі та важкі частки, що швидко осаджуються). Хімічний склад пилу залежить від походження – часточки сажі, металів, цементу тощо. За формою часточки пилу можуть бути як округлими правильної форми, так і мати гострі кути. Потрапляючи на листя дерев, вони не лише створюють перешкоду для проходження сонячного світлового потоку, знижуючи інтенсивність фотосинтезу і первинну продуктивність рослин, а й можуть завдавати механічних пошкоджень гострими краями або спричиняти опіки та отруєння.

Залежно від походження розрізняють пил природного та антропогенного походження [2].

Пил натурального походження є той, що створюється при ерозії ґрунту, при вивітрюванні гористих порід, космічний пил і т. д. Пил який забруднює атмосферу з натуральних джерел є мало впливаючим і по суті фоновим. Пил натурального походження набуває важливу роль тільки тоді, коли його використовують в вентильованих приміщеннях.

Основними джерелами антропогенного забруднення атмосферного повітря є автотранспорт та енергетика. Рівень забруднення атмосфери антропогенними джерелами може змінюватися з часом.

Практично на будь-якому виробництві відбуваються процеси, при яких створюється пил: роздробляти, подрібнення твердих продуктів, шліфування, пересування сипких матеріалів. Відповідно кожне виробництво

характеризується своїм складом пилу, який може впливати на організм людини [2].

Від джерела залежить який пил буде органічний чи неорганічний. У свою чергу органічний пил буває рослинного (деревна, бавовняна, борошняна, тютюнова, чайна і т. д.) та тваринного (вовняна, кістяна та ін) походження.

Неорганічний пил підрозділяється на мінеральну (кварцова, цементна та ін.) та металеву (сталева, чавунна, мідна, алюмінієва та ін.).

Велика складова пилу в промисловості – виходить різного складу, може бути з частинок неорганічних і органічних. Якщо частинки органічні, то може мати мінерального і металевого пилу. Наприклад, пил, що виділяється при шліфуванні деревних виробів, крім деревних частинок, містить мінеральні частинки, що утворюються при взаємодії оброблюваного матеріалу та знарядь його обробки (абразивної стрічки тощо). Це потрібно враховувати при виборі методів очищення та пиловловлюючого обладнання.

Пил може бути дратівливим і отруйним. До дратівливого пилу відносять: кварцові, цементні, металеві, дерев'яні. До отруйного виробничого пилу відносять пил миш'яку, триоксиду хрому, берилієвий, свинцевий пил та ін. Такий пил може розчинятися в слині і проникати в слизові оболонки дихальних шляхів, діючи як рідку отруту.

Шкідливий вплив пилу залежить від таких факторів як: розміри пилових частинок, форма порошин, здатності пилу адсорбувати отруйні гази, електрзарядженості, розчинність пилових частинок, а також від хімічного складу.

За дисперсністю пилу класифіковано на п'ять груп:

- 1) Дуже великодисперсний пил, розміри понад 140 мкм;
- 2) Великодисперсний пил (40...140 мкм);
- 3) Середньодисперсний пил (10...40 мкм);
- 4) Дрібнодисперсний пил (1...10 мкм);
- 5) Дуже дрібнодисперсний пил (менше 1 мкм).

Аерозолі за своїм походженням діляться на аерозолі природного

походження та штучні аерозолі. Якщо природних утворюється близько 1850 млн. т. на рік, то результати господарської діяльності людства їх щорічно викидається 800 млн. тонн. Найчастіше навіть неотруйний пил, за рахунок водяної плівки, може абсорбувати токсичні пари та гази.

Науково доведено, що найбільшу небезпеку для організму людини становлять пилові частинки з розміром від 0,5 до 10 мкм, оскільки вони здатні проникати до органів дихання та затримуватися там. Більші частинки затримуються слизовою оболонкою верхніх дихальних шляхів і виводяться при чханні та кашлі. Дрібніші частинки виводяться при видиху

За формою порошин найбільш небезпечними є частинки із зазубреними краями та голчасті (скляні, металеві, азбестові) [2].

Деякі види пилу можуть адсорбувати отруйні гази, після чого неотруйний пил може виявитися отруйним. Наприклад, вугільний пил та сажа сорбують оксид вуглецю.

Розчинність пилу є позитивною властивістю, якщо пил не отруйний. В іншому випадку, це негативний фактор, оскільки цей пил може прискорювати процес потрапляння отрути в кров.

Зважені повітря пилові частинки можуть нести як позитивний, і негативний заряд. Одноіменно заряджені частинки відштовхуються один від одного і можуть тривалий час перебувати у повітрі. Різноїменно заряджені частинки притягуються, злипаються і швидко осідають. Питання гігієнічного та біологічного впливу електрзарядженості на організм людини вивчені недостатньо. Однак, припускають, що пил, що має негативний заряд, має більш негативний вплив, оскільки збільшує загальну кількість пилу в організмі.

Якщо в повітрі робочої зони знаходиться кілька шкідливих речовин, то вони можуть надавати адитивний, потенційований, антагоністичний або незалежний вплив на організм людини.

Адитивну дію мають речовини, які надають односпрямований вплив на ті самі системи організму. Причому, при кількісно однаковій заміні компонентів один одним токсичність суміші не змінюється.

При потенційованій дії один із компонентів суміші посилює дію іншого. Наприклад, алкоголь підвищує небезпеку отруєння аніліном.

При антагоністичній дії один із компонентів суміші послаблює дію іншого.

При незалежній дії комбінований ефект не відрізняється від ізольованої дії кожної шкідливої речовини окремо, причому переважає ефект найбільш токсичної речовини.

З метою виключення та зменшення несприятливого впливу пилу на людину та навколишнє середовище її допустиме утримання в повітрі виробничих приміщень обмежується. Так, вміст пилу у повітрі робочої зони обмежується встановленим рівнем гранично допустимих концентрацій (ГДК)

ГДК - це така концентрація речовини в повітрі робочої зони, яка при щоденній роботі протягом 8 годин працюючи постійно не може визвати хвороби чи патологій у стані здоров'я, які діагностуються наразі.

У період попередній проектування промислового об'єкта встановлюють орієнтовний безпечний рівень впливу (ОБРВ).

Зазвичай встановлюється два типи ГДК - це максимально разова (ГДК<sub>мр</sub>) та середньодобова (ГДК<sub>сд</sub>). ГДК<sub>мр</sub> відноситься в основному до 30 хвилинного інтервалу часу. Вона визначає ступінь короточасного впливу домішки на організм людини. Таким чином, ГДК<sub>мр</sub> - це така концентрація, -при вдиханні якої протягом 30 хвилин у людини не повинно спостерігатися рефлексорних реакцій у відповідь (кашель, чхання, слезотеча).

ГДК<sub>сд</sub> - це середня з числа концентрацій, виявлених протягом доби або відбирається протягом 24 годин на різній відстані від джерела викиду при максимальних навантаженнях обладнання та найбільш несприятливих метеорологічних умовах на лінії, що є проекцією димового струменя на поверхню землі.

Поряд із величинами ГДК у гігієнічних нормативах вказується клас небезпеки, переважний агрегатний стан речовини в повітрі в умовах виробництва, а також особливості його на організм.

За рівнем впливу на людини шкідливі речовини поділені на чотири класи

небезпеки:

- 1 – Речовини надзвичайно небезпечні,
- 2 – Речовини високо небезпечні,
- 3 – Речовини помірно небезпечні,
- 4 – Речовини мало небезпечні.

Властивості пилу:

#### 1. Змочування пилу.

Різні види промислового пилу мають різну змочуваність, яка істотно впливає на ефективність мокрих пиловловлювачів, особливо при роботі з рециркуляцією. Гладкі частинки змочуються краще, ніж частинки з нерівною поверхнею, тому що останні більшою мірою виявляються покритими абсорбованою газовою оболонкою, що ускладнює змочування. Змочуваність визначають методом плівкової флотації. Він полягає в тому, що в посудину з дистильованою водою висипають навішування пилу. Визначають кількість осілого (затонулого) пилу. Про змочуваність пилу судять за часткою затонулих частинок;

#### 2. Електричні властивості пилу.

Впливають на ефективність роботи електрофільтрів, а також на поведінку пилу в газоходах і в пиловловлюючих апаратах, на вибухонебезпечність та адгезійні властивості, у тому числі і на сипкість пилу. Електричні властивості пилу залежать від фізико-механічних та хімічних властивостей (форма, дисперсність тощо), а також від зовнішніх факторів – температури, вологості тощо. Основними електричними властивостями пилу є питомий електричний опір та електричний заряд пилу;

#### 3. Горючість та вибуховість пилу.

Здатність утворювати з повітрям вибухонебезпечну суміш і здатність до займання є найважливішими негативними властивостями багатьох видів пилу. Пил, що знаходиться у зваженому стані в повітрі приміщень, вибухонебезпечний. Осілий пил (гель) пожежонебезпечний.

#### 4. Коагуляція (агрегування, агломерація).

Укрупнення зважених частинок. Цей процес відбувається в результаті взаємодії частинок під впливом різноманітних фізичних факторів. Найбільша роль коагуляції належить молекулярним силам і силам електричного тяжіння.

#### 5. Щільність частинок пилу.

Щільність - маса одиниці об'єму,  $\text{г/см}^3$  або  $\text{кг/м}^3$ . Від щільності частинок пилу залежить ефективність її осадження в гравітаційних та відцентрових пиловловлювачах. Існує: істинна щільність (маса одиниці об'єму частинок, що не мають пір); щільність (маса одиниці об'єму частинок, включаючи обсяг закритих пор); об'ємна щільність (маса одиниці об'єму частинок, включаючи об'єм закритих та відкритих пор); насипна щільність (маса одиниці об'єму уловленого пилу, вільно насипаного в якусь ємність безпосередньо після її заповнення); насипна щільність при струшуванні (маса одиниці об'єму пилу при щільній упаковці частинок, що досягається шляхом струшування).

Під питомою поверхнею пилу розуміють відношення поверхні всіх частинок до їх маси чи обсягу. Значення питомої поверхні дозволяє будувати висновки про дисперсності пилу. Від питомої поверхні залежать багато властивостей пилу та пилоподібних матеріалів, наприклад, міцність бетону, горіння пилоподібного палива. Визначення питомої поверхні пилу ґрунтується на залежності її повітропроникності від шару пилу (пилоподібного матеріалу).

#### 6. Вміст вологи в пилу виражає вміст вологи або вологість.

Вологовміст - відношення кількості вологи в пилу до кількості абсолютно сухого пилу.

Вологість - відношення кількості вологи в пилу до всієї кількості пилу.

Здатність пилу вбирати вологу залежить від хімічного складу, розміру, форми та ступеня шорсткості поверхні частинок. Гігроскопічність сприяє їх уловлюванню в апаратах мокрого типу.

#### 7. Дисперсний склад

Розподіл частинок аерозолів за розмірами. Найбільший та найменший розміри частинок характеризують діапазон дисперсності даного пилу. Великий пил осідає з газового потоку швидше за дрібний і може бути уловлений в апараті

найпростішого типу. Для очищення газу від дрібного пилу часто потрібно не один, а кілька апаратів, встановлених послідовно по ходу газів. Розсіювання пилових частинок у повітрі також значною мірою визначається дисперсним складом пилу.

#### 8. Система аспірації

Це пиловідсмоктувальна вентиляція, що відсмоктує пильне повітря 1 кг на 1 м<sup>3</sup>.

Концентрація пилу у повітрі сховищ не повинна перевищувати санітарних норм, встановлених ГОСТ 7.50-2002: максимально разова концентрація пилу у повітрі приміщень – 0,5 мг/м<sup>3</sup>, середньодобова – 0,15 мг/м<sup>3</sup>. Повітря в приміщенні приблизно в 5 разів запилене вуличного. Усередині приміщень пил утворюється при старінні, руйнуванні та стиранні стін, підлоги, різних матеріалів. У фондосховищах джерелами пилу є також і документи, що стираються в процесі зберігання та використання.

#### *1.1.2 Стандарти якості атмосферного повітря*

Для збереження чистоти атмосфери необхідний ретельний та робочий контроль за станом забрудненого повітря. Стан запиленості повітря не є постійним в часі та просторі та визначається наступними факторами:

- Особливостями джерел емісії забруднювачів (тип джерела, природа та властивості речовин які забруднюють повітря, та розмір викиду);
- Дія метеорологічних та топографічних факторів (напрямок та швидкість вітру, температурні інверсії, атмосферний тиск, вологість повітря, рельєф місцевості та віддаленість до джерела забруднення).

Щоб знати яке повітря вважається забрудненим, потрібно мати стандарти якості повітря, з урахуванням яких здійснюються заходи щодо збереження чистоти довкілля. Наявність стандартів якості повітря дозволяє спрямовувати зусилля щодо оздоровлення атмосферного повітря раціональніше, тобто на заходи в тих місцях, та стан забруднення вище прийнятого ГДК.

