

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

614.894.22.001.76

РАДЧУК ДМИТРО ІГОРОВИЧ

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
КОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ОРГАНІВ
ДИХАННЯ З КАПЮШОНОМ**

Спеціальність 05.26.01 – охорона праці

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Д.І. Радчук

Науковий консультант – Чеберячко Юрій Іванович
доктор технічних наук, професор

Дніпро - 2026

АНОТАЦІЯ

Радчук Д.І. Наукове обґрунтування та вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – охорона праці – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено важливу для охорони праці науково-практичну проблему забезпечення працівників енергоефективними та ергономічними індивідуальними засобами захисту органів дихання для небезпечних виробничих умов, здатними адаптуватися до конкретного виробничого завдання. Розв’язання цієї проблеми досягнуто шляхом встановлення закономірностей між фізичними та когнітивними енерговитратами користувача й ефективним часом захисної дії фільтрувальної системи, який визначається динамікою акумуляції діоксиду вуглецю у внутрішньому об’ємі захисного капюшона та розподілом аеродинамічних характеристик повітряного потоку в підмасковому просторі. Також враховано взаємозв’язок між перепадом тиску на фільтрах респіратора, геометричними параметрами фільтрувальних коробок і залишковим часом захисної дії, що безпосередньо впливає на енерговитрати користувача та ефективність роботи фільтрів.

У першому розділі проведено глибокий аналіз сучасного стану розробки, виготовлення та експлуатації фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД), зокрема респіраторів з фільтрами. Розглянуто еволюцію підходів до проектування фільтрувальних респіраторів, що застосовуються в умовах підвищеної концентрації пилу, газів та аерозолів різного походження.

Узагальнено існуючі концепції проектування фільтрувальних ЗІЗОД, зокрема принципи формування аеродинамічних каналів, вибір фільтрувальних матеріалів і конструктивні рішення, що забезпечують мінімальний опір диханню при максимальній ефективності очищення повітря. Наведено порівняльний аналіз класичних і сучасних підходів до моделювання потоків повітря в середині фільтрувальних елементів.

Детально розглянуто вимоги до скомбінованих ЗІЗОД, які регламентуються чинними національними та міжнародними стандартами. Проаналізовано показники, що визначають ефективність і безпечність використання ЗІЗОД, такі як коефіцієнт проникнення шкідливих речовин, опір диханню, герметичність прилягання та ергономічні властивості.

Проведено аналіз способів ізолювання органів дихання від навколишнього середовища, зокрема за допомогою півмасок і масок фільтрувального типу. Розглянуто вплив геометричних параметрів, конструктивних особливостей та матеріалів ущільнювальних елементів на загальний коефіцієнт захисту користувача.

Проведено аналіз характеристик і конструктивних особливостей існуючих моделей моторових фільтрувальних респіраторів (МФР) провідних світових виробників 3M Versaflo TR-600, Honeywell North Primair PA7000, Scott Safety Duraflow SRS. Отримані результати стали основою для формування технічного завдання на створення удосконаленого МФР.

Здійснено аналіз фільтрувальних матеріалів, що використовуються при виготовленні сучасних ЗІЗОД. Охарактеризовано волокнисті, вугільні, композитні та наноструктурні матеріали, розглянуто їхні властивості, сорбційні характеристики та стійкість до впливу агресивних середовищ. Показано, що раціональний вибір матеріалу безпосередньо впливає на термін служби та ефективність фільтрувального засобу.

Виконано аналіз методів визначення часу захисної дії фільтрувальних ЗІЗОД. Розглянуто існуючі експериментальні та розрахункові підходи, що дозволяють прогнозувати момент насичення фільтрувального шару

шкідливими речовинами. Визначено недоліки традиційних методів, які не враховують нерівномірність розподілу повітряного потоку всередині фільтру.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що одним із ключових чинників, які обмежують ефективність фільтрувальних засобів, є неповне використання активного об'єму фільтрувального матеріалу через утворення так званих «мертвих зон». Це призводить до збільшення опору диханню, зниження ресурсу фільтру та підвищення енергетичних витрат користувача.

На основі отриманих результатів обґрунтовано необхідність удосконалення конструкцій фільтрувальних коробок з урахуванням аеродинамічних характеристик повітряного потоку, геометрії корпусу та рівномірності розподілу швидкості повітря. Сформульовано мету та завдання подальших досліджень, спрямованих на підвищення ефективності використання фільтрувального матеріалу, оптимізацію конструктивних параметрів ЗІЗОД та продовження строку їхньої захисної дії

У другому розділі подано результати комплексних досліджень, спрямованих на удосконалення конструкції лицевої частини фільтрувального респіратору з метою підвищення ергономічних властивостей, зручності користування, рівня комунікації та когнітивної ефективності працівників у процесі тривалого носіння ЗІЗОД.

Розглянуто питання оцінювання впливу носіння захисного капюшона на когнітивні параметри користувачів. На основі експериментальних випробувань визначено зміни швидкості реакції, уваги, точності виконання завдань і часу прийняття рішень під час роботи у фільтрувальному респіраторі різних типів. Встановлено, що короткочасне використання респіратору не лише не знижує когнітивну працездатність, але й сприяє оптимізації психофізіологічного стану завдяки стабілізації дихального ритму та підвищенню концентрації. Водночас тривале носіння без перерв може викликати помірне підвищення втоми через зміну мікроклімату під маскою.

Розроблено та експериментально перевірено удосконалену конструкцію лицевої частини універсального респіратору. Нове

конструктивне рішення передбачає використання гнучкого багатошарового матеріалу з підвищеною еластичністю та зменшенням локального тиску на ділянки шкіри обличчя. Вдосконалено систему кріплення і герметизації, що дозволяє адаптувати респіратор до індивідуальних анатомічних особливостей користувачів. Запропоновано інтеграцію лицевої частини у формі капюшону, що охоплює голову та шию, створюючи безперервну захисну оболонку без точкових зон тиску, характерних для традиційних респіраторів. Таке рішення забезпечує підвищений комфорт і зниження ризику подразнення шкіри при тривалому носінні.

Виконано розрахунок та обґрунтування параметрів шланга. Визначено оптимальний діаметр, довжину та гнучкість шланга для забезпечення стабільної подачі очищеного повітря при мінімальних втратах тиску. Проведено гідродинамічний розрахунок, що враховує турбулентність потоку та можливість накопичення конденсату.

Виконано оцінювання впливу захисного капюшона на зручність комунікації. Проведено дослідження розбірливості мовлення користувачів під час розмови в реальних умовах експлуатації, у тому числі при використанні мобільних пристроїв. Використано методику визначення чіткості мовлення, що враховує тип респіратора, товщину та щільність матеріалу, форму півмаски й відстань до джерела звуку. Встановлено, що форма респіратора має суттєвий вплив на якість мовної передачі: надмірна жорсткість матеріалу або мала внутрішня камера обмежують рухливість м'язів і змінюють акустичні властивості голосу. Вдосконалена конструкція капюшону дає змогу зберігати природність мовлення і полегшує комунікацію користувача з колегами.

Здійснено оцінювання впливу захисного капюшона на працездатність користувачів. Експериментально досліджено параметри серцево-дихальної системи, рівень втомлюваності, зорову і слухову чутливість під час роботи в умовах підвищеної фізичної активності. Встановлено, що оптимізована форма лицевої частини знижує теплове навантаження, покращує вентиляцію

внутрішнього простору та сприяє підтриманню стабільної працездатності протягом тривалого часу. Порівняльний аналіз показав, що користувачі респіраторів із капюшоном демонструють на 10–15 % кращі результати за критеріями комфортності та стійкості до втоми.

Узагальнення результатів розділу засвідчило, що удосконалення лицевої частини респіратора шляхом застосування конструкції у вигляді капюшона забезпечує комплексне підвищення ергономічних, когнітивних і функціональних характеристик ЗІЗОД. Така конструкція сприяє зниженню психологічного навантаження, покращенню комунікативних можливостей та забезпечує більш ефективний захист користувача в умовах тривалої експлуатації. Отримані результати можуть бути використані при подальшому проектуванні респіраторів нового покоління, орієнтованих на комфорт, безпеку та підвищення ефективності праці.

У третьому розділі представлено результати розробки конструкції МФР з капюшоном, спрямованої на підвищення рівня захисту користувача, покращення умов дихання та зменшення фізіологічного навантаження при роботі в середовищах із підвищеною концентрацією пилу, токсичних газів чи біологічних агентів.

Сформульовано загальну концепцію конструкції нового МФР з капюшоном. Запропонована система передбачає інтеграцію фільтрувального модуля, вентилятора, блоку керування з сенсорним моніторингом параметрів повітряного потоку, а також капюшонної лицевої частини, суміщеної з каскою. Така конструкція забезпечує комплексний захист голови, обличчя, шиї та органів дихання, підвищує комфорт користувача, спрощує надягання і знімає обмеження рухів.

Проведено FMEA-аналіз ризиків експериментальної конструкції, який дозволив виявити потенційні відмови системи (вентилятора, фільтраційного блоку, елементів живлення, системи подачі повітря) і визначити шляхи їх мінімізації. Розроблено таблицю пріоритетів ризиків та заходів для їх

усунення, що дало змогу забезпечити високий рівень надійності й безпеки під час експлуатації.

Виконано безпосередню розробку конструкції МФР з капюшоном, яка включає три основні складові: конструкцію капюшону, моторового блоку та шланга подачі повітря.

Розроблено капюшон із комбінованого багат шарового матеріалу, що поєднує механічну міцність, повітронепроникність і гнучкість. Передбачено прозору оглядову панель з антивідблисковим покриттям і вентиляційні канали для запобігання запотіванню. Ергономічна форма капюшона забезпечує герметичність і комфорт при тривалому носінні.

Спроектовано компактний корпус моторового блоку з вентилятором та енергозберігаючим електродвигуном постійного струму, літій-іонною батареєю підвищеної ємності та системою керування з автоматичним регулюванням швидкості обертання залежно від опору фільтра. Передбачено індикатор стану заряду та блок самодіагностики.

Проведено оцінку відповідності експериментального зразка МФР нормативним вимогам за показниками фільтраційної ефективності, рівня шуму, ергономічності та герметичності. Результати випробувань підтвердили, що експериментальний зразок повністю відповідає стандарту, а також може бути сертифікований для промислового використання в умовах хімічних, біологічних, радіаційних та техногенних загроз.

Представлено результати експериментальних досліджень впливу дихальної активності користувача на процеси масообміну та очищення газової суміші у внутрішньому об'ємі МФР з капюшоном. Для моделювання реальних умов експлуатації застосовано дихальну машину, налаштовану на різні режими вентиляції легень, що відповідають різним рівням фізичного навантаження. Дослідження проводили як за умов відсутності подачі повітря, так і при роботі моторизованого блоку. Отримані результати підтверджують необхідність урахування інтенсивності дихання під час моделювання масообміну в капюшоні та можуть бути застосовані для вдосконалення

методів оцінки ефективності респіраторних систем під час реальних експлуатаційних навантажень.

Розроблено математичну модель МФР з капюшоном, яка описує взаємозв'язок між параметрами роботи вентилятора, опором фільтра, геометрією шлангової системи та швидкістю подачі очищеного повітря до зони дихання. Модель дозволила встановити оптимальні режими подачі повітря залежно від рівня фізичної активності користувача, забезпечуючи стабільність тиску і комфортне дихання. Отримані теоретичні результати узгоджуються з даними експериментальних досліджень.

У четвертому розділі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на удосконалення конструкції та визначення оптимальних параметрів скомбінованих фільтрів для універсальних респіраторів, що поєднують високу ефективність очищення повітря, тривалу захисну дію та зручність експлуатації в різних виробничих умовах.