Для санітарної оцінки повітря користуються такими критеріями

визначення ГДК:

- ГДКрз – гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони, що виражається у  $\text{мг}/\text{м}^3$  (у повітрі робочої зони визначають ГДК<sub>мр.рз</sub> та ГДК<sub>сз.рз</sub>);
- ГДК<sub>мр.рз</sub> – максимальна разова концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );
- ГДК<sub>сз.рз</sub> – середньозмінна гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );
- ГДК<sub>пп</sub> – гранично допустима концентрація шкідливої речовини біля промислового підприємства (зазвичай приймається  $\text{ГДК}_{\text{пп}} = 0,3 \text{ ГДК}_{\text{рз}}$ );
- ОБРВ – орієнтовно безпечні рівні впливу (для хімічних речовин, на які ГДК не встановлені, повинні переглядатися через кожні два роки з урахуванням накопичення даних про здоров'я працюючих або замінювати ГДК);
- ТДКрз – тимчасово допустима концентрація хімічної речовини у повітрі робочої зони (тимчасовий галузевий норматив на 2–3 роки);
- ОДКрз – орієнтовно допустима концентрація хімічної речовини у повітрі робочої зони;
- ГДК<sub>нп</sub> – гранично допустима концентрація шкідливої речовини в атмосферному повітрі населеного пункту (у повітрі населених місць визначають ГДК<sub>мр</sub> та ГДК<sub>сд</sub>);
- ГДК<sub>нп.мр</sub> – максимальна разова концентрація шкідливої речовини у повітрі населених місць ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );
- ГДК<sub>нп.сд</sub> – середньодобова гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі населених місць ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ).

При встановленні ГДК<sub>рз</sub> та ГДК<sub>нп</sub> має значення відмінний характер впливу речовини на виробництві і в місці проживання. Знаючи що в працюючій зоні вже заміряні речовини які впливають на організм, і там перебувають дорослі, пройшовші медичне обстеження і час впливу обмежений тривалістю



робочого дня та стажем. При формулюванні ГДК<sub>нп</sub> обліку враховують чинники: речовина впливає двадцять чотири години на добу та протягом усього життя на всіх людей (дорослих та дітей, здорових та хворих). Тому для того самого забруднювача ГДК<sub>рз</sub> у десятки і навіть сотні разів вище, ніж ГДК<sub>нп</sub>.

Атмосферні забруднювачі за класифікацією шкідливих речовин за ступенем токсичності та небезпеки відносяться до чотирьох класів небезпеки:

- 1-й клас – надзвичайно небезпечні (бенз(а)пірен, свинець та його сполуки);
- 2-й клас – високонебезпечні (NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HNO<sub>3</sub>);
- 3-й клас – помірно небезпечні (пил неорганічний, сажа, SO<sub>2</sub>);
- 4-й клас – малонебезпечні (бензин, CO).

Якість повітря оцінюється на порівнянні фактично вимірної концентрації з ГДК.

При одночасному присутності кількох забруднюючих речовин, що сумуються, їх безрозмірна концентрація  $X$  не повинна перевищувати одиницю[18]:

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\text{ГДК}_i} \leq 1 \quad (1.1)$$

При значної кратності перебільшення ГДК, стан повітря погіршується. Чим більше безрозмірний показник  $X$  для речовин з адитивними діями, то гірша якість повітря.

На практиці повітря має за часту декілька речовин, які його забруднюють. При оцінці якості повітря використовується комплексний показник  $I$  – індекс забруднення атмосфери (ІЗА), який дорівнює сумі нормованих за ГДК та приведених до концентрації діоксиду сірки середніх вмістів забруднюючих речовин

Для однієї речовини[18]:

$$I = \left( \frac{\bar{c}}{\text{ГДК}_{\text{сд}}} \right)^k \quad (1.2)$$

Де,

$\bar{c}$  – середня протягом року концентрація, мг/м<sup>3</sup>;

ГДКсд – середньодобова ГДК, мг/м<sup>3</sup>, у разі відсутності замість неї приймається ГДКмр або ОБРВ;

$k = 1,7$  (клас небезпеки 1);

$k = 1,3$  (клас небезпеки 2);

$k = 1,0$  (клас небезпеки 3);

$k = 0,9$  (клас небезпеки 4).

Для кількох речовин[18]:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{c_i}{\text{ГДКсд}} \right)^{k_i} \quad (1.3)$$

Класи екологічного стану атмосфери визначають за чотирибальною шкалою (таблиця 1.1), де клас норми відповідає рівню забруднення нижче середнього за шкалою, клас ризику дорівнює середньому рівню, клас кризи вищий за середній рівень. Розподілення стану атмосфери за екологічними показниками, за класами забруднення відбувається розраховуючи комплексний індекс забруднення атмосфери.

Таблиця 1.1 – Клас екологічного забруднення атмосфери

Клас екологічного забруднення атмосфери	I
Норма	<5
Ризик	5 – 8
Криза	8 – 15
Лихо	>15

AQI – це національний уніфікований кольоровий індекс для звітності та прогнозування щоденної якості повітря. Він використовується для звітування про найпоширеніші забруднювачі навколишнього повітря, які регулюються Законом про чисте повітря: озон приземного рівня, забруднення частинками (PM<sub>10</sub> і PM<sub>2,5</sub>), монооксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>) і діоксид сірки (SO<sub>2</sub>). AQI розповідає громадськості, наскільки чисте або забруднене повітря і як уникнути наслідків для здоров'я, пов'язаних із поганою якістю повітря.

AQI зосереджується на впливах на здоров'я, які можуть виникнути протягом кількох годин або днів після вдихання забрудненого повітря, і використовує нормовану шкалу від 0 до 500; чим більше значення AQI, тим більше стан забруднення і тим більше занепокоєння для здоров'я. Значення AQI 100, як правило, відповідає рівню короткострокового національного стандарту якості атмосферного повітря для забруднювача. Значення AQI на рівні 100 і менше, як прийнято, можна рахувати задовільними. Коли AQI більше 100, якість повітря вважається нездоровою, спочатку для представників груп населення з найбільшим ризиком впливу на здоров'я, а потім для всього населення в міру того, як значення AQI стають вищими (понад 150).

Розрахування індексу якості атмосферного повітря потребує наявності інформації про стан забруднення за визначений середній період, одержаний з газоаналізаторів моніторингу якості атмосферного повітря чи одержаних методом обчислення (але це є не таким точним методом визначення стану забруднення атмосфери). Беруться разом концентрація та час розповсюдження в атмосфері, речовин які її забруднюють. Епідеміологічні дослідження показують вплив забруднення на здоров'я. Показники шкоди повітря ділять за силою та функцією використовуваної для того, щоб конвертувати забруднювач повітря в індекс якості повітря варіюється по забруднювачу. Індекс якості атмосферного повітря переважно організовуються за рівнями, різні рівні мають свої ознаки та характеристики, колірний код та стандартизоване інформаційне повідомлення про вплив на громадське здоров'я.

Індекс якості повітря може збільшитися з-за багатьох факторів таких як, дорожній рух в час пік, під час пожеж, відсутності вітру, або браку розріджувачів забруднювачів повітря. Нерухоме повітря часто викликане антициклоном, інверсією температури чи не сильною швидкістю вітру, що дає можливість забруднювачам повітря знаходитись в одному місці в одному місці, що приводить до збільшення забруднюючих речовин в атмосфері, а також хімічною реакцією між забруднювальними речовинами в атмосфері.

У день коли рівень індексу якості повітря згідно з передбачуваними

розрахунками може зрости агенція або організація охорони здоров'я зобов'язана:

- Пропонувати чутливим общинностям: людям літнього віку, дітям, тим у кого є респіраторні або кардіо хвороби, не займатись фізичними навантаженнями на відкритому повітрі.
- Вибрати день і запропонувати людям не використовувати машини, а їздити на громадському транспорті, щоб зменшити викиди шкідливого повітря.
- Порадити респіраторні маски, щоб уникнути попадання тонкодисперсних частинок у легені.

Під час періоду дуже низької якості повітря, у разі забруднення повітря в певному місці, місті, районі, коли індекс якості атмосферного повітря демонструє, потужний вплив може спричинити до істотної шкоди здоров'ю населення, агенція або уповноважений орган можуть ввести надзвичайний план, який їм дозволить у наказовому порядку, основним забруднювачам повітря такі як ТЕС, ТЕЦ, виробництва, що спалюють вугілля, газ, та інші зменшити викиди до такого розміру, поки шкідливі умови будуть мінімальні.

### ***1.1.3 Дія пилу на організм людини***

Пил розглядається як щось дратівливе, а не шкідливе. Він є практично скрізь, тому ми насправді не приділяємо йому достатньої уваги — чи не замислюємося про те, як надмірне вплив пилу на робочому місці може призвести до погіршення здоров'я. І не весь пил є безпечним. Пил насправді дуже небезпечна речовина, яка впливає на життя мільйонів людей.

Повітря, яким ми дихаємо в приміщенні та на вулиці, завжди містить частинки забруднення. Деякі частинки, такі як пил, бруд, кіптява або дим, досить великі, щоб їх можна було побачити неозброєним оком. Інші настільки малі, що їх можна виявити лише за допомогою електронного мікроскопа (рис 1.1)[24].

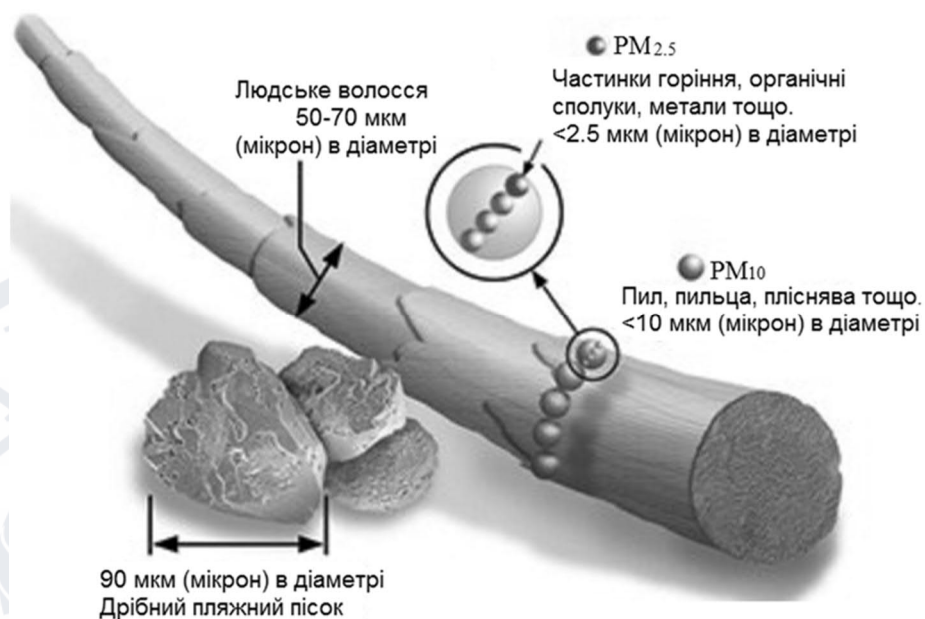


Рисунок 1.1 – Розмір частинок забруднення

Повітряний пил становить серйозну небезпеку для здоров'я людини. Розмір частинок пилу є ключовим фактором, що визначає потенційну небезпеку для здоров'я людини. Частинки розміром більше 10 мкм не пропускають повітря, тому можуть пошкодити лише зовнішні органи, в основному викликаючи подразнення шкіри та очей, кон'юнктивіт та підвищену сприйнятливість до очної інфекції. Частинки, що вдихаються, розміром менше 10 мкм, часто потрапляють у ніс, рот і верхні дихальні шляхи, тому можуть бути пов'язані з респіраторними розладами, такими як астма, трахеїт, пневмонія, алергічний риніт та силікоз. Однак більш дрібні частинки можуть проникати в нижні дихальні шляхи і потрапляти в кров, де вони можуть вражати всі внутрішні органи і бути відповідальними за серцево-судинні розлади. Оцінка глобальної моделі 2014 року підрахувала, що вплив частинок пилу спричинив близько 400 000 передчасних смертей від серцево-легеневих захворювань серед населення старше 30 років [3].

Частинки, що викликають занепокоєння, можна згрупувати у дві основні категорії:

- Крупні частинки (також відомі як PM<sub>10-2,5</sub>): частинки, діаметр яких зазвичай перевищує 2,5 мкм, і менший або дорівнює 10 мкм в діаметрі. Термін «великі грубі частинки» відноситься до частинок

діаметром більше 10 мкм.

- Дрібні частинки (також відомі як PM<sub>2,5</sub>): частинки, як правило, діаметром 2,5 мкм або менше. Ця група частинок також включає наддрібні та наночастинки, які зазвичай класифікуються як такі, що мають діаметр менше 0,1 мкм.