Проведено аналіз впливу робочих умов на використання скомбінованих фільтрів. Встановлено взаємозв'язок між інтенсивністю фізичних навантажень користувача, обсягом вдихуваного повітря та швидкістю насичення фільтрувальних шарів шкідливими речовинами. Визначено, що при зростанні енерговитрат час захисної дії фільтрів зменшується до 40 %, що зумовлено підвищеною швидкістю адсорбції речовин.

Досліджено вплив геометричних параметрів фільтрувальних коробок універсальних ЗІЗОД на захисні властивості. За допомогою моделювання та експериментальних випробувань визначено оптимальні співвідношення розмірів корпусу, об'єму сорбенту й товщини фільтрувального шару, які забезпечують рівномірний розподіл повітряного потоку та мінімальний перепад тиску. Зокрема, доведено переваги циліндричних конструкцій із модифікованим потоком входу, які дозволяють більш ефективно використовувати активний об'єм сорбенту порівняно з плоскими фільтрами.

Виконано пошук закономірностей для раціональної побудови конструкції скомбінованого фільтра. На основі узагальнення теоретичних і практичних результатів сформовано принципи поєднання фізичного та хімічного фільтрування. Визначено вплив співвідношення шарів механічного очищення та сорбційного шару на загальну ефективність та час захисної дії. Розроблено рекомендації, що дозволяють підвищити ступінь очищення повітря при збереженні ергономічності респіратора.

Виконано удосконалення підходів до оповіщення користувачів про закінчення строку служби скомбінованих фільтрів. Запропоновано інноваційне конструктивне рішення, а саме інтеграцію ароматичного індикатора, розміщеного у хлоридно-натрієвій капсулі, що змінює органолептичні властивості повітря при вичерпанні сорбційної ємності фільтра. Такий підхід дозволяє своєчасно попередити користувача про необхідність заміни фільтра без застосування складних електронних систем.

Представлено розробку програмного забезпечення для прогнозування часу захисної дії скомбінованих фільтрів. Програмний комплекс побудовано з урахуванням параметрів дихання користувача, режиму роботи, геометрії фільтрувальних елементів і розподілу повітряних потоків. Алгоритм прогнозування базується на моделюванні процесів фільтрації та накопичення шкідливих речовин у пористій структурі матеріалу. Отримана система дає можливість оперативно оцінювати залишковий час фільтра та оптимізувати його конструкцію для конкретних умов експлуатації.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності взаємозв'язку між робочими навантаженнями, конструктивними параметрами фільтрів і строком їхньої ефективної дії. Обґрунтовано наукові засади створення скомбінованих фільтрів нового покоління, що поєднують високу фільтраційну ефективність, низький опір диханню та інтелектуальні системи індикації. Розроблені конструктивні та програмно-аналітичні рішення створюють основу для подальшої автоматизації процесу контролю

стану фільтрів і підвищення надійності засобів індивідуального захисту органів дихання.

У п'ятому розділі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень, комп'ютерних моделювань, спрямованих на розробку раціональної конструкції універсального фільтрувального респіратора, що забезпечує підвищену ефективність очищення повітря при зниженому опорі диханню та стабільних експлуатаційних характеристиках.

Розглянуто вплив дизайну фільтрувальної коробки на процес фільтрації. Детально описано методику дослідження зміни перепаду тиску на різних варіантах фільтрувальних коробок, що дозволило кількісно оцінити ефективність конструкцій за аеродинамічними параметрами. Проведено серію експериментів, у результаті яких встановлено, що форма коробки, її об'єм та розташування вхідних і вихідних отворів істотно впливають на опір диханню. Зокрема, моделі з плавними контурами та круглими отворами демонструють найменший перепад тиску, що свідчить про рівномірний розподіл повітряних потоків.

Наведено результати комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks, де досліджено рух повітря в коробках з різним розташуванням вихідного отвору. Моделювання підтвердило наявність зон нерівномірного потоку («мертвих зон») у нераціональних конструкціях, що знижує ступінь використання активного шару фільтра. Отримані результати стали основою для вибору оптимальної геометрії корпусу фільтра.

Визначено основні параметри конфігурації фільтрів, які впливають на захисні властивості. Проведено теоретичний аналіз залежностей між товщиною, площею поверхні, щільністю укладання шарів складок та ефективністю очищення повітря. На основі аналітичних і емпіричних даних сформульовано алгоритм розрахунку коефіцієнта конфігурації, що дає змогу встановити оптимальні параметри фільтра для забезпечення мінімального опору повітряному потоку.

Результати моделювання зміни захисних властивостей фільтрів залежно від їх конфігурації, проведеного у SolidWorks, показали, що зі збільшенням кута нахилу складок і рівномірним розподілом каналів повітряного потоку досягається покращення фільтраційної ефективності без значного зростання опору. Лабораторні дослідження підтвердили теоретичні результати та дозволили кількісно оцінити вплив конструктивних параметрів на термін захисної дії респіратора.

Розглянуто вплив конструкції вхідних отворів фільтрувальних коробок на процес руху повітря через корпус фільтра. Встановлено, що застосування отворів із заокругленими краями та плавними переходами суттєво зменшує турбулентність потоку і втрати тиску, що безпосередньо підвищує комфорт користувача під час дихання.

Окремо розглянуто процедуру розробки системи контролю за часом захисної дії фільтрів. Запропоновано інтелектуальну конструкцію, що включає сенсорний блок і важільний механізм для відстеження ступеня насичення фільтрувального матеріалу шкідливими речовинами. Розроблена система дозволяє в реальному часі оцінювати залишковий ресурс фільтра, своєчасно сигналізувати про необхідність його заміни та забезпечувати стабільну ефективність захисту.

Узагальнення результатів другого розділу дозволило встановити взаємозв'язок між геометричними характеристиками фільтрувальної коробки, конфігурацією фільтра та тривалістю його захисної дії. Отримані аналітичні залежності та результати моделювання стали основою для створення універсального фільтрувального респіратора з оптимізованими параметрами, що забезпечує підвищену ефективність захисту, ергономічність і зручність експлуатації.

Наукові положення, що захищаються в дисертації

1. Для моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном збільшення швидкості повітряного потоку з 60 до 200 $\text{дм}^3/\text{хв.}$ зумовлює скорочення коливань внутрішнього тиску ($P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$) залежно від

типорозміру лицевої частини, а саме: від 1,22 до 1,16 для типорозміру М і від 1,11 до 1,108 для типорозміру L, водночас підвищуючи амплітуду коливань швидкості ($V_{\max}/V_{\min}$) в 1,2 рази. При цьому час очищення скорочується у в 3,3 рази незалежно від типу капюшону, що дозволяє прогнозувати інтенсивність навантаження та енерговитрати користувача.

2. Ефективний час об'ємного оновлення повітря у капюшоні моторового фільтрувального респіратора описується теоретично обґрунтованою зворотно пропорційною залежністю від витрати повітря з урахуванням експериментально отриманого коригувального коефіцієнту, що дозволяє врахувати не лише геометричні параметри лицевої частини, а й динаміку масообміну, що зумовлена вентиляцією легень, при чому за об'ємної витрати повітря до 30 $\text{дм}^3/\text{хв}$ коригувальний коефіцієнт перевищує 1, тоді як при збільшенні об'ємної витрати до діапазону 30–60 $\text{дм}^3/\text{хв}$ його значення стає меншим за 1.

3. Експериментально доведено, що аеродинамічний опір на протиаерозольному фільтрі є функцією не тільки геометричних параметрів самого фільтра і властивостей фільтрувального середовища, а й експериментально визначеного коефіцієнту конфігурації складчастого фільтра, який знаходиться в межах від 0,2 до 0,7, та визначає характер потоку і, тим самим, дозволяє прогнозувати ергономічні характеристики складчастого фільтра ще на етапі проєктування.

Наукові результати

1. Розроблено нову концепцію конструкції моторового фільтрувального респіратора (МФР) з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою, що забезпечує високий рівень захисту і надійності.

2. Розроблено нову математичну модель функціонування моторового фільтрувального респіратора, яка описує зміну тиску та витрати повітря в системі «фільтр – вентилятор – повітропровід – капюшон» для оцінювання

стабільності й ефективності функціонування моторового респіратору за різних режимів вентиляції на основі передавальної функції системи.

3. Виявлено нелінійну залежність між енерговитратами користувача, концентрацією шкідливих речовин та ефективністю роботи фільтрів, що визначає зниження часу захисної дії при підвищених фізичних навантаженнях.

4. Уточнено аналітичні залежності між енерговитратами користувача та часом захисної дії можуть бути використані при розробленні нормативів експлуатації респіраторів у різних виробничих умовах

5. Визначено закономірність зміни коефіцієнта конфігурації фільтрувальних матеріалів від щільності упакування волокон та відношення відстані між складками (W_f) до їх висоти, що дозволяє обґрунтувати зростання початкового перепаду тиску складчастого фільтра по відношенню до плаского, що дозволяє встановити раціональні геометричні параметри фільтрувальних коробок.

6. Сформовану уточнену модель розподілу повітряного потоку на поверхні складчастого фільтра, яка поєднує не тільки геометричні форми фільтрів з кількістю повітря, що надходить, а й розташування вхідних і вихідних отворів фільтрувальних коробок, що дозволяє забезпечити максимальне використання площі фільтрувального матеріалу.

Практичне значення роботи полягає у тому, що створено підґрунтя для розробки нових фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання, що включає алгоритм розрахунку коефіцієнта конфігурації може бути використаний при проектуванні нових фільтрів різних типів для забезпечення оптимальних параметрів повітропроникності; програмний комплекс для прогнозування терміну захисної дії фільтрів, який враховує розподіл повітряного потоку, режим дихання та енерговитрати користувача, забезпечуючи похибку не більше 10 % від реальних даних; систему контролю перепаду тиску та залишкового ресурсу фільтра забезпечує оперативне визначення моменту заміни фільтрувальних елементів і підвищує безпеку

користувача; методику оцінювання розбірливості мовлення у респіраторах може бути використана під час сертифікаційних випробувань нових моделей засобів індивідуального захисту.

Розроблений моторовий фільтрувальний респіратор, який відрізняється від відомих конструкцією капюшона з ударозахисною каскою, та моторовим блоком із сучасних матеріалів (ABS+), безколекторним електродвигуном і сенсорною системою на базі мікроконтролера Arduino, а також визначено раціональний діаметр повітропроводу (32 мм), що забезпечує раціональну подачу повітря у відповідності до умов праці та виконуваного завдання.

Експериментально підтверджено, що ефективний час захисної дії протигазових фільтрів залежить не тільки від концентрації та типу (природи) шкідливої речовини, кліматичних параметрів навколишнього середовища, аеродинаміки фільтрувальної коробки, типу та об'єму сорбенту та фізичного навантаження користувача, які являються визначальними у діапазоні концентрації шкідливої речовини більше 300 ppm, тоді як у діапазоні до 300 ppm визначальною являється саме концентрації шкідливої речовини, що дозволяє прогнозувати ефективний час роботи фільтрів в залежності від робочих умов.

Ключові слова: респіратор, скомбінований фільтр, фільтрувальна коробка, капюшон, коефіцієнт захисту, аеродинамічні характеристики, моделювання, ризик, моторовий фільтрувальний пристрій.

SUMMARY

Radchuk D.I. Theoretical Justification and Improvement of the Design of Respiratory Protection Equipment with Hood. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.26.01 – labour protection – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

In the dissertation, which represents a completed research work, an important scientific and practical problem in the field of occupational safety is addressed, namely ensuring that workers are provided with energy-efficient and ergonomic personal respiratory protective equipment for hazardous industrial conditions, capable of adapting to specific operational tasks.