Дрібні та крупні частинки відрізняються за своїм джерелом, складом, дозиметрією (осадження та затримка в дихальній системі) та впливом на здоров'я, як це спостерігається в наукових дослідженнях. Хоча часто припускають, що конкретні компоненти або джерела можуть бути відповідальними за смертність і захворюваність, пов'язану з забрудненням частинками, наявних доказів недостатньо, щоб дозволити диференціювати ті компоненти або джерела, які більш тісно пов'язані з конкретними результатами здоров'я. Швидше, загальні дані вказують на те, що багато компонентів забруднення частинками можуть бути пов'язані з такими ефектами.

Як гострі, так і хронічні забруднення частинками можуть бути пов'язані з різними проблемами здоров'я. Численні наукові докази показують, що вплив дрібних частинок може спричинити серцево-судинні наслідки, включаючи серцеві напади, серцеву недостатність та інсульти, що призводить до госпіталізації, відвідувань відділення невідкладної допомоги та, в деяких випадках, до передчасної смерті. Наукові дані показують, що вплив дрібних частинок також може викликати респіраторні ефекти, включаючи напади астми, що призводять до госпіталізації та відвідувань відділення невідкладної допомоги, зниження розвитку легенів у дітей та посилення респіраторних симптомів, таких як кашель, хрипи та задишка. Існують більш обмежені наукові докази щодо більш широкого спектру впливу на здоров'я, пов'язаного з впливом дрібних частинок (наприклад, вплив на розвиток і репродуктивну функцію, рак).

Хоча загальний рівень впевненості у взаємозв'язку впливу на здоров'я різниться залежно від досліджених наслідків для здоров'я, епідеміологічні дослідження показали, що зв'язок між забрудненням частинками та захворюваністю та смертністю не обмежується гострими наслідками в дні

високого забруднення повітря але також може виникати внаслідок хронічного впливу забруднюючих частинок. Це було додатково продемонстровано в дослідженнях як гострого, так і хронічного впливу, які відображають чіткий взаємозв'язок концентрації та реакції у широкому діапазоні концентрацій забруднення частинками, включаючи ті концентрації забруднення частинками, які спостерігаються протягом звичайного дня.

Хоча не всі групи людей реагують на вплив забруднення повітря однаково, вплив забруднення частинками може спричинити ряд наслідків для здоров'я в різних групах населення. Чутливі групи, які також називають групою ризику, мають підвищений ризик зазнати поганих результатів для здоров'я, виниклих через брудне повітря. Ці групи можуть бути у групі підвищеного ризику через внутрішні (біологічні) фактори, зовнішні (зовнішні, небіологічні) фактори, більш високу експозицію та/або збільшення дози при даній концентрації. Серйозність наслідків для здоров'я, які мають ці групи, може бути набагато більшою, ніж у населення в цілому.

Докази щодо факторів, які підвищують ризик від забруднення частинками, надходять із токсикології тварин, контрольованих досліджень на людях та епідеміологічних досліджень. До чутливих груп, які, як вважають, мають підвищений ризик впливу забруднення частинками на здоров'я, належать люди із захворюваннями серця або легенів, діти (менше 18 років), люди похилого віку, люди з цукровим діабетом та люди з нижчим соціально-економічним статусом. Хоча докази менш чіткі щодо впливу забруднення частинками на здоров'я вагітних жінок і плода, що розвивається, під час подій із високим вмістом частинок, таких як епізод диму, варто рекомендувати заходи, які можуть зменшити вплив частинок.

Дорослі з діабетом можуть відчувати хронічне запалення, яке може підвищити їхню чутливість до несприятливих наслідків для здоров'я, пов'язаних із впливом забруднених частинок. Зростаюча кількість наукових даних вказує на те, що дорослі з діабетом зазнають змін у серці (наприклад, варіабельність серцевого ритму) та функції судинної мережі, а також маркери запалення у

відповідь на гостру дію дрібних частинок. Ці зміни в серцево-судинній системі можуть призвести до більш явних наслідків для здоров'я, в деяких випадках призводячи до госпіталізації через серцево-судинні захворювання або передчасну смертність.

Симптоми не є надійним показником того, чи є забруднення частинками шкідливим для здоров'я. Негайних симптомів може не бути навіть при відносно високих концентраціях впливу.

Людина з респіраторним захворюванням може бути не в змозі дихати так глибоко або так енергійно, як зазвичай, і може відчувати кашель, дискомфорт у грудях, хрипи, задишку та незвичайну втому. Для людини з серцево-судинними захворюваннями вплив шкідливих для здоров'я рівнів забруднення частинками може не викликати жодних змін у респіраторних симптомах, але все одно може викликати серйозні проблеми протягом короткого періоду часу, включаючи серцеві напади.

Існує три основних механізми відкладення часток в дихальних шляхах:

- Вплив – грубі частинки в основному відкладаються в носових, глоткових і гортанних ходах, трахеї та бронхах.
- Осідання - дрібні частинки в основному відкладаються в дихальних бронхіолах і альвеолах.
- Дифузія - наддрібні частинки дифундують до дихальних поверхонь і осідають.

Інші механізми, такі як перехоплення, важливі лише для подовжених частинок або волокон, коли край частки стосується дихального проходу та осідає.

Перенесення і відкладення частинок у дихальних шляхах змінюються в залежності від фізіологічних факторів, таких як частота дихання, і від характеристик частинок, таких як розмір. В результаті частинки можуть осідати в трьох різних областях дихальної системи:

- Позагрудні (носові, глоткові та гортанні ходи).



- Трахеобронхіальний.
- Альвеолярна (легенева).

Грубі частинки (частинки з діаметром, як правило, більше 2,5 мкм і меншим або рівним 10 мкм в діаметрі), які проникають за межі носоглотки, відкладаються у великих дихальних шляхах, насамперед у трахеобронхіальній області. Високі лінійні швидкості в бронхах спричиняють концентрацію грубих частинок у зонах найвищого впливу, біфуркації дихальних шляхів. Схильні до пошкодження епітелію і навіть до метаплазії, ці «гарячі точки» також мають високу щільність частинок на площу поверхні тканини. Додаткові гарячі точки можуть утворюватися в місцях із надлишковим накопиченням або надлишковим виробленням слизу або коли в дихальних шляхах спостерігається ненормальне зростання, що порушує потік повітря.

Більш глибоке дихання сприяє відкладенню забруднень на периферії (тобто в дрібних дихальних шляхах і альвеолах); швидке поверхнєве дихання сприяє більш центральному відкладенню (тобто в трахеї та великих бронхах). Під час спокійного дихання більшість з нас дихає через ніс, який діє як перший у ряді захисних механізмів. Завдяки вузьким повітряним ходам, складкам слизової оболонки та слизовому шару, що покриває війчасті епітеліальні клітини, ніс може ефективно фільтрувати більшість грубих частинок.

Дрібні частинки (зазвичай діаметром 2,5 мкм або менше) і наддрібні частинки (діаметром менше 0,1 мкм) в основному відкладаються в малих периферичних дихальних шляхах і альвеолах (легенева область). Велика частина дрібних і наддрібних частинок, які досягають дрібних дихальних шляхів і альвеол, залишаються у зваженому стані в дихальних шляхах і згодом видихаються.

Дрібні частинки, що вдихаються, що осідають на поверхні дихальних шляхів, можуть залишатися неушкодженими або частково або повністю розчинятися. Відкладені дрібні частинки забруднення очищаються за допомогою двох механізмів:

- Мукоциліарний кліренс.
- Фагоцитоз.

Мукоциліарний кліренс, перша і найбільш критична лінія захисту легеневої системи від дрібних частинок, видаляє переважну більшість вдихуваних частинок, що відкладаються в трахеобронхіальних дихальних шляхах. Ця система отримує додаткову підтримку від кашлю, імунологічного, фагоцитарного та ферментативного захисту організму. Мукоциліарний ескалатор трахеобронхіальних дихальних шляхів дуже ефективно переміщує частинки до носоглотки. Там слиз, насичений частинками забруднення, ковтається або відхаркується.

За нормальних умов мукоциліарний транспорт у здорових людей очищає більшість нерозчинних частинок протягом 24 годин після осадження. Коли нормальний кліренс порушується (як у випадку багатьох хронічних станів, таких як куріння або респіраторних захворювань, таких як астма та хронічна обструктивна хвороба легень (ХОЗЛ)), затримка забруднення збільшується, а негативні наслідки для здоров'я посилюються.

Фагоцитоз є основним механізмом очищення для видалення будь-якого стороннього матеріалу (частинок, мікроорганізмів) з альвеолярної області. Фагоцити (тобто макрофаги, моноцити та поліморфно-ядерні лейкоцити) присутні в усьому дихальних шляхах. Альвеолярні макрофаги є особливо важливими і видаляють частинки після фагоцитозу шляхом міграції в трахеобронхіальні дихальні шляхи або в інтерстицій, щоб досягти лімфатичної системи. Ефективність фагоцитозу зменшується зі зменшенням розміру частинок нижче приблизно 1 мкм, і частинки можуть утримуватися в альвеолярній області протягом кількох років.

Інші механізми також видаляють дрібні частинки з нижніх дихальних шляхів. Деякі частинки переміщуються з поверхні епітелію в інтерстицій, де вони можуть потрапляти в легеневий лімфоток з транспортуванням до лімфатичних вузлів і згодом досягати крові та інших органів (наприклад, серця

або мозку). У дослідженнях на тваринах невелика частина (<1%) нерозчинних ультрадисперсних частинок, що відкладаються в легенях, швидко (<1 години) переміщується з альвеолярної області безпосередньо в кров. Ці частинки транспортуються до інших органів, головним чином до печінки, селезінки, нирок і в меншій мірі до серця і мозку. Існують численні експериментальні дані на гризунах щодо прямого переміщення нерозчинних частинок (<0,2 мкм у діаметрі) у кров. Однак дослідження на людях з використанням радіоактивно мічених частинок не виявили транслокації нерозчинних частинок в таких органах, як печінка, хоча можливо це зв'язано з маленькою кількістю, що потрапляє в кров. Незважаючи на ці додаткові шляхи очищення, деякі частинки накопичуються в легенях, залишаючись там назавжди.

Дихальні шляхи є не тільки домінуючим порталом для проникнення в повітря забруднюючих речовин, але він також служить місцем ініціації наступних нервових, серцевих і судинних реакцій. Повторний, частий вплив забруднення частинками може перевантажити легеневу захисну систему, що призведе до більш серйозної місцевої та системної реакції.

Популяційні дослідження, панельні дослідження невеликих повторних вимірювань та дослідження гострого впливу на людей підтверджують висновок, що вдихання забруднених частинками викликає невеликі зміни кров'яного тиску, насичення киснем, функції ендотелію, системні зміни реагентів гострої фази, факторів згортання, запальних процесів медіатора та заходи окисного стресу. Системний артеріальний тиск та зміни функції ендотелію, гострий коронарний синдром (включаючи інфаркт міокарда та нестабільну стенокардію), посилення шлуночкових аритмій у людей з імплантованими (або внутрішніми) серцевими дефібриляторами, загострення серцевої недостатності, ішемічний інсульт та серцево-судинна смертність – все це стабільні клінічні наслідки для серцево-судинної системи, пов'язані з гострим впливом дрібних частинок.

Деякі інфекційні захворювання можуть передаватися через пил. Менінгококовий менінгіт, бактеріальна інфекція тонкого шару тканин, що оточує головний і спинний мозок, може призвести до пошкодження мозку і, якщо

його не лікувати, до смерті в 50% випадків. Спалахи захворювання відбуваються в усьому світі, але найбільша захворюваність спостерігається в «поясі менінгіту», частині Африки на південь від Сахари з населенням приблизно 300 мільйонів чоловік. Ці спалахи мають яскраво виражений сезонний характер – багато досліджень пов'язують умови навколишнього середовища, такі як низька вологість і запилення, з часом і місцем інфекцій [4]. Дослідники вважають, що вдихання частинок пилу в жарку суху погоду може пошкодити слизову оболонку носа і горла, створюючи сприятливі умови для бактеріальної інфекції [5]. Крім того, оксиди заліза, вбудовані в частинки пилу, можуть підвищити ризик зараження.

Пил також відіграє роль у передачі долинної лихоманки – потенційно смертельної хвороби – на південному заході Сполучених Штатів і в Північній Мексиці, діючи як переносник спор грибів Кокцидиоидес (рис 1.2)[14].