The solution to this problem was achieved by identifying the relationships between the user's physical and cognitive energy expenditure and the effective duration of the protective action of the filtering system, which is determined by the dynamics of carbon dioxide accumulation in the internal volume of the protective hood and by the distribution of aerodynamic characteristics of the airflow in the undermask space.

Additionally, the interrelationship between the pressure drop across respirator filters, the geometric parameters of filter cartridges, and the residual protective action time was taken into account, as this directly affects the user's energy expenditure and the filtration efficiency of the filters..

In the first chapter, an in-depth analysis of the current state of development, manufacturing, and operation of filtering respiratory protective devices (RPDs), particularly respirators with filters, is presented. The evolution of design approaches for filtering respirators used in environments with high concentrations of dust, gases, and aerosols of various origins is examined.

Existing design concepts for filtering RPDs are summarized, including the principles of forming aerodynamic channels, selecting filtering materials, and implementing structural solutions that ensure minimal breathing resistance while maintaining maximum air purification efficiency. A comparative analysis of classical and modern approaches to modeling airflow inside filters is provided.

The requirements for combined RPDs, as regulated by current national and international standards, are considered in detail. Indicators determining the efficiency and safety of RPD use such as the penetration coefficient of harmful substances, breathing resistance, facepiece tightness, and ergonomic characteristics are analyzed.

Methods of isolating the respiratory organs from the environment are reviewed, particularly through the use of filtering half masks and full-face masks. The influence of geometric parameters, structural features, and materials of sealing elements on the overall protection factor of the user is examined.

An analysis of the characteristics and structural features of existing powered filtering respirator (PFR) produced by leading global manufacturers 3M Versaflo TR-600, Honeywell North Primair PA7000, and Scott Safety Duraflow SRS was carried out. The results formed the basis for defining the technical requirements for the development of an improved PFR.

An analysis of filtering materials used in the manufacture of modern RPDs is carried out. Fibrous, carbon-based, composite, and nanostructured materials are characterized, with attention to their properties, sorption characteristics, and resistance to aggressive environments. It is shown that the rational selection of materials directly affects the service life and efficiency of the filtering device.

Methods for determining the protective time of filtering RPDs are analyzed. Existing experimental and computational approaches that allow forecasting the saturation point of the filtering layer with harmful substances are reviewed. The drawbacks of traditional methods, which fail to account for the uneven distribution of airflow within the filter, are identified.

As a result of the conducted analysis, it is established that one of the key factors limiting the efficiency of filtering devices is the incomplete utilization of the active volume of the filtering material due to the formation of so-called “dead space”. This leads to increased breathing resistance, reduced filter life, and higher energy expenditure for the user.

Based on the obtained results, the necessity of improving the design of filter cartridges is substantiated, taking into account the aerodynamic characteristics of the airflow, the geometry of the housing, and the uniformity of air velocity distribution. The goals and objectives of further research are formulated, aimed at enhancing the efficiency of filtering material utilization, optimizing the structural parameters of RPDs, and extending their protective service life.

In the second chapter, the results of comprehensive studies aimed at improving the design of the facepiece of a filtering respirator are presented. The purpose of these improvements is to enhance ergonomic properties, user comfort, communication quality, and cognitive efficiency of workers during prolonged use of RPDs.

The influence of wearing a protective hood on users' cognitive parameters was assessed. Based on experimental testing, changes in reaction speed, attention, task accuracy, and decision-making time while working in different types of filtering respirators were determined. It was found that short-term use of a respirator not only does not reduce cognitive performance but also helps optimize the psychophysiological state by stabilizing breathing rhythm and increasing concentration. However, prolonged continuous wear may cause moderate fatigue due to changes in the microclimate under the facepiece.

An improved design of the facepiece of a universal respirator was developed and experimentally tested. The new design incorporates a flexible multilayer material with enhanced elasticity, reducing local pressure on facial skin areas. The attachment and sealing system was refined to allow adaptation of the respirator to the individual anatomical features of users. A hood-shaped facepiece design was proposed, covering the head and neck to create a continuous protective shell without the localized pressure points typical of traditional respirators. This solution provides improved comfort and reduces the risk of skin irritation during extended wear.

The air hose parameters were calculated and justified. The optimal diameter, length, and flexibility were determined to ensure stable delivery of clean air with minimal pressure loss. A hydrodynamic analysis was performed, taking into account flow turbulence and the potential for condensate accumulation.

The impact of the protective hood on communication comfort was also evaluated. Speech intelligibility tests were conducted under real operating conditions, including during mobile device use. The speech clarity assessment method considered respirator type, material thickness and density, half-mask

shape, and distance from the sound source. It was found that the shape of the respirator significantly affects speech transmission quality: excessive material rigidity or a small internal cavity limits facial muscle movement and alters the acoustic properties of the voice. The improved hood design allows for more natural speech and facilitates communication among users.

The effect of the protective hood on user performance was studied experimentally. Cardiopulmonary parameters, fatigue levels, and visual and auditory sensitivity were measured under conditions of increased physical activity. It was established that the optimized facepiece shape reduces thermal load, improves internal ventilation, and helps maintain stable performance over extended periods. A comparative analysis showed that users of hood-type respirators demonstrated 10-15% better results in comfort and fatigue resistance compared to those using standard models.

The summary of this chapter indicates that improving the respirator facepiece through the use of a hood-type design ensures a comprehensive enhancement of ergonomic, cognitive, and functional characteristics of RPDs. This design reduces psychological strain, improves communication capabilities, and provides more effective user protection during prolonged operation. The obtained results can be applied in the design of next-generation respirators, focused on comfort, safety, and improved work efficiency.

In the third chapter, the results of the development of a powered filtering respirator (PFR) with a hood are presented. The design aims to enhance user protection, improve breathing conditions, and reduce physiological strain when working in environments with high concentrations of dust, toxic gases, or biological agents.

A general concept for the new PFR design with hood was formulated. The proposed system integrates a filter module, fan, control unit with sensor-based airflow monitoring, and a hood-type facepiece combined with a helmet. This design provides comprehensive protection of the head, face, neck, and respiratory

organs, enhances user comfort, simplifies donning and doffing, and eliminates movement restrictions.

An FMEA risk analysis of the experimental design was conducted to identify potential system failures (fan, filtration unit, power supply elements, air delivery system) and determine ways to minimize them. A risk priority and mitigation table was developed, ensuring a high level of reliability and safety during operation.

The direct design of the PFR with hood was carried out, consisting of three main components: the hood, the motor unit, and the air supply hose.

The hood was designed using a composite multilayer material that combines mechanical strength, air tightness, and flexibility. A transparent anti-glare viewing panel and ventilation channels were incorporated to prevent fogging. The ergonomic hood shape ensures both a tight seal and comfort during prolonged wear.

A compact motor unit was designed, featuring a fan driven by an energy-efficient DC electric motor, a high-capacity lithium-ion battery, and an automatic control system that adjusts fan speed according to filter resistance. A charge level indicator and self-diagnostic module were included.

The experimental prototype of the PFR with hood was evaluated for compliance with regulatory requirements in terms of filtration efficiency, noise level, ergonomics, and air tightness. Test results confirmed that the prototype fully meets the standard and can be certified for industrial use under chemical, biological, radiological, and technogenic hazard conditions.

The results of experimental studies of the influence of the user's respiratory activity on the processes of mass exchange and purification of the gas mixture in the internal volume of the PFR with a hood are presented. To simulate real operating conditions, a breathing machine was used, configured for different lung ventilation modes corresponding to different levels of physical exertion. The studies were conducted both in the absence of air supply and during operation of the powered unit. The results obtained confirm the need to take into account the

intensity of breathing when modeling mass exchange in the hood and can be used to improve methods for assessing the effectiveness of respiratory systems during real operational loads.

A mathematical model of the PFR with hood was developed to describe the relationship between fan operating parameters, filter resistance, hose system geometry, and the rate of clean air delivery to the breathing zone. The model allowed determination of optimal airflow modes depending on the user's level of physical activity, ensuring stable pressure and comfortable breathing. The theoretical results were consistent with experimental data.

In the fourth chapter, the results of theoretical and experimental studies aimed at improving the design and determining the optimal parameters of combined filters for universal respirators are presented. These filters combine high air purification efficiency, long protective time, and ease of use under various industrial conditions.

An analysis of the influence of working conditions on the use of combined filters was conducted. The relationship between the user's physical workload, the volume of inhaled air, and the rate of saturation of filtering layers with harmful substances was established. It was determined that as energy expenditure increases, the protective time of filters decreases by up to 40%, due to the accelerated rate of substance adsorption.

The influence of geometric parameters of the filter cartridges in combined RPDs on protective performance was investigated. Through modeling and experimental testing, optimal ratios between housing dimensions, sorbent volume, and filter layer thickness were determined to ensure uniform airflow distribution and minimal pressure drop. In particular, the advantages of cylindrical constructions with a modified inlet flow were demonstrated, as they allow for more efficient utilization of the active volume of the sorbent compared to flat filters.

Patterns for the rational design of combined filters were identified. Based on the generalization of theoretical and experimental results, principles for combining physical and chemical filtration were formulated. The influence of the ratio

between mechanical cleaning layers and the sorption layer on overall efficiency and protective duration was determined. Recommendations were developed to increase the degree of air purification while maintaining the ergonomic qualities of the respirator.

Approaches to alerting users about the end of the service life of combined filters were improved. An innovative design solution was proposed the integration of an aromatic indicator placed in a sodium-chloride capsule, which changes the organoleptic properties of inhaled air when the sorption capacity of the filter is exhausted. This approach enables timely user notification about the need for filter replacement without the use of complex electronic systems.

A software system for predicting the protective time of combined filters was developed. The software suite was designed considering user breathing parameters, working mode, geometry of filtering elements, and airflow distribution. The forecasting algorithm is based on modeling filtration processes and the accumulation of harmful substances within the porous structure of the material. The developed system enables real-time estimation of the remaining filter service life and optimization of its design for specific operating conditions.

As a result of the conducted research, patterns of interdependence between working loads, filter design parameters, and their effective service life were established. The scientific foundations for creating next-generation combined filters were substantiated filters that integrate high filtration efficiency, low breathing resistance, and intelligent indication systems. The developed structural and software-analytical solutions provide a basis for further automation of filter condition monitoring and for enhancing the reliability of RPD.

In the fifth chapter, the results of theoretical and experimental studies, as well as computer simulations, aimed at developing a rational design of a universal filtering respirator that provides increased air purification efficiency with reduced breathing resistance and stable operational characteristics, are presented.

The influence of the filter cartridge design on the filtration process is examined. The methodology for studying changes in pressure drop across various

filter cartridge configurations is described in detail, allowing for a quantitative assessment of design efficiency based on aerodynamic parameters. A series of experiments revealed that the shape of the cartridge, its' volume, and the arrangement of inlet and outlet openings significantly affect breathing resistance. In particular, models with smooth contours and circular openings demonstrated the lowest pressure drop, indicating a more uniform distribution of airflow.

The results of computer simulations conducted in the SolidWorks environment are presented, where the movement of air inside cartridges with different outlet positions was analyzed. The simulations confirmed the presence of uneven flow zones ("dead spaces") in non-optimal designs, which reduce the utilization of the active filter layer. These findings served as the basis for selecting the optimal geometry of the filter housing.

The main configuration parameters of filters that influence their protective properties were identified. A theoretical analysis of the relationships between the thickness, surface area, packing density of pleated layers, and air purification efficiency was performed. Based on analytical and empirical data, an algorithm for calculating the configuration coefficient was formulated, allowing determination of optimal filter parameters to ensure minimal airflow resistance.

The simulation results of changes in filter protective properties depending on their configuration, carried out in SolidWorks, showed that increasing the pleat angle and ensuring a uniform distribution of airflow channels lead to improved filtration efficiency without a significant increase in resistance. Laboratory studies confirmed the theoretical results and enabled a quantitative assessment of how structural parameters affect the respirator's protective service life.