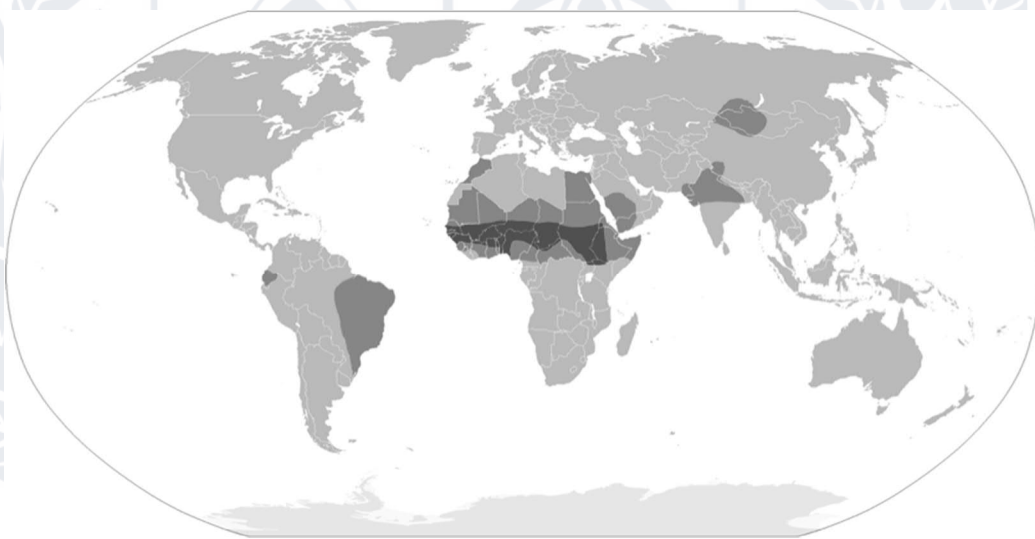


Рисунок 1.2 – Карта смуги менінгіту (чорним кольором) та регіонів з високим ризиком епідемій (темно-сірий), всі інші регіони можуть мати меншу частоту спалахів та спорадичних випадків

Вплив пилу у виробничому секторі часто неминучий. За своєю природою робота передбачає виконання завдань і дій, які утворюють і поширюють пил у повітря. Навіть за умови регулярного ретельного прибирання неможливо підтримувати безпечний рівень пилу на виробництвах чи складах.

## 1.2 Вимірювання запиленості повітря

### 1.2.1 Методи визначення запиленості повітря

Запиленість повітря можна визначити гравіметричним (ваговим), рахунковим (мікроскопічним), фотометричним та деякими іншими способами. Забирання пилу з атмосферного повітря можливо здійснювати у різний спосіб (наприклад, аспіраційним, заснованим на пропусканні повітря через фільтр).

У санітарно-гігієнічній практиці найбільш використовуваним способом виявлення запилення є гравіметричний метод тому, що при незмінності хімічного складу першочергове означення має маса пилу. Визначення маси пилу не дає повної картини її шкідливості для людини і технологічного процесу, при рівній масі можливий не однаковий хімічний, гранулометричний склад пилу. Загальна характеристика пилу злажується з її маси, що знаходиться в одиниці обсягу атмосферного повітря, хімічного та дисперсного составів.

Рахунковий (мікроскопічний) метод дає можливість обрахувати увесь вміст пилових часток в одиниці об'єму атмосферного повітря та визначити співвідношення їх розмірів. Тому пил, що знаходиться в певному обсязі атмосферного повітря, заточують в ємність на скло, яке вкрите прозорою клейкою плівкою, і під мікроскопом досліджують, кількість і розміри пилових часток та їх форму.

Якісну характеристику пилу визначають фотометричним методом за допомогою ультрафіолетового фотометра.

Найчастіше для виділення частинок пилу з повітряного середовища використовують метод фільтрації, хоча застосовують і методи, засновані на використанні електростатичних, відцентрових, інерційних сил. За допомогою методів відцентрового та інерційного осадження можна виділити лише великі частинки пилу розміром понад 0,5-1 мкм. Метод фільтрації дозволяє виділити частинки розміром до 01 мкм. Методом електростатичного осадження вдається виділити дрібні частинки розміром до 0,01 мкм. При дослідженні пилу з широким діапазоном розмірів частинок необхідно використовувати не один, а

кілька методів виділення пилу. При вимірюванні концентрації пилу в атмосферному повітрі та в повітрі приміщень перевагу віддають методам, заснованим на попередньому осадженні, оскільки більшість з них дозволяє визначити масову концентрацію пилу, що особливо важливо при проведенні контролю стану приміщень. Крім того, ці методи менш чутливі до змін властивостей пилу, що особливо для атмосферного пилу.

В боротьбі з пилом самі робочі такі технологічні заходи:

- 1) використання безперервної технології виробництва, за якої відсутні ручні операції;
- 2) пиле утворюючі процеси автоматизуються та механізуються;
- 3) раціоналізація технологічного процесу, обробка пилу матеріалів з застосуванням окроплення водою;
- 4) дистанційне керування;
- 5) влаштування місцевих вентиляційних відсмоктувачів, витяжки або припливно-витяжної вентиляції. Використання пиловловачів різної конструкції, які забирають пил з робочого місця і очищують його при віддачі в атмосферу. [1].

### ***1.2.2 Прилади для виміру пилу в повітрі***

Прилади пилового контролю - це пристрої та апарати, за допомогою яких визначається концентрація пилу в повітрі. Прилади пилового контролю діляться на 2 класи: прилади для відбору проб пилу та аналізують прилади.

Прилади для відбору проб (пробовідбірники, аспіратори) призначені лише для відбору проб для контролю газового та аерозольного забруднення повітря. Відбір проб здійснюється на фільтри або поглиначі. Для отримання даних про запилення повітря фільтри з осілим пилом зважують. Більшість пробовідбірників мають таймер, який припиняє пробовідбір після закінчення заданого часу. Ці прилади доступніші за ціною, чим аналізатори. Основним недоліком даних приладів є необхідність подальшого аналізу відібраних проб, що збільшує час отримання результатів.

Поділяються на прилади фільтруючої дії, інерційної дії, седиментатори, термо- та електропреципітатори. У практиці пилового контролю використовуються переважно прилади фільтруючої дії. При відборі проби за допомогою таких приладів вимірюється обсяг повітря, що пройшов через фільтри[23]:

$$V = q \cdot t \quad (1.4)$$

Де,

$q$  - об'ємна швидкість повітря, л/хв;

$t$  - час відбору проби пилу, хв.

Маса проби визначається різницею маси фільтра після ( $P_2$ , мг) і до ( $P_1$ , мг) відбору проби. Концентрація пилу ( $n$ , мг/м<sup>3</sup>) обчислюється за такою формулою[23].

$$n = \frac{P_2 - P_1}{q \cdot t} \cdot 1000 \quad (1.5)$$

Аналізуючі прилади (аналізатори пилу, вимірювачі концентрації пилу, пиломіри) дозволяють відібрати та одразу проаналізувати пробу повітря. Отримані дані про запилення висвітлюються на дисплеї у вигляді окремих значень, таблиці або гістограми, а також можуть бути роздруковані або записані в пам'ять приладу. Достоїнствами аналізуючих приладів є швидкість отримання даних (від 30 секунд до декількох хвилин) і можливість їх отримання в роздрукованому вигляді, можливість безперервного режиму вимірювань, наявність системи сигналізації перевищення заданої концентрації. Недоліком є їх висока вартість, яка в 3-20 разів може перевищувати вартість пробовідбірників. Для кожного завдання необхідно використати певний вид приладу.

Пиломіри дозволяють визначати запиленість повітря на місці виміру. Принцип роботи заснований на використанні будь-якої фізичної властивості зваженого або обложеного пилу (здатності поглинати або розсіювати світло або в-частинки, нести на собі електричний заряд та інші), за яким можна судити про масу пилу в повітрі або в пробі.

Сьогодні існує кілька методів вимірювання пилу: оптичний (фотометричний), гравіметричний, п'єзобалансний, трибоелектричний, радіоізотопний. Розглянемо кожен із них:

Оптичний метод вимірювання пилу (фотометричний (рис 1.3)[25] та нефелометричний метод).

Оптичний принцип дії є в тому, що у замірюванні зменшення інтенсивності світлового випромінювання при його руху через запилене середовище, концентрація часток пилу пропорційна значенню оптичної щільності, яка означається автоматично і є негативним десятковим логарифмом коефіцієнта пропускання.

Недоліки фотометричного абсорбційного методу:

- Низька чутливість при вимірюванні малих концентрацій аерозольних часток (менше  $30 \text{ мг/м}^3$ ), а також неспроможність контролю значних концентрацій (більше  $10...12 \text{ г/м}^3$ ) через практичне повне поглинання світлового випромінювання.
- Значний вплив фізико-хімічних властивостей аерозолів на результат вимірювання (розмірність, склад та забарвлення аерозолу). Щоб мінімізувати похибку вимірювання потрібно калібрувати прилад за конкретним типом аерозолу або введення поправного коефіцієнта
- Необхідність періодичного очищення оптичних елементів (оптика, відбивачі тощо)

При вимірі малих концентрацій аерозольних частинок найбільш працездатним є нефелометричний метод, який базується на замірі прямого, бічного та зворотного розсіяного світлового випромінювання.



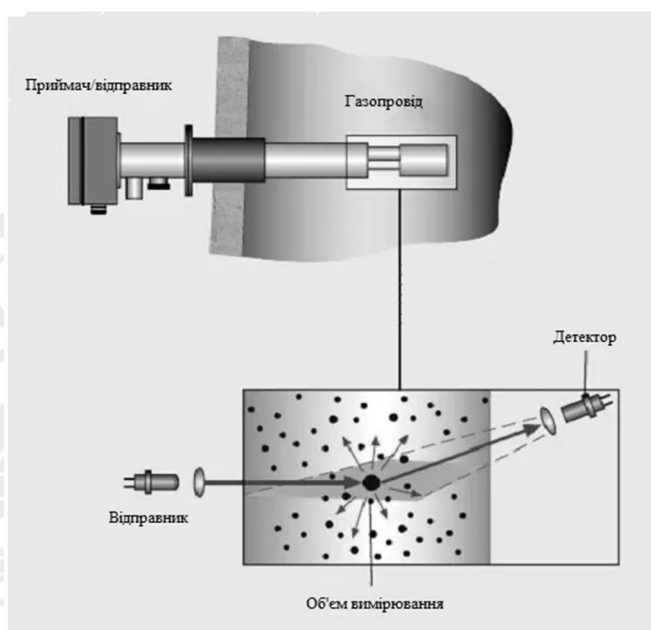


Рисунок 1.3 – Фотометричний метод

Недоліком нефелометричного методу прямого розсіювання при контролі вагової концентрації виробничих пилових аерозолів з просторим дисперсним складом є різка трата чутливості при замірюванні концентрацій часток діаметром більше 8 ... 10 мкм, що суттєво знижує і навіть виключає можливість їх застосування у великої кількості сфер діяльності. Це звужує застосування приладів до тих місць, де є дрібнодисперсні аерозольні частинки і на кінці рукавних фільтрів газоочисних приладів для інспектування їх ефективності.

Гравіметричний метод вимірювання аерозолію заключається у віділенні часток з пило-газового потоку з наступним осадженням їх на фільтрі аналізу та осушенням. За величиною приросту ваги на фільтрі визначенням обсягу проби розраховується масова концентрація аерозолію.

Гравіметричним (ваговим) аналізом називають метод чисельного хімічного аналізу, який ґрунтується на точних замірах маси досліджуваної речовини або її складових часток, розділених в хімічно чистому стані чи у вигляді сполук відомого постійного складу.

Достоїнствами даного методу є точність виміру, тому що відбувається прямий вимір аерозолію і немає впливу фізико-хімічних властивостей на результати.

Недоліком гравіметричного методу:

- Трудоємність методу
- Тривалість процесу
- Використання додаткового обладнання

На зміну трудомісткому гравіметричному методу прийшов новий метод п'езобалансного зважування осажденої проби пилу.

П'езобалансний метод вимірювання роботи приладу полягає в періодичному відборі проби аерозольних частинок через імпактор, який із загальної маси частинок відокремлює респіраторні (до 10 мкм) фракції, в подальшому їх заряд на коронуючому електроді і потім осадженні на поверхні осадового електрода. В якості такого електрода використовується п'езоелемент (кварц). Відбір проби здійснюється внутрішнім насосом приладу. Кварцовий п'езоелемент включений до ланцюга генератора електричних коливань. При осадженні пилу з його поверхні змінюється вага п'езоелемента як результат – частота його коливань. Зміна частоти лінійно залежить від маси обложеної на елемент пилу і є величиною вагової концентрації аерозолю.

Переваги замірювання п'езобалансним методом:

- Заміри проводяться швидко, при мінімальному обладнанні;
- Прилад показує правдивий результат і на його роботу не мають впливу фізико-хімічні властивості;
- Маленькі за розміром, переносний (зачасту не важчий 4 кг).

Недоліки замірювання п'езобалансним методом:

- Вимір проводиться тільки в робочій та житловій зонах;
- Дороговизна приладів;
- Важкий в користуванні: крихкий, не можна роняти, профілактика і обслуговування за суворими вимогами інструкції.

Трибоелектричний метод вимірювання заснований на вимірі індукованого заряду на ізольованому вимірювальному електроді, розташованому в металевому газоході, яким рухається пило-газовий потік. Індукований заряд

виникає при взаємодії аерозольних частинок, що рухаються, з поверхнею електрода, при цьому його величина пропорційна масовій концентрації аерозолу в широкому діапазоні вимірювань.

Ці прилади називають трибоелектричними. Їх можна розділити на прилади, що вимірюють постійну складову трибоелектричного сигналу, і на прилади, що вимірюють змінну складову трибоелектричного сигналу (наведений електродинамічний заряд).

Переваги трибоелектричного методу вимірювання:

- Вібрація у місці установки не впливає на показання
- Не має вузлів, які можуть забруднитись, що дозволяє застосовувати прилади тривалий час у жорстких умовах, а так як вузли, що обробляють сигнали, знаходяться за межами жорстких умов, робить обладнання надійним
- У приладі немає вузлів, які виробляють свій ресурс із закінченням часу.

Прилади довговічні, за рахунок чого стають простими та дешевими в обслуговуванні.

Радіоізотопний метод замірювання концентрації пилу базується на здатності радіоактивного випромінювання (зазвичай  $\beta$ -випромінювання) поглинатися частинками пилу. Масу уловленого пилу визначають за ступенем ослаблення радіоактивного випромінювання при проходженні через шар накопиченого пилу. Безперервна робота таких приладів досягається застосуванням рухомих стрічкових скловолокнистих фільтрів.

Результати вимірювання концентрації пилу радіоізотопним методом залежать до певної міри від хімічної та дисперсної складової, що спирається на особливість взаємодії радіоактивного випромінювання з речовиною та нелінійністю залежності ступеня поглинання від товщини шару поглинач.

### *1.2.3 Пиломіри в Інтернеті речей*

Шкода від забруднення повітря дрібним пилом та озоном збільшується, тому інтерес до стану атмосферного середовища швидко зростає в усьому світі. Існує зростаюча потреба в системі постійного та повсякденного моніторингу атмосферного середовища, яке здатне ефективно вимірювати та аналізувати забруднюючі речовини в повітрі, оскільки небезпека забруднення повітря стає серйозною проблемою. З цією метою, в більшості країн, встановлено урядову систему моніторингу повітря, яка надає користувачам інформацію про забруднення повітря шляхом спостереження за атмосферним середовищем [5], а інформацію про забруднення повітря спостерігають через Національну інформаційну систему моніторингу якості атмосферного повітря (НІСМЯАП). Однак НІСМЯАП складається з високовартісного обладнання для вимірювання атмосферного середовища, і тому побудувати нову станцію вимірювання атмосферного середовища дуже дорого.

Звичайно уряд надає дані про концентрацію дрібного пилу, щоб інформувати громадськість. Однак публічні дані не зовсім точні, оскільки уряд надає рівні концентрації дрібного пилу по всьому регіону. Цілком неминуче, що в окремих районах буде різний рівень дрібного пилу, що вказує на те, що надані дані стосуються не всіх громадян.

Якщо концентрацію дрібного пилу можна виявити на місцевому рівні, можна вжити превентивних заходів, щоб уникнути потенційних ризиків. Аналіз причин підвищення рівня дрібного пилу принесе користь тим, кому потенційно загрожує значно висока концентрація дрібного пилу.

Тому існує потреба в системі моніторингу атмосферного середовища, яка могла б ефективно надавати результати спостереження за атмосферним середовищем по факту громадським об'єктам, таким як дитячі садки та школи, або будинкам і комерційним об'єктам у районі, де станція вимірювання атмосферного середовища НІСМЯАП не працює, чи не дає потрібну користувачам інформацію.

З цим може справитись система моніторингу повітря працююча з

інтернетом речей.

Наразі з'явилися прилади, які вартують так недорого, що є доступними для власного користування, і надають точні показники та мають можливість моніторити якість та стан повітря постійно (рис 1.4) [13].

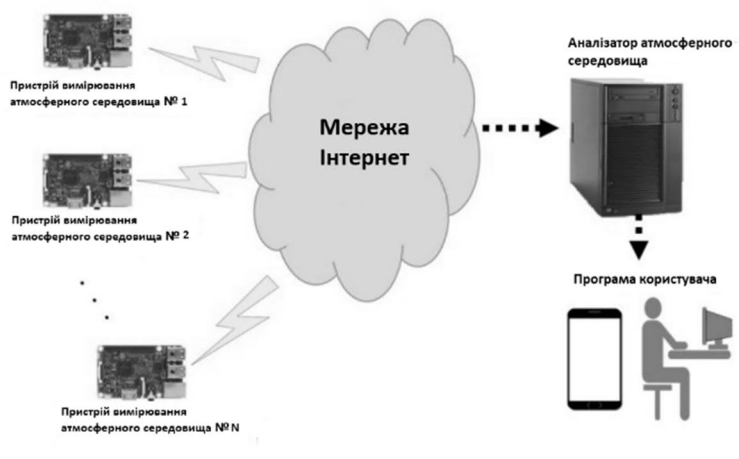


Рисунок 1.4 – Конфігурація системи моніторингу атмосфери в Інтернеті речей

З 12 листопада на факультеті комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету запрацювала станція “Air Fresh Max Environment OS”, яка щохвилини відправляє на сервер дані з датчиків по 12 показниках: концентрація пилу розміром 1, 2.5 і 10 мкм (PM1, PM2.5, PM10), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), монооксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), озон (O<sub>3</sub>), формальдегід, леткі органічні речовини, температура, вологість, атмосферний тиск, - інформує завідувач кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, доктор технічних наук, професор, науковий керівник науково-дослідної лабораторії екологічних досліджень та екологічного моніторингу Вінницького національного технічного університету Віталій Мокін [26].

Інтернет речей (IoT) — це проста, але дуже потужна концепція, яка розвивалася з часом. Фраза «Інтернет речей», яка коротко відома як IoT, утворена зі слів «інтернет» і «речі», де «речі» означає будь-який пристрій, підключений до Інтернету. Технологія IoT дозволяє підключати фізичні об'єкти до Інтернету, що дозволяє контролювати та контролювати ці об'єкти з будь-якого місця. Кількість

користувачів Інтернету стрімко зростає завдяки розвитку гаджетів, комп'ютерів і мобільних телефонів, тому парадигма IoT стає значною частиною сучасної ери [15].

Інтернет речей концептуально належить до мереж наступного покоління. IoT будується з складових різних інфокомунікаційних технологій, що формують функціонування Інтернету речей, і його архітектура демонструє, як ці технології взаємодіють один з другим(рис 1.5)[12, 16].

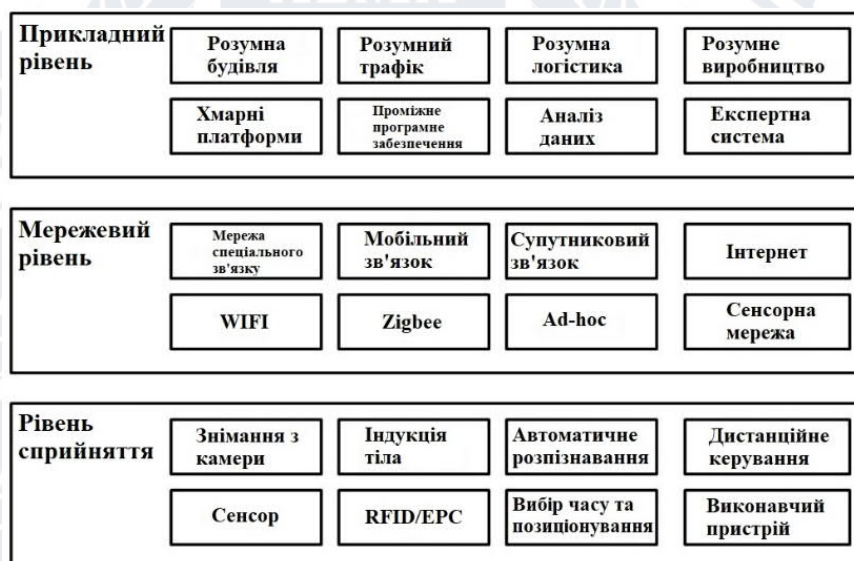


Рисунок 1.5 – Трирівнева архітектура

- 1) Рівень сприйняття трирівневої архітектури: Рівень сприйняття завершує збір інформації про особу, фізичний об'єкт, транзакцію чи процес за допомогою інструментів сприйняття.
- 2) Мережевий рівень із трирівневою архітектурою: мережевий рівень передає інформацію, отриману рівнем сприйняття, на рівень додатків, безпечно, швидко та надійно досягаючи обміну даними між рівнем сприйняття та рівнем додатків через різні мережі.
- 3) Прикладний рівень трирівневої архітектури: Прикладний рівень аналізує та обробляє інформацію, що надходить із рівня сприйняття та мережевого рівня, реалізуючи програму IoT[17].

### 1.3 Висновки до розділу

В цьому розділі був відзначений вплив пилу на організм людини, можливості його виявлення та визначення його шкідливості. Розглянувши основні властивості забруднення повітря, його складові і всі негативні фактори пов'язані з ним, можна сказати, що якщо перестати боротися із збільшенням небезпечних та нетипових і забруднюючих викидів в повітря, то існує небезпека вкрай швидкого забруднення атмосфери, що в свою чергу призведе до значного збитку екології, підвищенню смертності і порушення умов життєдіяльності людей. Спираючись на цю інформацію, треба вжити заходи по моніторингу стану повітря, та визначенню типу забруднення, та уникненню зайвих викидів, що призведе до нормалізації атмосфери повітря в місці знаходження людини та збереженню її здоров'я та життєдіяльності.

Існування методології замірювання найголовніших показників якості атмосферного повітря одночасно з моніторингом виду забруднення є дуже важливим для визначення загрози життю людини, якими можна скористатися для уникнення місця забруднення, та обмеження часу знаходження в забрудненому середовищі. Тому дуже важливим є розвиток доступних, і надчутливих сенсорів та датчиків, які зможуть розпізнати загрозу та повідомити про це.

## РОЗДІЛ 2 РОЗГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ОПТИЧНИХ ПИЛОМІРІВ

### 2.1 Метод роботи оптичного пиломіра

Для моніторингу концентрації пилу в промислових підприємствах, як в атмосфері, так і у відведених газах без попереднього відбору використовують пиломіри. Вони базуються на різних принципах роботи.

Оптичний метод базується на зменшенні світлового потоку за можливості його поглинання і розсіяння при русі через досліджуване пилове та газове середовище (рис 2.1)[7].



Рисунок 2.1 – Взаємодія світлового потоку і пилу

Основуючись на поглинанні електромагнітних хвиль концентрацію пилу можна контролювати, вимірюючи величини екстинкції[6]:

$$E = \log(I_{\text{вх}\lambda}/I_{\text{вих}\lambda}) \quad (2.1)$$

Де,

$I_{\text{вх}\lambda}$  – інтенсивність зондуючого випромінювання;

$I_{\text{вих}\lambda}$  – інтенсивність з прошлого випромінювання, на певній довжині хвилі.

Основуючись на взаємній залежності величини екстинкції та взаємної залежності концентрації пилових частинок, можна визначити вміст пилу в газовому середовищі. Схема  $C = f(E)$  для середнього розміру частинок 35 мкм при довжині шляху вимірювального 5 м наведена на (рис 2.2).



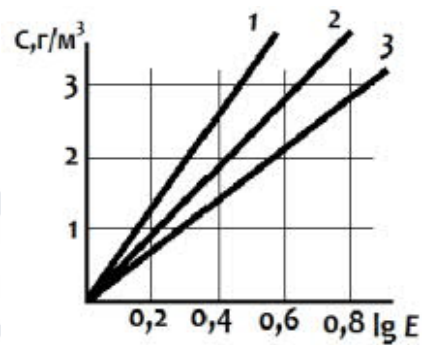


Рисунок 2.2 – Графік демонструючий залежність концентрації пилових частинок від їх величини, 1)  $\lambda = 436$  мкм; 2)  $\lambda = 546$  мкм; 3)  $\lambda = 636$  мкм

Інтенсивність випромінювання, яке розсіюється в широкому діапазоні, враховуючи залежність співвідношення між розмірами частинок та зондуючого діапазона випромінювання, і залежність від дисперсного складу пилового та газового середовища (функція розподілу часток за їх розмірами), вологість і форми частинок. Форма частинок може бути самою різною. Теорія світлового розсіювання стосується сферичних частинок, тому частинки будь – якої форми, які набагато менші довжини хвилі зондуючого випромінювання вважаються сферичними. Інтенсивність розсіяного випромінювання можна описати відношенням:

$$I_P = \frac{8\pi^4 r^6}{R^2 \lambda^4} k(1 + \cos^2 \theta) I_{\lambda 0} \quad (2.2)$$

Де,

$R$  – відстань від частинки до приймача випромінювання;

$\theta$  – кут, розраховується від напрямку поширення випромінювання;

$k$  – коефіцієнт в залежності від розмірів часток;

$r$  – радіус частинок;

$I_{\lambda 0}$  – інтенсивність зондуючого випромінювання.