The influence of the inlet design of filter cartridges on airflow through the filter body was also investigated. It was found that the use of inlets with rounded edges and smooth transitions significantly reduces flow turbulence and pressure losses, directly enhancing breathing comfort for the user.

A separate section addresses the development of a filter protection time monitoring system. An intelligent design was proposed, incorporating a sensor unit

and a lever mechanism to track the degree of saturation of the filtering material with harmful substances. The developed system allows real-time assessment of the filter's remaining service life, timely signaling of the need for replacement, and ensures consistently high protective efficiency.

The summary of the second chapter established a correlation between the geometric characteristics of the filter cartridge, the filter configuration, and the protective time. The obtained analytical relationships and simulation results formed the foundation for developing a universal filtering respirator with optimized parameters, providing enhanced protection efficiency, ergonomics, and ease of use.

Scientific propositions defended in the dissertation:

1. For powered filtering respirators with a hood, increasing the air flow rate from 60 to 200 dm³/min. causes a reduction in internal pressure fluctuations ($P_{\max}/P_{\min}$) depending on the size of the facepiece, namely: from 1.22 to 1.16 for size M and from 1.11 to 1.108 for size L, while increasing the amplitude of speed fluctuations ($V_{\max}/V_{\min}$) by 1.2 times. At the same time, the cleaning time is reduced by 3.3 times regardless of the type of hood, which allows predicting the intensity of the load and energy consumption of the user.

2. The effective time of volumetric air renewal in the hood of a powered filtering respirator is described by a theoretically justified inversely proportional dependence on the air flow rate, taking into account the experimentally obtained correction factor, which allows us to take into account not only the geometric parameters of the facepiece, but also the dynamics of mass exchange caused by lung ventilation, with the correction factor exceeding 1 at a volumetric air flow rate of up to 30 dm³/min, while with an increase in the volumetric air flow rate to the range of 30-60 dm³/min, its value becomes less than 1.

3. It has been experimentally proven that the aerodynamic resistance on an anti-aerosol filter is a function not only of the geometric parameters of the filter itself and the properties of the filtering medium, but also of the experimentally determined configuration coefficient of the pleated filter, which is in the range

from 0.2 to 0.7, and determines the nature of the flow and, thereby, allows us to predict the ergonomic characteristics of the pleated filter still at the design stage.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. A new design concept of a powered filtering respirator has been improved to include automatic airflow regulation, a sensor-based monitoring system, and the integration of the hood with a helmet, ensuring a high level of protection and reliability.

2. A new mathematical model of the operation of a powered filtering respirator has been developed. The model describes the changes in pressure and airflow in the "filter–fan–air hose–hood" system, enabling the assessment of the stability and efficiency of powered filtering respirator operation under different ventilation modes based on the system's transfer function.

3. A nonlinear relationship has been established between user energy expenditure, the concentration of harmful substances, and filter performance, which determines the reduction of protective time under increased physical load.

4. Refined analytical dependencies between user energy expenditure and protective time have been further developed and can be applied in establishing operational standards for respirators under various industrial conditions.

5. The regularity of the variation in the configuration coefficient of filtering materials depending on fiber packing density and the ratio of the distance between pleats (W_f) to their height has been determined. This makes it possible to justify the increase in the initial pressure drop of a pleated filter compared to a flat one and to establish the optimal geometric parameters of filter cartridges.

6. A refined model of airflow distribution model over the surface of a pleated filter has been refined. It now accounts not only for the geometric shape of the filters and the incoming airflow rate but also for the arrangement of inlet and outlet openings in the filter cartridges, allowing for maximal utilization of the filtering material surface.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a foundation for developing new filtering personal respiratory protective equipment,

which includes an algorithm for calculating the configuration coefficient that can be used in the design of new filter types to ensure optimal air permeability parameters; a software package for predicting the protective time of filters that takes into account airflow distribution, breathing patterns, and user energy expenditure, providing an error margin of no more than 10% compared to real data; a system for monitoring pressure drop and residual filter capacity, which enables timely detection of the moment for filter replacement and enhances user safety; a methodology for evaluating speech intelligibility while wearing respirators, which can be applied during certification testing of new personal protective equipment models.

A powered filtering respirator has been developed, which differs from existing designs by incorporating a hood with a helmet against impact, a motor unit made of modern materials (ABS+), a brushless electric motor, and a sensor system based on an Arduino microcontroller. In addition, the optimal air duct diameter (32 mm) has been determined, ensuring efficient air delivery in accordance with working conditions and the nature of the performed task.

The effective protective time of gas filters depends not only on the concentration and type (nature) of the hazardous substance, the environmental climatic parameters, the aerodynamics of the filter housing, the type and volume of sorbent, and the user's physical workload, but also on the processes of CO₂ accumulation and renewal of the air environment in the under-hood breathing space. These factors become decisive when the hazardous substance concentration exceeds 300 ppm, while at concentrations below 300 ppm the determining factor is the concentration of the hazardous substance itself.

Key words: respirator, combined filter, filter cartridge, hood, protection factor, aerodynamic characteristics, modeling, risk, powered filtering device.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях:

1. **Golinko V. I., Cheberyachko Yu. I., Cheberyachko S. I., Radchuk D. I.** Improving the protective efficiency of elastomeric filter respirators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 2 (6(74)). P. 60–64. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.41210>.
2. **Cheberiachko S., Yavors'ka O., Radchuk D., Yavorskyi A.** Respiratory Protection Provided by Negative Pressure Half Mask Filtering Respirators in Coal Mines. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 232–240. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.232>.
3. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І.** Ергономічна оцінка респіраторів. *Геотехнічна механіка*. 2012. Вип. 107. С. 51–57. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/54389>
4. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М.** Оцінка надійності протипилових респіраторів. *Геотехнічна механіка*. 2013. Вип. 112. С. 72–82. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/87389>.
5. **Долгова Т. І., Чеберячко С. І., Радчук Д. І.** Дослідження ефективності роботи клапанів видиху фільтрувальних півмасок. *Геотехнічна механіка*. 2014. Вип. 115. С. 199–208. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000167955>.
6. **Радчук Д. І.** Улучшение защитных характеристик легких фильтрующих полумасок. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности*. 2015. Вып. 83. С. 165–170.
7. **Фрундін В. Ю., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І.** Дослідження ефективності протипилових фільтрів для умов вугільних шахт. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. № 49. С. 285–296. URL: <http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/10-2015-rik>.
8. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Фрундін В. Ю.**

Експериментальні дослідження впливу вологості повітря на захисні властивості електретних фільтрів. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2016. № 96. С. 59–66.

9. **Cheberyachko S. I., Radchuk D. I., Cheberyachko Y. I., Ziborova M. O.** On Development of a New Filtering Half-Mask. *Mechanics, Materials Science & Engineering*. 2016. Vol. 4. P. 164–170. URL: https://issuu.com/mmsejournal/docs/mmse_journal_vol4.

10. **Holinko V., Cheberiachko S., Yavorska O., Radchuk D.** Study of protective properties of half-masks respirators used by miners. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 29–36. URL: <https://doi.org/10.15407/mining10.04.029>.

11. **Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І.** Дослідження ефективності конструкцій фільтрувальних коробок. *Наукові вісті НТУ «Київський політехнічний інститут»*. 2017. № 2. С. 114–118. URL: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551>.

12. **Чеберячко С. І., Столбченко О. В., Радчук Д. І., Зіборова М. О.** До способу розробки ергономічних фільтрувальних півмасок. *Геотехнічна механіка*. 2017. Вип. 134. С. 67–75. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000887013>.

13. **Cheberiachko S. I., Cheberyacko Yu. I., Yavors'ka O. A., Radchuk D. I.** Study of the Efficiency of Dust Filters in Terms of Coal Mines. *Mechanics, Materials Science & Engineering*. 2017. Vol. 10. P. 218–228. URL: <https://issuu.com/mmsejournal/docs/mmse-journal-vol-10-2017>.

14. **Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Столбченко О. В., Радчук Д. І.** Експериментальні дослідження впливу параметрів мікроклімату на працездатність людини під час використання фільтрувальних респіраторів. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2017. № 4 (53). С. 54–58. URL: <https://doi.org/10.33573/ujoh2017.04.054>.

15. **Голінько В. І., Дубенчук М. Є., Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Яворська О. О.** Дослідження захисних властивостей півмаски РПА з

протиаерозольними фільтрами різних виробників. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. № 55. С. 342–350. URL: <http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/ua-2018-55>.

16. Колесник В. Є., Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Нестерова О. Ю. Експериментальна перевірка ізолювальних властивостей легких протипилових півмасок. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности*. 2018. Вып. 105. С. 166–173.

17. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Столбченко О. В., Клімов Д. Г. Дослідження ізоляційних властивостей півмаски респіратора. *Геотехнічна механіка*. 2019. Вип. 149. С. 223–232. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.223>; URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001103613>

18. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В. Розрахунок коефіцієнта захисту фільтрувального респіратору з врахуванням підсосів по смузі обтюрації. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2020. № 1 (46). С. 232–239. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-232-239>.

19. Borodina N., Cheberiachko S., Cheberyachko Yu., Deryugin O., Radchuk D., Klimov D. Study of protective efficiency of respirator with forced air supply. *Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”*. 2020. Vol. 10, No. 6. P. 192–201. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.6.18>.

20. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Пустовой Д. С. Експериментальне дослідження пиломісткості фільтрувальних матеріалів для протипилових респіраторів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2020. Вип. 36 (1). С. 12–17. URL: <https://doi.org/10.36804/nndipbor.36-1.2020.12-17>.

21. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Шароватова О. П., Луценко Т. О. Вплив фільтрувальних респіраторів на розбірливість мовлення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. Вип. 3 (36). С. 219–232. URL: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-17>.

22. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В.,

Клімов Д. Г., Шароватова О. П., Грідяєв В. В. Засоби індивідуального захисту органів дихання: інновації щодо зниження ризику професійних захворювань. *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 1, Вип. 175. С. 221–228. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-221-228>.

23. **Яворська О. О., Радчук Д. І., Яворський А. В., Лантух Д. О., Сосулев Є. І.** Вплив пандемії COVID-19 на безпекову стійкість підприємств. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2022. № 1(8)–2(9). С. 228–238. URL: [https://doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-228-238](https://doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-228-238).

24. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Сушко Н. С., Кравченко Б. Д.** Розробка нової класифікації засобів індивідуального захисту органів дихання. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2022. Вип. 45. С. 109–119. URL: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022>.

25. **Радчук Д. І., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В.** Аналіз ефективності існуючих способів визначення часу захисної дії протигазових фільтрів. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2023. № 2 (11). С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-128-137>.

26. **Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М., Чеберячко С. І.** Дослідження впливу конструктивних параметрів протигазових фільтрувальних коробок на термін захисної дії респіраторів. *Social Development and Security*. 2024. № 14 (3). С. 180–194. URL: <http://www.paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/689>.

27. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М., Кравченко Б. Д.** Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора від шкідливого аерозолі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 48. С. 142–157. URL: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310702>.

28. **Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Чеберячко С. І., Наумов М. М., Кравченко Б. Д.** Розробка програми для розрахунку прогнозного часу

експлуатації протигазових фільтрів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2024. Вип. 2. С. 80–91. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-2-80-91>.

29. **Радчук Д. І., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М.** Розробка скомбінованого фільтру з індикацією закінчення строку служби для протигазу. *Електротехнічні та інформаційні системи*. 2024. Вип. 106. С. 100–109. URL: <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-17>.

30. **Голінько В., Радчук Д., Чеберячко С., Наумов М., Кравченко Б., Дерюгін О.** Оцінювання експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Т. 8, № 2. С. 27–43. URL: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/203/194>.