Оскільки зміна інтенсивності розсіяного світлового потоку залежить від розміру часток через який проходить світловий потік, цим методом можна визначити не лише масу вмісту твердих частинок, а також розраховувати концентрацію частинок пилу і дисперсного складу пилового та газового середовища.

Турбідиметричний і нефелометричний методи засновані на зменшенні інтенсивності світлового потоку за рахунок його поглинання і розсіювання при проходженні через полідисперсні середовища. Зменшення інтенсивності світлового потоку обумовлене поглинанням і розсіюванням світлового потоку зваженими частинками(рис 2.3)[6].

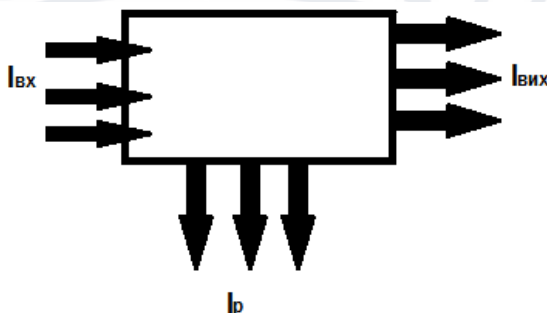


Рисунок 2.3 – Схема замірювання світлових потоків при турбідиметрії і нефелометрії  $I_{вх}$  – інтенсивність ходячого світлового потоку,  $I_p$  – інтенсивність розсіяного світлового потоку,  $I_{вих}$  – інтенсивність світлового потоку, що виходить з вимірювальної камери.

При проходженні пучка світлового потоку  $I_{вх}$  через вимірювальну камеру з дрібними частинками де відбувається бічне розсіювання світлового потоку  $I_p$  (візуально спостерігається мутність).

При довжині хвилі меншої за лінійні розміри частинок, розсіювання буде обумовлене переломленням світлового потоку на границі розділення частинок – розчинника і відбиттям частинок через нього. При довжині хвилі більшої за лінійні розміри частинок, то стається дифракція світлової хвилі, та виникає ефект Тіндаля. Інтенсивність розсіювання росте при збільшенні числа частинок, що розсіюють світловий потік.

Перевагою методів є визначення малої концентрації (до  $4 \cdot 10^{-9}$  г) речовин у зразку.

У полідисперсних середовищах для закону Бугера-Ламберта-Бера, закон поглинання, на сумму до істинного коефіцієнта поглинання  $k_\lambda$ , додається коефіцієнт  $k'_\lambda$ , що відповідає за розсіювання:

$$I_\lambda = I_{вх\lambda} \exp[-(k_\lambda + k'_\lambda)LC] \quad (2.3)$$

Де,

$C$  — концентрація компонента, що поглинається;

$L$  — товщина шару досліджуваної речовини.

На основі явища пропускання електромагнітних хвиль контроль може здійснюватись вимірюванням величини каламутності:

$$E_{\lambda} = \log(I_{\text{вх}\lambda}/I_{\text{вих}\lambda}) \quad (2.4)$$

Де,

$I_{\text{вх}\lambda}$  — інтенсивність зондуючого випромінювання;

$I_{\text{вих}\lambda}$  — інтенсивність випромінювання що пройшло на певній довжині хвилі.

Значення  $E_{\lambda}$  визначається за формулою:

$$E_{\lambda} = k \frac{CLd^3}{d^4 + \gamma\lambda^4} \quad (2.5)$$

Де,

$C$  — концентрація поглинаючих часток;

$L$  — товщина поглинаючого шару;

$d$  — середній діаметр поглинаючих часток;

$\lambda$  — довжина хвилі падаючого світлового потоку;

$\gamma$  — коефіцієнт, що характеризує природу досліджуваного середовища;

$k$  — коефіцієнт, що характеризує конструкцію приладу.

У тих випадках, коли  $\lambda = \text{const}$ ,  $k = \text{const}$ ,  $\gamma = \text{const}$ , вираз для значення запиленості набуває наступного вигляду:

$$E = KLC \quad (2.6)$$

Де,

$K$  — коефіцієнт запиленості середовища (коефіцієнт пропускання).

Похибка перетворення  $\Delta D$  вимірюваної оптичної щільності пилового та газового середовища у вихідний сигнал визначається за формулою:

$$\Delta D = 0,43 \cdot \left( \frac{\Delta S_u}{S_u} + \frac{\Delta_0}{S_u} \cdot 10^{-D} \right) \quad (2.7)$$

Де,

$\Delta S_u, S_u$  — коефіцієнт перетворення вимірювальної системи і величина його сумарної нестабільності;

$\Delta_0$  — зміщення нуля приладу.

Розсіювання світлового потоку в середовищах які є оптично неоднорідні, при яких розміри неоднорідності, є малі порівнюючи з довжиною світлової хвилі і значень заломлення, це відрізняється від величини заломлення навколишнього середовища, яке описується рівнянням Релея:

$$I_{p\lambda} = I_{вх\lambda} \left[ \frac{n_1^2 - n^2}{n^2} \cdot \frac{NV^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \beta) \right] \quad (2.8)$$

Де,

$I_{p\lambda}$  – інтенсивність розсіяного випромінювання;

$I_{вх\lambda}$  – інтенсивність зондуючого випромінювання;

$n_1$  і  $n$  – параметри заломлення частинок і середовища відповідно;

$N$  – число розсіяних частинок;

$V$  – об'єм розсіюючої частинки;

$\lambda$  – довжина хвилі падаючого світлового потоку;

$R$  – відстань до приймача випромінювання;

$\beta$  – кут між падаючим і розсіяною світловий пучок

Вимірювані величини  $n_1$  і  $n$ ,  $R$ ,  $\beta$  є постійними, тому рівняння Релея набуває такого вигляду:

$$I_{p\lambda} = I_{вх\lambda} k \frac{NV^2}{\lambda^4} \quad (2.9)$$

Де,

$k$  – коефіцієнт, який залежить від конструкції приладу та характерний для досліджуваної речовини.

Зміна інтенсивності розсіяного світлового потоку характеризується функцією розміру часток, та залежить від концентрації часток. Так ми можемо порахувати концентрацію частинок і дисперсний склад зразка.

## 2.2 Елементи оптичного піломіра

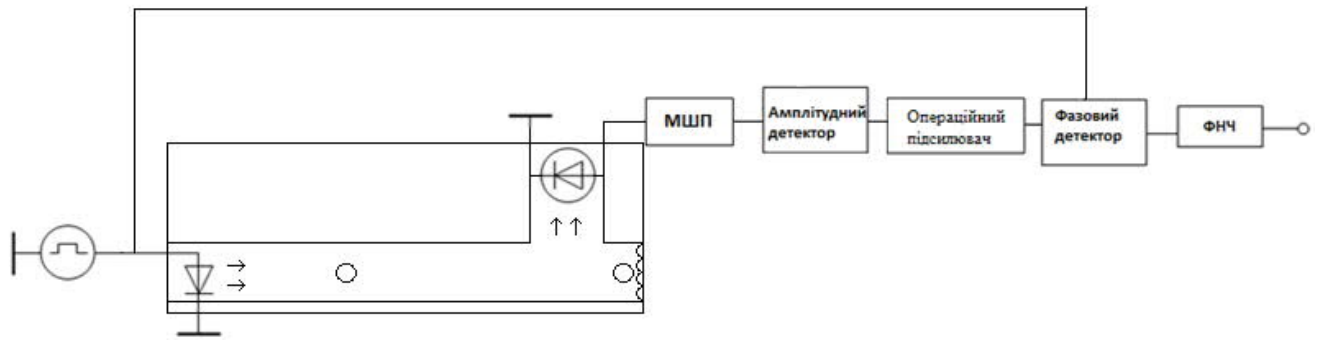


Рисунок 2.4 – Спрощена схема запропонованого оптичного піломіра

Генератор прямокутних імпульсів на основі таймера NE555, який для відсіювання впливу шуму використовує модуляцію з частотою не кратною частоті мережі живлення 50 Гц (рис. 2.5) [21].

Генератор на основі таймера NE555 підключений як нестабільний мультивібратор. Тригерний, і пороговий входи (контакти 2 і 6) підключені до двох компараторів, та з'єднані разом, і під'єднані до зовнішнього конденсатора. Конденсатор заряджається до напруги живлення через два резистори R1 і R2. Розрядний вхід (7), підключений до внутрішнього транзистора, підведений до з'єднання цих двох резисторів. Коли до схеми вперше подається живлення, конденсатор буде розрядженим, тому і тригер, і пороговий вхід будуть близькими до нуля. Нижній компаратор встановлює керуючий тригер, змушуючи вихід перемикачів на високому рівні. Це також вимикає транзистор T1. Це дозволяє конденсатору почати заряджатися через R1 і R2. Як тільки заряд конденсатора досягне  $2/3$  напруги живлення, спрацьовує верхній компаратор, викликаючи скидання тригера. Це призводить до перемикання вихідного сигналу на низький рівень. Транзистор T1 також проводить. Ефект провідності T1 призводить до підключення резистора R2 до зовнішнього конденсатора. Резистор R2 ефективно з'єднаний із землею через внутрішній транзистор T1. Результатом цього є те, що конденсатор тепер починає розряджатися через R2.

Як тільки напруга на конденсаторі досягає  $1/3$  напруги живлення, спрацьовує нижній компаратор. Це знову призводить до того, що тригер управління набирає, а вихід стає з високою напругою. Транзистор T1

відключається, і конденсатор знову починає заряджатися. Цей цикл продовжує повторюватися, коли конденсатор поперемінно заряджається і розряджається, оскільки компаратори змушують тригер постійно заряджатися та скидатися. Результатом є безперервний потік прямокутних імпульсів.

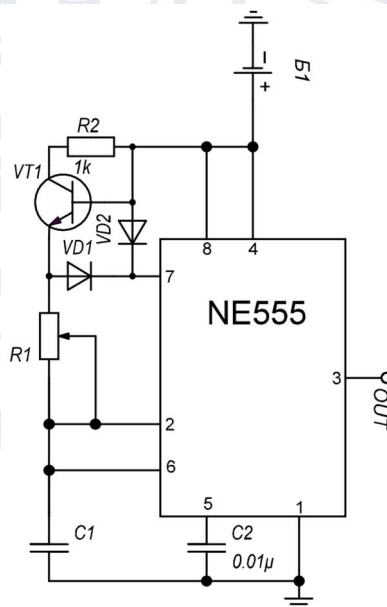


Рис. 2.5. Генератор прямокутних імпульсів на основі NE555  
Робоча частота таймеру з коефіцієнтом заповнення  $D=0.5$  [4]:

$$f = \frac{1}{0.693 \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C_1} \quad (2.10)$$

Для виявлення забруднення повітря пилом, аерозольними частинами, використовується пара ІЧ світлодіод- фототранзистор, які фіксують розсіяння відбитого світла від частинок пилу та аерозолі. Сигнал з фототранзистору підсилюється за допомогою інвертуючого операційного підсилювача NE5532 з двополярним живленням [10, 11] (рис.2.6).

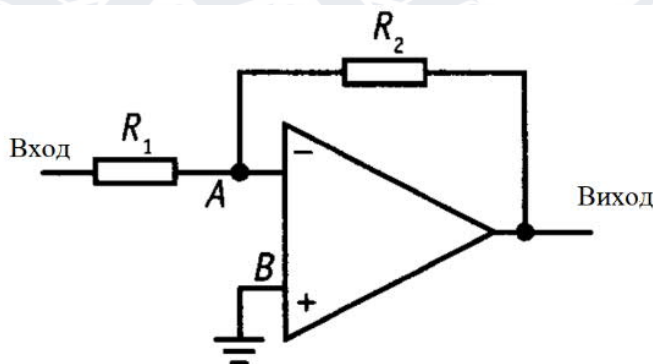


Рисунок 2.6 – Схема інвертуючого підсилювача з двополярним живленням.