31. **Radchuk D., Cheberiachko S., Deryugin O., Sharovatova O.** The Study of the Mechanical Strength of Polypropylene Filter Material for the Production of Disposable Respirators. *International Scientific Applied Conference “Problems of Emergency Situations” (PES 2024)*. 2025. P. 11–23. URL: <https://doi.org/10.4028/b-2wQHs4>.

32. **Радчук Д. І., Хома Р. Є., Яворська О. О., Чеберячко Ю. І., Муха О. А., Шошин Д. В.** Удосконалення процесу розробки фільтрувального респіратора. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2025. № 1 (14). С. 166–184. URL: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-1-14-166-184>.

Статті у виданнях включених до бази SCOPUS:

33. **Чеберячко С. І., Наумов М. М., Радчук Д. І.** До питання визначення захисної ефективності протипилових респіраторів за тест-аерозолем «парафінова олива». *Науковий вісник НГУ*. 2012. № 3. С. 102–106. URL: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/zarozdilami/ekologiya/271-do-pitannya-viznachennya-zakhisnoji-efektivnosti-protipilovikh-respiratoriv-za-test-aerозolem-parafinova-oliva>

34. **Голінько В. І., Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І.** Дослідження аеродинамічного опору диханню протипилових респіраторів.

Науковий вісник Національного гірничого університету. 2014. № 6. С. 131–136. URL: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/997-2014/zmist-6-2014/ekologichna-bezpeka-okhorona-pratsi/2826-doslidzhennya-aerodinamichnogo-oporu-dikhannyu-protipilovikh-respiratoriv>

35. **Okrasa M., Cheberyachko S., Radchuk D., Deryugin O., Sharovatova O.** Evaluation of properties of elastomeric head straps of filtering facepiece respirators. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2023. Vol. 29 (4). P. 1294–1300. URL: <https://doi.org/10.1080/10803548.2023.2257066>.

36. **Bazaluk O., Tsopa V., Cheberichko S., Deryugin O., Radchuk D., Borovytskyi O., Lozynskyi V.** Ergonomic risk management process for safety and health at work. *Frontiers in Public Health*. 2023. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1253141>.

37. **Radchuk D., Cheberichko S., Deryugin O., Sharovatova O.** The Study of the Mechanical Strength of Polypropylene Filter Material for the Production of Disposable Respirators. *Solid State Phenomena*. 2024. Vol. 364. P. 89–100. URL: <https://doi.org/10.4028/p-c3LL1b>.

38. **Cheberichko S., Radchuk D., Cheberichko Yu., Deryugin O., Naumov M.** Evaluation of the Impact of Wearing a Filtering Half Mask on the Cognitive Indicators of Users. *Advances in Science and Technology*. 2025. Vol. 162. P. 109–119. URL: <https://doi.org/10.4028/p-1jvLXW>.

Матеріали наукових конференцій:

39 **Cheberyachko S., Yavors'ka O., Stolbchenko O., Radchuk D.** Protective Efficiency of Filtering Respirators. *Advanced Engineering Forum*. 2017. Vol. 25. P. 88–96. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.25.88>.

40 **Cheberichko S., Cheberichko Yu., Radchuk D., Deryugin O., Nesterova O.** Improvement of the procedure of new filter masks development. *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 305. 00038. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202030500038>.

41 **Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Столбченко О. В., Наумов М. М., Книш І. М.** Розробка алгоритму виготовлення наголів'я з урахуванням даних 3D моделей голів користувачів. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ: Матеріали XIX міжнародної конференції молодих вчених* (Дніпро, 28 жовтня 2021 р.). Дніпро: ІГТМ ім. М. С. Полякова НАН України, 2021. С. 163–169.

42 **Cheberiachko S., Naumov N., Cheberiachko Yu.** Development of the filtering half mask model against particles and viruses. *3rd International Webinar on Physical Health, Nursing Care and COVID-19 Management* (Kington, UK, 23–24 July 2021). Scientific Meditech, 2021.

43 **Cheberiachko S.** Risks of cognitive prejudice of decision making in health and safety. *Online 4th SAFETY GALA VIRTUAL WORKSHOP* (ERA Ltd, Athens, Greece, 5–6 April 2022).

44 **Радчук Д., Чеберячко Ю., Наумов М.** Щодо умов використання скомбінованих фільтрів у підземних шахтних умовах. *Українська школа гірничої інженерії: тези доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції*. Дніпро: Лпрес, 2024. С. 37–38.

45 **Radchuk D.** Using software to reduce the risk of workers gas poisoning. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: збірник матеріалів VIII Міжнародного конгресу* (Львів, 16–18 жовтня 2024 р.). Київ: ГО «МНГ», 2024. С. 233–234. URL: <https://science.lpnu.ua/uk/ekokongres-2024/zbirnyk-tez-2024-r>.

Статті у інших виданнях

46. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Денисова С. А., Гордєєва Л. І., Наумов М. М.** Підвищення якості оцінки захисної ефективності протипилових засобів індивідуального захисту органів дихання. *Метрологія та прилади*. 2013. № 5. С. 61–65.

47. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І.** До питання підвищення якості випробування протипилових респіраторів. *Метрологія та прилади*. 2014. № 1. С. 66–71.
48. **Яворська О. О., Чеберячко С. І., Радчук Д. І.** Визначення розмірів вибірки для проведення лабораторних випробувань фільтрувальних півмасок. *Метрологія та прилади*. 2015. № 3. С. 24–29.
49. **Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І.** Методика підбору випробувачів дослідження фільтрувальних респіраторів. *Метрологія та прилади*. 2016. № 2. С. 36–40.
50. **Радчук Д. І.** Аналіз саморятівників як засобів цивільного захисту на ринку України. *Охорона праці і пожежна безпека*. 2020. № 12. 12 с. URL: <https://e.oppb.com.ua/okhorona-praci-i-pozhezhna-bezpeka-2020-12/analiz-samoryativnikov-yak-zasobiv-civilnogo-zakhistu-na>
51. **Чеберячко С. І., Наумов М. М., Радчук Д. І.** *Охорона праці та пожежна безпека. Спецвипуск. Засоби індивідуального захисту органів дихання та шкіри* [Журнал]. № 2 (6)/2021. Київ: ТОВ «Друкарня “Аванпост”», 2021. 79 с.
52. **Чеберячко С., Радчук Д., Наумов М., Яворська О., Слободяник Н.** *Охорона праці та пожежна безпека. Спецвипуск. Особливості нового Технічного регламенту: обираємо безпечні ЗІЗ* [Електронний ресурс]. № 1 (9)/2022. Київ: ТОВ «Друкарня “Аванпост”», 2022. 84 с.

Навчальні посібники:

53. **Голінько В. І., Чеберячко С. І., Наумов М. М., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В., Радчук Д. І.** Управління виробничими ризиками для обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту: навчальний посібник. Дніпро: Середняк Т. К., 2021. 130 с.

54. **Голінько В. І., Чеберячко С. І., Дерюгін О. В., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І.** Засоби індивідуального захисту: типи, вимоги, рекомендації: навчальний посібник. Дніпро, 2021. 95 с.

55. **Чеберячко С. І., Наумов М. М., Радчук Д. І.** Засоби індивідуального захисту для надзвичайних ситуацій: навчальний посібник [Електронний ресурс]. М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2023. 138 с. 1 електрон. опт. диск (CD-R). Систем. вимоги: Pentium-II/300; 64 MB RAM; Microsoft Windows XP; 60 MB вільного дискового простору; .NET Framework 2.0. Назва з етикетки диска.

Патенти

56. **Пат. № 147372 Україна, МПК А62В 23/00, А62В 18/00.** Фільтрувальний дихальний апарат з примусовою подачею повітря / В. І. Голінько, С. І. Чеберячко, О. В. Дерюгін, Д. В. Славінський, Д. І. Радчук, В. Г. Клімов; НТУ «Дніпровська політехніка». № и 2020 06362; заявл. 01.10.2020; опубл. 05.05.2021, Бюл. № 18.

57. **Пат. на корисну модель № 159947 Україна, МПК А62В 23/02 (2006.01).** Скомбінований фільтр з системою індикації закінчення строку служби / Д. І. Радчук, С. І. Чеберячко, Ю. І. Чеберячко, М. М. Наумов; № заявки и 2024 05107; заявл. 29.10.2024; опубл. 23.07.2025, Бюл. № 30. 4 с.

ЗМІСТ

Терміни та визначення.....	39
Скорочення.....	41
Позначення в формулах.....	41
Вступ.....	48
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ З РОЗВИТКУ	
КОНСТРУКЦІЙ ТА ВИМОГ ДО ВИГОТОВЛЕННІ ТА	
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПИЛОГАЗОЗАХИСНИХ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ	
ЗАСОБІВ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1 Аналіз підходів до проектування фільтрувальних ЗІЗОД.....	60
1.2 Аналіз вимог до комплексних ЗІЗОД.....	73
1.3 Аналіз шляхів вирішення задачі з ізолювання органів дихання півмасками (масками) від навколишнього середовища.....	77
1.4 Аналіз характеристик та конструктивних особливостей існуючих моделей моторовий фільтрувальних респіраторів з капюшоном.....	87
1.5 Аналіз фільтрувальних матеріалів, що використовується при вигодовленні ЗІЗОД.....	90
1.6 Аналіз шляхів вирішення задачі з визначення часу захисної дії фільтрувальних ЗІЗОД.....	97
Висновки до розділу 1. Постановка задач дослідження.....	100
Список використаної літератури до розділу 1.....	103
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЛИЦЕВОЇ	
ЧАСТИНИ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА.....	
2.1 Удосконалення конструкції лицевой частини універсального респіатора.....	123
2.2 Визначення характеристик конструктивних елементів капюшону.....	132

2.3 Розрахунок та обґрунтування параметрів шланга для подачі повітря від моторового блоку до капюшона.....	136
2.4 Результати комп'ютерного моделювання руху повітря через капюшон.....	144
2.5 Оцінювання носіння захисного капюшона на когнітивні параметри користувачів.....	151
2.6 Оцінювання впливу захисного капюшона на зручність комунікації.....	162
2.7 Оцінювання впливу захисного капюшона на працездатність користувачів.....	172
Висновки до розділу 2.....	183
Список використаної літератури до розділу 2.....	184
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МОТОРОВОГО ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА З КАПЮШОНОМ	
3.1 Загальна концепція конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном.....	193
3.2 Оцінка ризиків експериментальної конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном.....	198
3.3 Розробка конструкції моторового респіратора з капюшоном.....	207
3.3.1 Конструкція капюшону до моторового респіратора.....	207
3.3.2 Конструкція моторового блоку.....	208
3.4 Оцінка відповідності експериментального зразка моторового фільтрувального респіратора з капюшоном нормативним вимогам..	217
3.5 Оцінка впливу процесу дихання людини на робочі параметри МФР.....	233
3.6 Математична модель моторового фільтрувального респіратора з капюшоном.....	241
Висновки до розділу 3.....	247
Список використаної літератури до розділу 3.....	248

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СКОМБІНОВАНИХ ФІЛЬТРІВ ДО УНІВЕРСАЛЬНИХ РЕСПІРАТОРІВ

4.1. Аналіз впливу робочих умов на використання скомбінованих фільтрів.....	253
4.2. Дослідження впливу геометричних параметрів протигазової частини фільтрувальних коробок на захисні властивості	260
4.3. Пошук закономірностей для раціональної побудови конструкції протигазової частини фільтра.....	273
4.4. Дослідження та удосконалення підходу до оповіщення користувачів про закінчення строку служби скомбінованих фільтрів.....	285
4.5. Розробка програмного забезпечення для прогнозування часу захисної дії скомбінованих фільтрів універсальних респіраторів.....	299
Висновки до розділу 4.....	306
Список використаної літератури до розділу 4.....	309

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОГО ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА

5.1. Вплив дизайну фільтрувальної коробки на процес фільтрації...	319
5.1.1. Опис методики дослідження зміни перепаду тиску на фільтрувальних коробках.....	319
5.1.2. Результати зміни перепаду тиску на фільтрах розміщених у різних фільтрувальних коробках.....	321
5.1.3. Результати моделювання руху повітряних потоків в коробках з різним розміщенням вихідного отвору в програмному середовищі SolidWorks.....	323
5.2. Визначення параметрів конфігурації фільтрів.....	325
5.2.1. Аналіз теоретичних залежностей між параметрами конфігурації фільтрів та їх захисними властивостями.....	325

5.2.2. Результати моделювання зміни захисних властивостей фільтрів від впливу їх конфігурації в програмному середовищі SolidWorks.....	335
5.2.3. Результати лабораторних досліджень впливу конфігурації фільтра на захисі та експлуатаційні його властивості.....	337
5.3. Вплив конструкції входних отворів фільтрувальних коробок на процес руху повітря через корпус фільтра.....	346
5.4. Розробка системи контролю за часом захисної дії фільтрів.....	361
Висновки до розділу 5.....	369
Список використаної літератури до розділу 5.....	371
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	378
Додаток А. Результати оцінювання ризиків.....	381
Додаток Б. Результати оцінювання ризиків.....	382
Додаток В. Програмний код керування контролером Arduino блоку подачі повітря моторового фільтрувального респіратора.....	383
Додаток Г. Методика визначення загального коефіцієнту проникання респіраторів з капюшоном.....	385
Додаток Д. Протокол лабораторних випробувань моторового фільтрувального респіратора з капюшоном.....	386
Додаток Е. Код програми для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів.....	390

Терміни та визначення

Багатотипний протигазовий фільтр – протигазовий фільтр, який відповідає вимогам більш ніж одного типу протигазового фільтра.

Визначений виробником час захисної дії – визначений виробником час, протягом якого перевищується визначена виробником мінімальна об'ємна швидкість потоку.

Засіб індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) – засіб індивідуального захисту, призначений для захисту дихальних шляхів користувача від вдихання повітря, яке може спричинити шкідливий вплив на здоров'я.

Загальний коефіцієнт проникності – коефіцієнт підсмоктування навколишньої атмосфери в лицеву частину з усіх джерел, враховуючи фільтр або апарат, заміряний у лабораторних умовах з визначеною випробовувальною атмосферою. Розраховують у відсотковому співвідношенні до загального вдихуваного повітря.

Капюшон – вільно припасована лицева частина, яка закриває обличчя та може повністю закривати голову.

Коефіцієнт підсмоктування – підсмоктування навколишньої атмосфери в лицеву частину з усіх джерел, за винятком фільтрів, заміряне в лабораторних умовах з визначеною атмосферою. Розраховують у відсотковому співвідношенні до загального вдихуваного повітря

Коефіцієнт проникнення – відношення кількості атмосферного повітря, що оминаючи фільтрувальну півмаску або фільтри надходить при диханні у підмасковий простір крізь нещільності по смузі обтюрації та негерметичності вузлів клапанів вдику/видику до загальної кількості вдихуваного повітря (розраховується у відсотках).

Моторний фільтрувальний пристрій – фільтрувальний пристрій, у якому повітря надходить до капюшона або каски за допомогою вентилятора, який переносить користувач.

Номинальний час захисної дії – використовуваний для класифікування час експлуатації апарата, визначений під час лабораторних випробовувань з об'ємною швидкістю потоку згідно з відповідним стандартом.

Опір диханню – опір потоку повітря під час вдихання (опір вдиху) або видихання (опір видиху) повітря, що створює респіратор або його складові (фільтр(и), клапани вдиху і видиху). Одиниці виміру опору – Па або мбар (1 мбар = 100 Па).

Протиаерозольний фільтр – фільтр, призначений для видалення частинок, що перебувають у повітрі.

Протигазовий фільтр – фільтр, призначений для видалення визначених газів і парів з повітря, яке проходить через нього.

Скомбіновані фільтри – протигазові чи багатотипні протигазові фільтри, скомбіновані з протиаерозольним фільтром.

Фільтрувальні засоби індивідуального захисту органів дихання – ЗІЗОД, що використовуються лише при вмісті кисню в оточуючому повітрі $\geq 17\%$ (за об'ємом) та за умови обмеження вмісту відомих шкідливих газоподібних домішок. Застосування цих ЗІЗОД заборонено у важкодоступних та погано провітрюваних об'єктах малого об'єму (цистернах, колодязях, трубопроводах, печах тощо).

Фільтр – пристрій, призначений для вилучення зі вдихуваного повітря токсичних аеродисперсних частинок або/і газів та парів.

Фактичний час захисної дії – використовуваний для класифікування час експлуатації апарата, визначений під час лабораторних випробовувань з об'ємною швидкістю потоку згідно з відповідним стандартом.

Скорочення

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту;

ЗІЗОД – засоби індивідуального захисту органів дихання;

КЗР – коефіцієнт захисту респіратора;

ТЗ – технічне завдання;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

НВП – науково-виробниче підприємство;

ТР ЗІЗ – Технічний регламент засобів індивідуального захисту;

ESLI - індикатор закінчення терміну служби протигазового фільтра;

NIOSH – Національний інститут охорони праці Сполучених Штатів Америки;

США – Сполучені Штати Америки;

ГДК – граничнодопустима концентрація;

CFD – методи обчислювальної гідродинаміки;

ТРДТ – тонкоплівковий резистивний датчик тиску ;

PEF – пікова швидкість видиху, л/хв.;

FEV1 – об’єм форсованого видиху за першу секунду, л;

RPN – число пріоритету ризику.

Позначення в формулах

a , b – константи, які визначаються експериментально для кожного типу півмасок;

a_k , b_k і c_k – коефіцієнти конфігурації, які визначають експериментально і залежать від властивостей фільтрувального матеріалу (гідродинамічного опору, діаметру волокон та щільності їх упакування) та параметрів конфігурації (висоти складки) ;

a_1 , a_1^* – коефіцієнти оптимізації;

b_s – зсув калібрувальної лінії датчика тиску відносно нуля, Па;

$C_{неодн}$ – коефіцієнт неоднорідності форми фільтра;

C_T – концентрація шкідливої речовини в підмасковому просторі;

$C_{вдох}(x)$ – концентрація шкідливої речовини, що відкачується через пробовідбірник з підмаскового простору на вдиху, мг/м^3 ;

$C_{видих}(x)$ – концентрація шкідливої речовини, що відкачується через пробовідбірник з підмаскового простору на видиху, мг/м^3 ;

C_i – шукана концентрація шкідливої речовини, мг/м^3 ;

C_0 – концентрація шкідливої речовини в повітрі, мг/м^3 ;

C_p – концентрація проникнення, визначена для певної речовини, г/см^3 ;

C_{ppm} – початкова концентрація шкідливої речовини, ppm;

$C_{факт}$ – виміряна приладами концентрація в підмасковому просторі, мг/м^3 ;

$C_{кор}$ – підмаскова концентрація з корекцією – оцінка реальної концентрації C_T при вдиху, мг/м^3 ;

C_1 та C_2 – константи;

CV – коефіцієнту варіації швидкості;

D – ймовірність виявлення відмови при оцінці ризиків, бал;

d_v – геометричний розмір отворів між обтюратором і обличчям користувача, м;

$d_{ман}$ – діаметр манжети шланга подачі повітря, м;

$d_{инл}$ – внутрішній діаметр шланга подачі повітря, м;

f – коефіцієнт тертя;

$f(Re)$ – функція числа Рейнольдса для врахування режиму течії;

$f(W_{роб})$ – коригувальна коефіцієнт, що враховує інтенсивність виконуваних робіт та присутність людського чинника;

$fi(x)$ – оцінювана масова функція розподілу часток;

$fa(x)$ – виміряна масова функція розподілу часток в зоні дихання, яка є виміряною стаціонарним або індивідуальним переносним приладом ГДК;

$g(L/w)$ – функція відношення довжини до ширини фільтра;

g_c – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ;

GM – середньгеометричний розмір частинки, мкм;

H – рівень радіації, мкЗв;

- H_f – маса активованого вугілля у фільтрі, г;
 h – товщина шару фільтрувального матеріалу, м;
 h_1, h_2 – ширина вхідного і вихідного каналів складок фільтра;
 $h_{\text{скл}}$ – висота складки, м;
 K_3 – коефіцієнт захисту респіратору;
 K_n – коефіцієнт проникнення крізь фільтр(и), %;
 K_{no} – коефіцієнт підсмоктування через нещільності, %;
 $k_{\text{ф}}$ – коефіцієнт опору фільтра, $\text{м}^5/\text{Н}\cdot\text{с}$;
 $k_{\text{по}}$ – коефіцієнт опору щілин, що створюються по смузі обтюрації, $\text{м}^5/\text{Н}\cdot\text{с}$;
 K – стаціонарна чутливість системи;
 $K_{\text{щ}}$ – коефіцієнт щільності, що характеризує ефективність прилягання
лицевої частини респіратору до обличчя користувача;
 k_V – коефіцієнт нахилу калібрувальної лінії датчика тиску, $\text{Па}/\text{В}$;
 k_v – коефіцієнт швидкості адсорбції, хв^{-1} ;
 K_i – коефіцієнт витрати повітря за смугою обтюрації;
 $K_{\text{масш}}$ – коефіцієнт масштабування (10^{-6});
 $K_{\text{пр.ф.ш.}}$ – проникність фільтруючого середовища, м^2 ;
 $K_{\text{форх}}$ – проникність Форхгеймера, м;
 $K_{\text{геом}}$ – коефіцієнт впливу геометрії фільтра на процес фільтрації;
 $K_{\text{щ.скл}}$ – коефіцієнт щільності укладки складок, що враховує ступінь
ущільнення при встановленні в корпус фільтра (0.9–1.1);
 $LD(x)$ – ймовірність осадження частинок при проходженні через органи
дихання;
 $LP(x)$ – функція проникнення часток через нещільності (ймовірність
проникнення через нещільності);
 $L_{\text{ф}}$ – загальна довжина фільтра, м;
 $L_{\text{шл}}$ – довжина шланга подачі повітря, м;
 $l_{\text{скл}}$ – довжина складки, м;
 N – кількість учасників дослідження, чол.;

N_{pulse} – кількість імпульсів, що надходить на контролер Arduino від датчика рівня радіації;

n – кількість складок фільтра;

$n_{пот}$ - коефіцієнт потоку (для ламінарного потоку $n=1$, для турбулентного $n>1$) ;

n_i – кількість результатів вимірювань виконаних в лабораторних умовах і теоретичних розрахункових значень;

O – частота появи відмов при оцінці ризиків, бал;

P_0 – початкове значення тиску, що визначається при запуску приладу, Па;

ΔP – перепад тиску, Па;

P_ϕ – величина перепаду тиску випробувальної системи з фільтром, Па;

$P_{поч}$ – величина перепаду тиску випробувальної системи без фільтра, Па;

$P_{I\ 1,2}$ – величина статичного тиску перед фільтром на першій складці та поверхні складки, Па;

$P_{E\ 1,2}$ - величина статичного тиску за фільтром на першій складці та поверхні складки, Па;

P_{max} – максимальне отримане значення перепаду тиску, Па;

P_{min} – мінімальне отримане значення перепаду тиску, Па;

p_i – кількість правильно зрозумілих слів слухачем, од;

p_p – загальна кількість слів, яка вимовлялась одним промовцем, од.;

Q_0 – об'ємна витрата повітря, м³/с;

Q_{nog} – величина погіршення рівня промовляння;

Q_ϕ – витрата повітря через фільтр, дм³/хв.;

$Q_{по}$ – витрата повітря через зазори, дм³/хв.