Коефіцієнт підсилення розраховується за формулою:

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.11)$$

Для виділення корисного (модулюючого) сигналу від несучої складової використовуємо демодулятор амплітудно-модульованого високочастотного сигналу, який в найпростішому випадку є однополуперіодним випрямлячем на одному діоді з вихідним фільтром з конденсатора і резистора (рис 2.7). Співвідношення номіналів резистора і конденсатора вибирається так, щоб оптимально згладжувати напівперіоди несучої високої частоти. При перевищенні амплітуди напівперіодів, що вище напруги на конденсаторі, діод відкривається, і конденсатор заряджається; при зменшенні амплітуди напівперіодів, що несе нижчу напругу на конденсатор, діод закривається, і конденсатор розряджається; тим самим огинаюча відновлює модулюючий низькочастотний сигнал. [22]

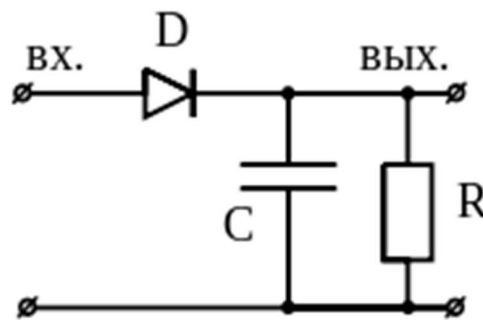


Рисунок 2.7 – Схема АМ детектора на базі однонапівперіодного випрямляча.

Сигнал з амплітудного детектора підсилюється за допомогою неінвертуючого операційного підсилювача NE5532 з двополярним живленням (рис 2.8) [10, 11].

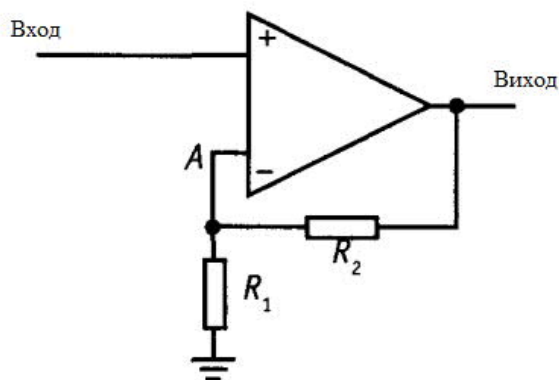


Рисунок 2.8 – Схема неінвертуючого підсилювача з двополярним живленням.

Коефіцієнт підсилення розраховується за формулою:

$$K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.12)$$

Найпростіший фазовий детектор може бути побудований на логічному елементі виключне АБО. При подачі на вхід цього елемента двох прямокутних коливань рівних частот з нульовим фазовим зрушенням його вихідна напруга дорівнює нулю (на виході логічний 0). При ненульовому зсуві фаз на виході елемента формуються імпульси, середнє значення яких прямо пропорційне фазовому зсуву і досягає максимуму (на виході логічна 1) при зсуві на  $180^\circ$ . Для отримання пропорційної зсуву фаз напруги імпульси з виходу елемента XOR подають на інтегрувальну ланку (фільтр низьких частот, ФНЧ) (рис.2.9). Елементи для фільтра низької частоти можна розрахувати за формулою:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.13)$$

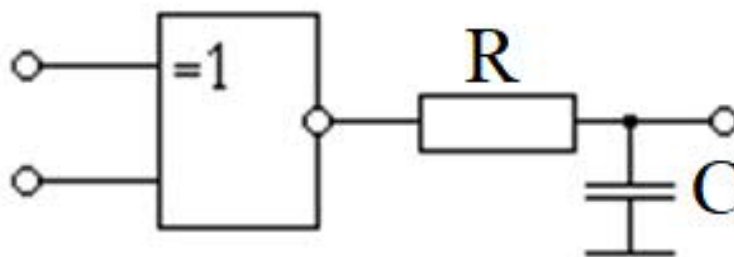


Рисунок 2.9 – Найпростіший фазовий детектор



### 2.3 Висновки до розділу

У другому розділі роботи отримано уявлення про принципи та методи роботи оптичного пиломіра. Також наведені формули для розрахунків та обчислень концентрації пилу та аерозолів в повітрі. Розглянуті елементи з чого збирається пиломір.



### РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОГО ПИЛОМІРА

Розрахуємо параметри генератор прямокутних імпульсів на основі таймера NE555. Зробимо частоту генератора  $f = 121$  Гц, щоб не було завад від мережі живлення. Перетворивши формулу 2.10 можна розрахувати  $R_1$ .

Тоді для заданого значення ємності  $C_1 = 4.7$  мкФ

$$R_1 = \frac{1.443}{f \cdot C_1} - 2 \cdot R_2 \quad (3.1)$$

Маємо:

$$R_1 = \frac{1.443}{121 \cdot 4.7 \cdot 10^{-6}} - 2 \cdot 1 \cdot 10^3 = 0.537 \text{ кОм} \quad (3.2)$$

Сигнал з фототранзистору підсилюється за допомогою двох інвертуючих каскадів операційного підсилювача NE5532 з двополярним живленням.

Коефіцієнт підсилення розраховується за формулою 2.11:

Для першого каскада беремо  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 1$  МОм.

Для другого  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 1$  кОм.

Коефіцієнт підсилення сигналу для першого каскаду буде:

$$K_{U1} = \frac{1 \cdot 10^6}{100} = 10\,000 \quad (3.3)$$

Для другого:

$$K_{U1} = \frac{1 \cdot 10^3}{100} = 10 \quad (3.4)$$

Для виділення корисного (модулюючого) сигналу показник з підсилювача потрапляє на амплітудний детектор.

Звідки сигнал поступає на неінвертуючий операційний підсилювач. Потрібний нам коефіцієнт підсилення  $K_U = 1.62$  тоді за формулою 2.12 можна вивести:

$$R_2 = K_U \cdot R_1 - R_1 \quad (3.5)$$

Нехай  $R_1 = 1$  кОм, тоді  $R_2$ :

$$R_2 = 1.62 \cdot 1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^3 = 620 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

Сигнал поступає на вхід фазового детектора звідки потрапляє на ФНЧ зі

смугою пропускання 1Гц. За допомогою формули 2.13 можна знайти  $R$ :

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (3.7)$$

Нехай  $C = 100$  мкФ, тоді  $R$ :

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 1.59 \text{ кОм} \quad (3.8)$$

Для підключення оптичного пілометра до вимірювального пристрою потрібно змістити рівень "нуля", щоб на вхід надходила напруга від 0 В до 5 В. Це можна зробити за допомогою змінного резистора і неінвертуючого операційного підсилювача NE5532 з двополярним живленням.

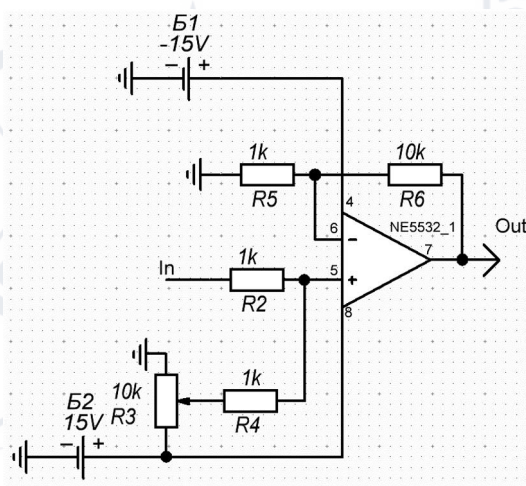


Рисунок 3.1 – Елемент схеми для зміщення рівня "нуля" з підсилювачем напруги після фільтра фазового детектора

З цими даними складено схему оптичного пілометра [Додаток А].

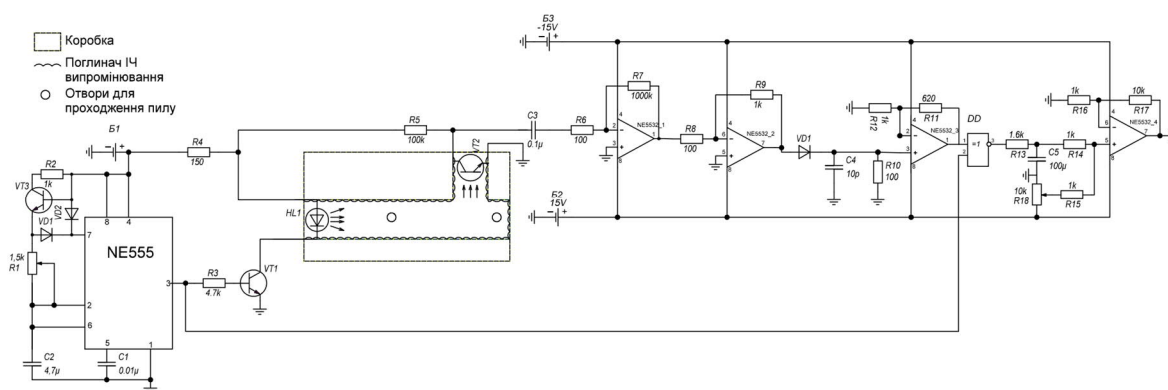


Рисунок 3.2 – Схема однопроменевого оптичного пілометра

Експериментальні форми отриманих сигналів наведені на рисунках 3.3-3.9

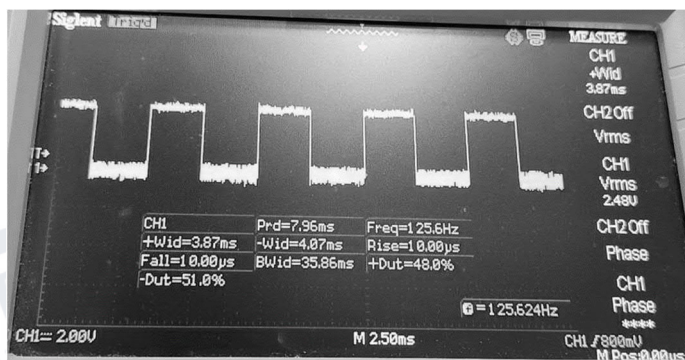


Рисунок 3.3 – Сигнал на виході генератора прямокутних імпульсів.

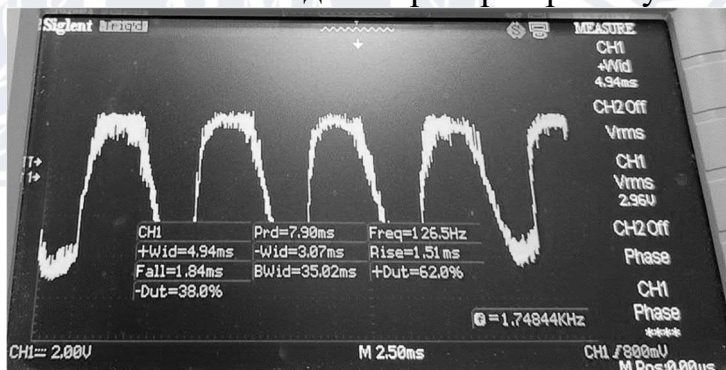


Рисунок 3.4 – Сигнал з димом на виході другого каскаду інвертуючого операційного підсилювача.

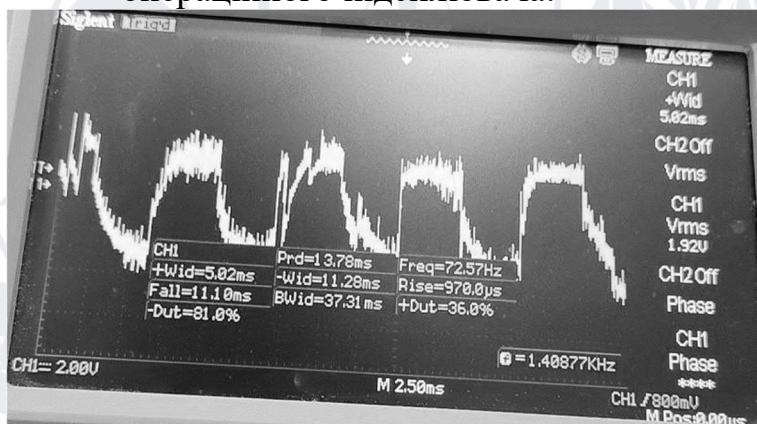


Рисунок 3.5 – Сигнал без диму на виході другого каскаду інвертуючого операційного підсилювача.



Рисунок 3.6 – Сигнал без диму на виході амплітудного детектора.



Рисунок 3.7 – Сигнал з диму на виході амплітудного детектора.

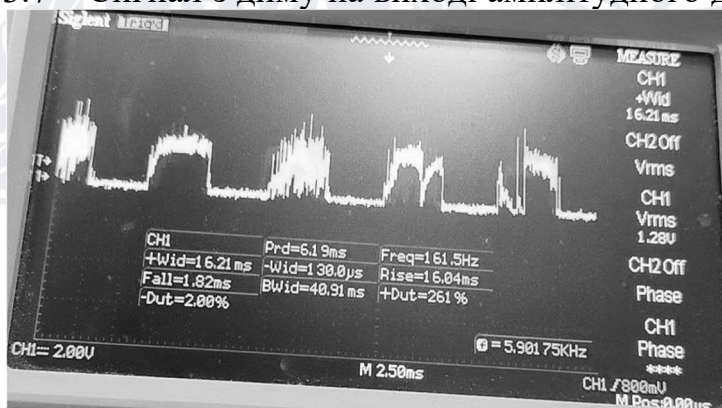


Рисунок 3.8 – Сигнал без диму на виході неінвертуючого операційного підсилювача розташованого після амплітудного детектора.