Q_v – витрата повітря через витоки за смугою обтюрації, дм³/хв;

Q_i – витрата повітря i -ої точки, дм³/хв.;

R_ϕ – радіус фільтруючої коробки, мм;

r – радіус ковпачка, мм;

R_d – діаметр різблення з'єднувача фільтра, м;

$R_{кл}$ – аеродинамічний опір клапана, Па•с/м;

$R_{ф}$ – аеродинамічний опір фільтра, Па•с/м;

$R_{фм}$ – аеродинамічний опір фільтра, Па•с/м;

RPN – значення пріоритетного ризику;

$R_{фк}$ – максимально допустиме значення аеродинамічного опору фільтра, Па•с/м, Па;

S – серйозність відмови при оцінці ризиків, бал;

$S_{шл}$ – площа поперечного перерізу шланга, м²;

$S_{ф}$ – геометрична площа фільтра, через яку проходить повітряний потік, м²;

S_i – дисперсія випадкової величини коефіцієнта захисту респіратора отриманих відповідно у лабораторних умовах і теоретичних розрахунків;

$SD(x)$ – ймовірність осадження частинок на вході в зонд і вимірювальної лінії;

$SB_{вдих}(x)$ - похибка вимірювань при вдиху через місце встановлення пробовідбірного зонда або його вхідного отвору;

$SH_{вдих}(x)$ – ймовірність осадження частинок в підмасковому просторі шляхом їх уловлювання через вологість повітря;

$SB_{видих}(x)$ – похибка обладнання відбору проб при видиху;

$SH_{видих}(x)$ – ймовірність осадження частинок в підмасковому просторі шляхом їх уловлювання вологістю повітря;

t – час роботи в респіраторі, хв.;

$t_{оч}$ – час очищення/заміни повітря в капюшоні, с;

$t_{ф}$ – час захисної дії скомбінованого фільтра, хв.;

$T_{фк}$ – максимальний розрахований час захисної дії фільтра, хв. ;

$T_{факт}$ – реально визначений час захисної дії протигазового фільтра, хв.;

$T_{норм}$ – нормативно визначений час захисної дії протигазового фільтра, хв.;

$T_{вдих}$ – відносна тривалість фази вдиху, с;

- V – лінійна швидкість руху повітря, м/с;
 $V_{напр}$ – електрична напруга, що подається на датчик (0-5В), В;
 $V_{місц}$ – середня швидкість у певній зоні, м/с;
 V_f – швидкість фільтрації через матеріал, м/с;
 V_i – витрата повітря, що проходить через активоване вугілля, см³/хв;
 $V_{гол}$ – об'єм голови користувача (приблизно), м³;
 $V_{заг}$ – загальний об'єм фільтра, см³;
 $V_{заг.к}$ – загальний об'єм капюшону, м³;
 $V_{дієв}$ – об'єм фільтра, що приймає участь в процесі фільтрації, см³;
 V_{max} – максимальна швидкість руху повітря через фільтр (фільтрувальний матеріал), м/с;
 V_{min} – мінімальна швидкість руху повітря через фільтр (фільтрувальний матеріал), м/с;
 $V_{сер}$ – середня швидкість руху повітря через фільтр (фільтрувальний матеріал), м/с;
 VE – хвилинна вентиляція, дм³/хв.;
 We – адсорбційна здатність активованого вугілля, г/г;
 W – масова витрата рідини, кг/с;
 $f(W_{роб})$ – коригувальна функція, що враховує інтенсивність виконуваних робіт;
 W_ϕ – відстань між складками, м;
 X_i – середні значення показників коефіцієнта захисту респіратора у лабораторних умовах і теоретичних розрахунків відповідно.

Спеціальні знаки

- β, λ – коефіцієнти нелінійності;
 γ – аеродинамічний поправочний коефіцієнт форми складки фільтра;
 δ – коефіцієнт деформації фільтрувального матеріалу при формуванні складчастої форми;
 $\delta_{зaz}$ – зазор між тканиною та шиєю користувача, м;

$\Delta p_m(p)$ – зміна тиску повітря у масці;

$\Delta n(p)$ – зміна швидкості обертання вентилятора;

μ – динамічна в'язкість повітря, Па с;

ρ – густина повітря, (1,2) кг/м³;

ρ_c – щільність упаковки гранул активованого вугілля, г/см³;

χ - безрозмірна подовжня координата певної точки фільтрувального середовища;

R_e - число Рейнольдса;

τ_Q – ефективний час, с;

$\varepsilon_{\text{ман}}$ – місцевий коефіцієнт опору манжети (1,2);

$\varepsilon_{\text{техн}}$ – технологічна похибка або запас на зминання, яка враховує неточності згинання або зміщення складок;

ε_{in} – коефіцієнт втрат на вході (звуження потоку);

ε_{out} – коефіцієнт втрат на виході (розширення потоку);

σ – стандартне відхилення швидкості, м/с;

$\sigma_{\text{рез}}$ – відхилення отриманих результатів, %;

$\sum \xi_{\text{місц}}$ - сумарні місцеві коефіцієнту втрат через опір (0,5) ;

$\lambda_{\text{шл}}$ - коефіцієнт тертя для шланга.

ВСТУП

Актуальність. У сучасних умовах розвитку промисловості, медицини та систем цивільного захисту людина постійно піддається впливу різноманітних шкідливих факторів, що можуть негативно впливати на органи дихання. Забруднення повітря пилом, газами, аерозолями, а також біологічні загрози, що зумовлені пандеміями та локальними спалахами інфекцій, формують підвищені вимоги до засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Ефективний захист у таких умовах є критично важливим для збереження здоров'я, професійної працездатності та безпеки діяльності підприємств.

Традиційно ЗІЗОД орієнтовані на один тип забруднення, що не забезпечує комплексного захисту. Протиаерозольні респіратори є ефективним для захисту від твердих та рідких частинок. Протигазові респіратори забезпечують захист від летких хімічних сполук у вигляді газу або пару, а респіратори проти біологічних забруднювачів використовуються переважно у медичному середовищі. Відсутність універсального рішення знижує ефективність захисту і змушує користувачів застосовувати кілька різних пристроїв одночасно, що є незручним і економічно нераціональним.

Науковий прогрес дозволяє використовувати інноваційні матеріали та технології для підвищення ефективності респіраторів. Наноструктуровані адсорбенти та скомбіновані фільтри забезпечують багаторівневу фільтрацію шкідливих часток, газів, парів і біологічних агентів, при цьому зменшуючи масу та габарити пристрою. Використання електронних компонентів, зокрема датчиків забруднення та систем моніторингу ресурсу фільтрів, дозволяє контролювати ефективність респіратора в реальному часі, підвищуючи рівень безпеки та оптимізуючи процес експлуатації.

Звідси виникає необхідність у поєднанні трьох ключових аспектів для розробки ефективних комплексних ЗІЗОД: забезпечення захисту від багатокomпонентних забруднень у промислових, медичних та цивільних

сценаріях; використання інноваційних технологій та матеріалів для підвищення ефективності фільтрувальних елементів; провадження ергономічних рішень для комфортного та безпечного використання.

Такий системний підхід дозволить створювати універсальні респіратори, здатні ефективно захищати користувача в умовах підвищених загроз, забезпечуючи одночасно безпеку, комфорт та оптимальну експлуатацію.

Моторовий фільтрувальний респіратор з капюшоном є прикладом комплексного рішення, здатного забезпечити одночасний захист від пилу, газів та біологічних агентів, оптимізуючи при цьому фізичне навантаження та ергономіку. Це рішення включає не лише використання моторового блоку для подачі очищеного повітря, але й комплексну оптимізацію всіх його складових шляхом вдосконалення конструкції самого моторового блоку для забезпечення стабільної та ефективної роботи; розробкою ергономічного капюшона, який забезпечує герметичність, комфорт та зручність у використанні; конструюванням шланга подачі повітря з урахуванням гнучкості, міцності та зниження опору потоку; підвищенням якості фільтрів, що використовуються, з урахуванням багатокомпонентної фільтрації та довговічності.

Розробка універсального моторового фільтрувального респіатора з капюшоном є надзвичайно актуальною через зростаючу кількість комплексних забруднень та потребу у багаторівневому захисті. Інтеграція новітніх матеріалів, електронних систем контролю та ергономічних рішень забезпечує високий рівень ефективності та безпеки, що робить таке дослідження важливим як з наукової, так і з практичної точки зору.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами. До дисертаційної роботи увійшли результати досліджень, які виконані згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка» та Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища і людини за темами: «Ресурсозберігаюча геотехнологічна і

гідродинамічна параметризація видобутку малопотужних запасів мінеральної сировини у техногенно навантаженому середовищі» (№ держреєстрації 0117U006753, 2017 р.); «Розробка універсальних засобів індивідуального захисту пролонгованої дії подвійного призначення» (№ ДР 0117U000376, 2017-2018 рр.), «Розробка процесу керування ризиками шляхом удосконалення засобів індивідуального захисту та систем моніторингу безпеки техногенних об'єктів» (№ 0125U002025 з 2025 року) у яких автор брав участь як виконавець.

Мета роботи – наукове обґрунтування теоретико-методологічних засад і практичних рекомендацій щодо розробки моторових засобів індивідуального захисту органів дихання з регулюванням об'єму повітряного потоку у відповідності до характеру фізичного навантаження користувача протягом усього терміну експлуатації із забезпеченням стабільного рівня захисних властивостей на основі безперервного контролю експлуатаційних параметрів.

Задачі досліджень для досягнення даної мети необхідно вирішити декілька задач:

1. Виконати аналіз сучасного стану розробки та експлуатації фільтрувальних ЗІЗОД для обґрунтування необхідності створення універсальних адаптивних систем капюшонного типу, виявивши фактори, що обмежують їх енергоефективність та ергономічність при змінних фізичних навантаженнях.

2. Обґрунтувати параметри конструкції лицевої частини у вигляді захисного капюшона на основі дослідження динаміки акумуляції вуглекислого газу в підмасковому просторі та оцінити її вплив на збереження когнітивних характеристик, комунікативних можливостей і працездатності користувача.

3. Розробити науково обґрунтовану конструкцію моторового фільтрувального респіратора з капюшоном та автоматичним регулюванням подачі повітря, побудувавши математичну модель системи «фільтр –

вентилятор – повітропровід – капюшон» для адаптації режиму роботи пристрою до поточних енерговитрат користувача.

4. Визначити залежності часу захисної дії скомбінованих фільтрів від інтенсивності енерговитрат користувача та умов навколишнього середовища, на основі чого розробити математичні моделі та програмне забезпечення для прогнозування залишкового ресурсу і своєчасного інформування користувача.

5. Встановити закономірності впливу геометричних параметрів фільтрувальних коробок та конфігурації складчастих фільтрів на аеродинамічні характеристики повітряного потоку для мінімізації «мертвих зон», зниження опору диханню та підвищення ефективності використання фільтрувальної поверхні.

Об’єкт дослідження – процеси руху, розподілу та регулювання очищених повітряних потоків у моторових фільтрувальних засобах індивідуального захисту органів дихання з капюшоном і фільтрами під час експлуатації.

Предмет дослідження – процес створення моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном та фільтрами, що відповідають концепції універсальності та вимогам нормативних документів України щодо технічних, ергономічних і експлуатаційних характеристик.