Рисунок 3.9 – Сигнал з диму на виході неінвертуючого операційного підсилювача розташованого після амплітудного детектора.

Підключивши однопроменевий оптичний пиломір до ардуіно ми можемо отримати діаграму зміни концентрації диму в часі (рис 3.10).

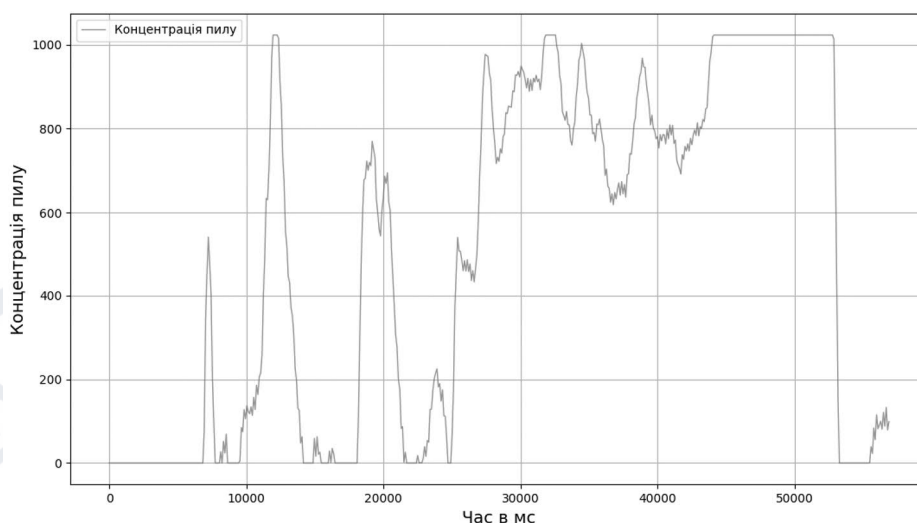


Рисунок 3.10 – Діаграму зміни концентрації диму в часі

Порахувавши вартість усіх елементів оптичного пиломіра таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – Вартість елементів оптичного пиломіра

№	Назва елемента	Кількість (шт.)	Номінал	Ціна
1	Таймер NE555	1		10,00 ₴
2	Підсилювач NE5532	2		10,00 ₴
3	Логічний елемент 74НС86N	1		14,50 ₴
4	Діод 1N4448	3		0,60 ₴
5	Транзистор BC33740TA	2		12,00 ₴
6	Фототранзистор	1		8,70 ₴
7	Інфрачервоний світлодіод	1		4,00 ₴
8	Макетна плата	1	7x9 см	25,00 ₴
9	Коробочка	1	5x3x2 см	80,00 ₴
10	Конденсатор	1	0,01 мкФ	1,50 ₴
11	Конденсатор	1	4,7 мкФ	3,40 ₴
12	Конденсатор	1	0.1 мкФ	1,30 ₴
13	Конденсатор	1	100 мкФ	2,20 ₴
14	Конденсатор	1	10 пФ	1,20 ₴
15	Змінний резистор	1	10 кОМ	3,00 ₴
16	Змінний резистор	1	2 кОМ	3,00 ₴

Продовження таблиці 3.1

17	Резистор	6	1 кОМ	0,30 ₴
18	Резистор	4	100 ОМ	0,40 ₴
19	Резистор	1	150 ОМ	0,30 ₴
20	Резистор	1	4,7 кОМ	0,30 ₴
21	Резистор	1	1М ОМ	0,80 ₴
22	Резистор	1	620 ОМ	0,30 ₴
23	Резистор	1	1,6 кОМ	0,30 ₴
Всього				209,00 ₴

Отже ціна приладу на момент 01.12.2022 була 209 грн чи 5,59 долара. Це дешевше аналогічного датчика DustDuino [27] який працює за схожими принципами і котрий коштує 15 доларів США.

### 3.3 Висновки до розділу

В даному розділі було описано як на практиці було реалізовано розробку, підбір оптимальних елементів, які проведені розрахунки, та здійснено побудову макета піломіру, і розглянуто як відбувалася робота пристрою, та які показники були у відображенні на Ардуіно, і на осцилографі, та в цілому були досліджені основні принципи роботи однопроменевого оптичного піломіру. Порахована ціна на 01.12.2022 на розглянутий та зібраний оптичний піломір.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз стану питання вимірювання забрудненості повітря, наведено типи забруднення та методи його вимірювання. Розглянуто використання пиломірів в Інтернеті речей. Описано принцип дії оптичних пиломірів, наведено вплив розміру частинок пилу на інтенсивність розсіяного випромінювання.

2. Запропоновано схему спрощеного оптичного пиломіру, його принципову схему та отримано експериментальні результати, а саме: форми напруги модулюючого світла генератора, сигнали напруги на виході з чистим повітрям та з димом. Побудований пиломір був підключений до Arduino MEGA 2560 та за його допомогою було оцифровано та виміряно залежність напруги на виході пиломіру від концентрації диму у повітрі з часом. Отримана залежність свідчить о високій чутливості запропонованого пиломіру.

Також пораховані витрати на побудову запропонованого пиломіру та показано, що він значно дешевше існуючих на ринку.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пірумов А. І. Обеспечивание воздуха. Стройиздат. СРСР, 1974. 207с.
2. Любов В.К., Чернов А. А. Измерение оптической плотности и массовой концентрации взвешенных частиц. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 5. Изд-во АГТУ. Архангельск, 2016. 28 с.
3. Giannadaki, D., Pozzer, A., Lelieveld, J. Modeled global effects of airborne desert dust on air quality and premature mortality, *Atmos. Chem. Phys.* 2014. Pp. 957–968
4. Molesworth, A. M., Cuevas L. E., Connor S. J., Morse A. P. Thomson M. C. Environmental Risk and Meningitis Epidemics in Africa. *Emerging Infectious Diseases*, 9(10). 2003. Pp. 1287-1293.
5. Dukic V., Hayden M., Forgor A. A., Hopson T, Akweongo P., Hodgson A., Monaghan A., Wiedinmyer C., Yoksas T., Madeleine C. Thomson, Trzaska S., Pandya R. The Role of Weather in Meningitis Outbreaks in Navrongo, Ghana: A Generalized Additive Modeling Approach. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 2012, Volum 17, Number 3, Pp. 442-460.
6. Корнієнко Д. Г. Вдосконалення структурних схем побудови оптичних вимірювачів пилу. *Технологический аудит и резервы производства* — № 3/2(29), 2016. 23-40 с.
7. Hasheminasab F., Aminossadati S.M., Bagherpour R., Amanzadeh M. Fibre-Optic Based Sensors for Dust Monitoring, 2nd International Conference of Fibre-optic and Photonic Sensors for Industrial and Safety Applications, 2017. Pp. 33-38.
8. Leirfall L. Monitoring dust deposition. United States Patent, US 6,850,328 B1, 2005. Pp. 9.
9. Kevin Cai, Junfeng Wang. Systems, methods, and devices for sensing particulate matter, WO2017/101038 A1 2017. Pp.19.
10. George B. Rutkowski, P. E. Handbook of Integrated-Circuit Operational

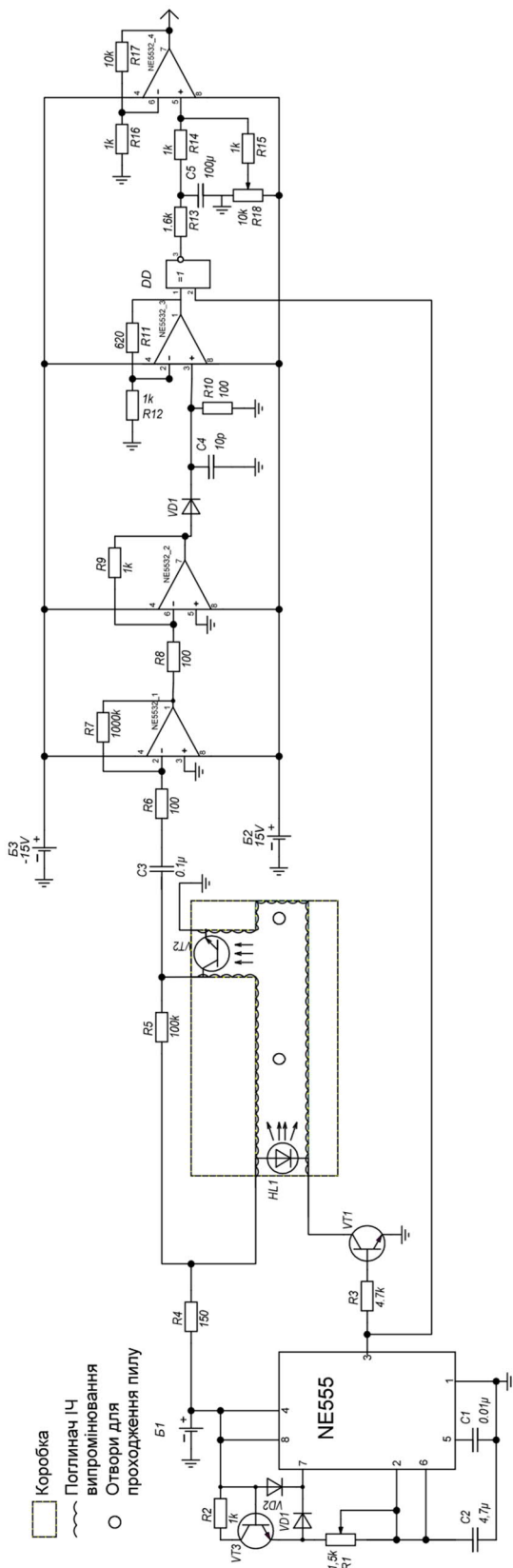
Amplifiers, 1975. Pp.330.

11. Paul Horowitz, Winfield Hill. The Art of Electronics, 2014. Pp. 704.
12. Wonseok Choi, Dokyung Hwang, Jongpil Kim, Jangmyung Lee. Fine dust monitoring system based on Internet of Things, 2018. Pp. 4.
13. Seung Ho Kim, Jong Mun Jeong, Min Tae Hwang, Chang Soon Kang. Development of an IoT-based Atmospheric Environment Monitoring System, 2017. Pp. 861 – 863.
14. Бардин В. М., Брагин А. В. Устройства приема и обработки сигналов Детектирование радиосигналов Методические указания. Изд-во Мордов, 2012. 20 с.
15. A.A.Chandra, N.I.Jannif, S.Prakash and V.Padiachy. Cloud Based Real-time Monitoring and Control of Diesel Generator using the IoT Technology, 2017. Pp.5
16. Wonseok Choi, Dokyung Hwang, Jongpil Kim, Jangmyung Lee. Fine dust monitoring system based on Internet of Things, 2018. Pp. 4.
17. Chang-le Zhong, Zhen Zhu, Ren-gen Huang. Study on the IoT Architecture and Access Technology, 2017. Pp. 113-116.
18. Васильев Г. С., Васильева С.М., Герасименко Ю.С., Лінючева О.В. Корозійно-екологічний моніторинг повітряного і водного середовищ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 265 с
19. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. 600 с.
20. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники, БИНОМ, 2014. 704 с.
21. 555 Oscillator Tutorial - The Astable Multivibrator [Електронний ресурс]. <https://www.learningelectronics.net/VA3AVR/gadgets/555/555.html> (дата звернення: 06.11.2022)
22. Airborne Dust: A Hazard to Human Health, Environment and Society, [Електронний ресурс]. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/airborne-dust-hazard-human-health-environment-and-society> (дата звернення: 02.12.2022)

23. Пилевого контролю прибори. [Електронний ресурс]. <http://www.mining-enc.ru/p/pylevogo-kontrolya-pribory/> (дата звернення: 02.12.2022)
24. What is Particle Pollution? [Електронний ресурс]. <https://www.epa.gov/pmcourse/what-particle-pollution> (дата звернення: 02.12.2022)
25. Měření koncentrace prachu a senzory prachu [Електронний ресурс]. <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111201> (дата звернення: 06.11.2022)
26. Технічний університет тепер моніторить повітря у Вінниці. [Електронний ресурс]. <https://vitatv.com.ua/tekhnichnyy-universytet-teper-monitoryt-povitrya-u/> (дата звернення: 02.12.2022)
27. DustDuino. [Електронний ресурс] <https://publiclab.org/wiki/dustduino> (дата звернення: 02.12.2022)

### Додаток А

#### Схема однопроменевого оптичного піломіра



- Коробка
- ~ Покришка ІЧ випромінювання
- Отвори для проходження пилу