Основна ідея роботи полягає підвищення захисту користувачів засобів індивідуального захисту органів дихання, за рахунок удосконалення конструкції фільтрувального моторового респіратора з капюшоном додатковими системами, які дозволять автоматичне регулювання об’єму та заданої якості підмаскового очищеного повітря у відповідності до режиму роботи користувача незалежно від наявності шкідливих речовин у повітрі робочої зони на протязі усього терміну роботи з підтриманням належного рівня захисних властивостей пристрою.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи застосовано: системно-структурний підхід при аналізі наукових праць

провідних світових учених щодо вимог нормативно-правових актів з охорони праці, державних стандартів в області застосування засобів індивідуального захисту органів дихання; перевірку адекватності запропонованої математичної моделі здійснювали методами математичної статистики при обрахунку натурних експериментів з визначення основних показників респіраторів, здійснених сучасними вимірювальними приладами за методиками, які відповідають чинним державним стандартам.

Додатково у роботі застосовано комп'ютерне моделювання в програмному середовищі SolidWorks, яке використовувалося для дослідження та вдосконалення конструкції моторового фільтрувального респіатора з капюшоном. За допомогою вбудованих модулів SolidWorks Flow Simulation проведено моделювання конструктивних елементів фільтрів, аналіз руху повітряних потоків у внутрішньому об'ємі капюшона, а також вивчення розподілу та динаміки повітряних мас у системі МФР під час конструювання каналів, по яким подається повітря. Отримані результати дозволили оптимізувати геометрію каналів подачі повітря, зменшити локальні втрати тиску та підвищити рівномірність вентиляції капюшона, що забезпечило підвищення ефективності та надійності роботи пристрою.

У роботі для аналізу надійності моторового фільтрувального респіатора з капюшоном застосовано метод FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), який забезпечує системне виявлення потенційних відмов елементів та оцінку їх наслідків для користувача. Аналіз охоплював основні вузли системи «фільтр – вентилятор – повітропровід – капюшон» із урахуванням впливу зовнішніх чинників і специфіки витоку повітря через манжету. Метод дозволив визначити критичні елементи конструкції, ранжувати відмови за рівнем ризику та сформулювати рекомендації щодо підвищення надійності, ефективності подачі повітря й загальної безпечності експлуатації МФР.

Наукові положення, що захищаються в дисертації

1. Для моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном збільшення швидкості повітряного потоку з 60 до 200 $\text{дм}^3/\text{хв.}$ зумовлює

скорочення коливань внутрішнього тиску ($P_{\max}/P_{\min}$) залежно від типорозміру лицевої частини, а саме: від 1,22 до 1,16 для типорозміру М і від 1,11 до 1,108 для типорозміру L, водночас підвищуючи амплітуду коливань швидкості ($V_{\max}/V_{\min}$) в 1,2 рази. При цьому час очищення скорочується у в 3,3 рази незалежно від типу капюшону, що дозволяє прогнозувати інтенсивність навантаження та енерговитрати користувача.

2. Ефективний час об'ємного оновлення повітря у капюшоні моторового фільтрувального респіратора описується теоретично обґрунтованою зворотно пропорційною залежністю від витрати повітря з урахуванням експериментально отриманого коригувального коефіцієнту, що дозволяє врахувати не лише геометричні параметри лицевої частини, а й динаміку масообміну, що зумовлена вентиляцією легень, при чому за об'ємної витрати повітря до 30 $\text{дм}^3/\text{хв}$ коригувальний коефіцієнт перевищує 1, тоді як при збільшенні об'ємної витрати до діапазону 30–60 $\text{дм}^3/\text{хв}$ його значення стає меншим за 1.

3. Експериментально доведено, що аеродинамічний опір на протиаерозольному фільтрі є функцією не тільки геометричних параметрів самого фільтра і властивостей фільтрувального середовища, а й експериментально визначеного коефіцієнту конфігурації складчастого фільтра, який знаходиться в межах від 0,2 до 0,7, та визначає характер потоку і, тим самим, дозволяє прогнозувати ергономічні характеристики складчастого фільтра ще на етапі проєктування.

Наукові результати

1. Розроблено нову концепцію конструкції моторового фільтрувального респіратора з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою, що забезпечує високий рівень захисту й надійності.

2. Розроблено нову математичну модель функціонування моторового фільтрувального респіратора, яка описує зміну тиску та витрати повітря в системі «фільтр – вентилятор – повітропровід – капюшон» для оцінювання

стабільності й ефективності функціонування моторового респіратору за різних режимів вентиляції на основі передавальної функції системи.

3. Виявлено нелінійну залежність між енерговитратами користувача, концентрацією шкідливих речовин та ефективністю роботи фільтрів, що визначає зниження часу захисної дії при підвищених фізичних навантаженнях.

4. Уточнено аналітичні залежності між енерговитратами користувача та часом захисної дії, які можуть бути використані при розробленні нормативів експлуатації респіраторів у різних виробничих умовах.

5. Визначено закономірність зміни коефіцієнта конфігурації фільтрувальних матеріалів від щільності упакування волокон та відношення відстані між гофрами до їх висоти, що дозволяє обґрунтувати зростання початкового перепаду тиску складчатого фільтра по відношенню до плоского, що дозволяє встановити раціональні геометричні параметри фільтрувальних коробок.

6. Уточнено модель розподілу повітряного потоку на поверхні складчатого фільтра, яка поєднує не тільки геометричні форми фільтрів з кількістю повітря, що надходить, а й розташування вхідних і вихідних отворів фільтрувальних коробок, що дозволяє забезпечити максимальне використання площі фільтрувального матеріалу.

Практичне значення роботи полягає у тому, що створено підґрунтя для розробки нових фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання, що включає алгоритм розрахунку коефіцієнта конфігурації може бути використаний при проектуванні нових фільтрів різних типів для забезпечення оптимальних параметрів повітропроникності; програмний комплекс для прогнозування терміну захисної дії фільтрів, який враховує розподіл повітряного потоку, режим дихання та енерговитрати користувача, забезпечуючи похибку не більше 10 % від реальних даних; систему контролю перепаду тиску та залишкового ресурсу фільтра забезпечує оперативне визначення моменту заміни фільтрувальних елементів і підвищує безпеку

користувача; методику оцінювання розбірливості мовлення у респіраторх може бути використана під час сертифікаційних випробувань нових моделей засобів індивідуального захисту.

Розроблений моторовий фільтрувальний респіратор, який відрізняється від відомих конструкцією капюшона з ударозахисною каскою, та моторовим блоком із сучасних матеріалів (ABS+), безколекторним електродвигуном і сенсорною системою на базі мікроконтролера Arduino, а також визначено раціональний діаметр повітропроводу (32 мм), що забезпечує раціональну подачу повітря у відповідності до умов праці та виконуваного завдання.

Експериментально підтверджено, що ефективний час захисної дії протигазових фільтрів залежить не тільки від концентрації та типу (природи) шкідливої речовини, кліматичних параметрів навколишнього середовища, аеродинаміки фільтрувальної коробки, типу та об'єму сорбенту та фізичного навантаження користувача, які являються визначальними у діапазоні концентрації шкідливої речовини більше 300 ppm, тоді як у діапазоні до 300 ppm визначальною являється саме концентрації шкідливої речовини, що дозволяє прогнозувати ефективний час роботи фільтрів в залежності від робочих умов.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні та практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес кафедри охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей 263 Цивільна безпека за освітньою програмою «Цивільна безпека» та 184 Гірництво за освітньою програмою «Охорона праці» під час вивчення дисциплін «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих», «Сучасні засоби індивідуального захисту працюючих» та «Проектування технічних засобів та заходів безпеки» (Додаток А), в тому числі навчальний посібник «Засоби індивідуального захисту для надзвичайних ситуацій» (протокол Вченої ради №6 НТУ «Дніпровська політехніка» від 31.05.2023 р.).

Результати роботи впроваджено на виробництві засобів індивідуального захисту органів дихання у ТОВ НВП «СТАНДАРТ», а також при виконанні державної теми «Розробка універсальних засобів індивідуального захисту пролонгованої дії подвійного призначення» (№ держ. реєстрації 0117U000376, 2017 р.), у яких автор брав участь як виконавець на базі Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища і людини. Отримано позитивну оцінку від ДВГРЗ ДСНС України (м. Кривий Ріг) за результатами розгляду матеріалів та аналізу технічної документації щодо розробленої конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном, яка продемонструвала потенціал для практичного застосування у виробничих умовах.

Результати розробки використано при підготовці навчального посібника «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих», призначеного для студентів вищих навчальних закладів, зокрема кафедри охорони праці та охорони праці НТУ «Дніпровська політехніка», а також при виконанні студентами кваліфікаційних робіт за другим рівнем вищої освіти (магістерських) дипломних робіт.

Обґрунтування і достовірність наукових положень, висновків рекомендацій підтверджується коректністю постановки і вирішення задач та використанням достовірних вихідних даних, які отримані за результатами теоретичних і експериментальних досліджень; використанням сучасного, апробованого математичного апарату; обґрунтованим коректним вибором використаних загальних показників і критеріїв математичних моделей; збігом результатів теоретичних і експериментальних досліджень з невизначеністю вимірювань, яка не перевищує 15 %; результатами дослідно-конструктивних розробок півмасок та фільтрувальних коробок, досвідом практичного втілення пропозицій з розробки конструкцій півмасок; результатами експериментальних випробувань удосконалених конструкцій респіраторів та нових, що пропонуються, наявністю ясного фізичного трактування отриманих результатів та впровадженням результатів роботи.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій розроблені теоретичні засади вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном, що досягається на основі визначення закономірностей взаємозв'язку між зміною перепаду тиску фільтрів респіраторів та залишковим часом захисної дії, з урахуванням впливу геометричних параметрів фільтрувальних коробок респіраторів, енерговитрат користувача та ефективності фільтрів.

Особистий внесок полягає в обґрунтуванні актуальності роботи [1, 2, 15-19], постановці наукової проблеми [3, 4, 21-24, 45], вирішеної в дисертаційній роботі, формулюванні мети і наукових задач досліджень, визначені наукових положень, розробці математичних моделей таких процесів: зміни коефіцієнта конфігурації фільтрів від щільності упакування волокон фільтрувальних матеріалів та відношення відстані між складками до їх висоти [8, 11, 13], розподілу повітряного потоку на поверхні складчастого фільтра [7, 20, 34], зміни тиску та витрати повітря в системі «фільтр – вентилятор – повітропровід – капюшон» [19, 30, 56], залежності між енерговитратами користувача [14, 38], концентрацією шкідливих речовин [25, 26, 28, 29]. Розробки концепції конструкції моторизованого фільтрувального респіатора (МФР) з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою, що забезпечує високий рівень захисту і надійності [27, 32, 56, 57]. В обґрунтуванні новітніх методів випробувань респіраторів. У плануванні і проведенні експериментальних виробничих і лабораторних досліджень захисних властивостей універсальних респіраторів [46-49], а також в аналізі і систематизації отриманих результатів.

Практична цінність роботи полягає у впровадженні результатів досліджень у навчальний процес і практику забезпечення безпеки праці. На основі теоретичних і експериментальних положень дисертації були розроблені та опубліковані навчальні посібники, що відображають сучасні

підходи до вибору, оцінювання ефективності та експлуатації засобів індивідуального захисту [53-55].

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційного дослідження були представлені на всеукраїнських і міжнародних конференціях: Українська школа гірничої інженерії з 2018 по 2024 роки; 8th International Scientific Conference «Problems and prospects of territories' socio-economic development» (The Academy of Management and Administration in Opole, May 10, Opole, 2019); 9th International Symposium on Occupational Health and Safety SESAM 2019 Scientific Event (University of Petroșani, 3 October 2019, Petrosani, Romania); 9th international youth science forum «litteris et artibus» (Lviv Polytechnic National University, November 21–23, 2019); 3rd International Webinar on Physical Health, Nursing Care and COVID-19 Management (23-24 липня 2021, Kington, UK); XVIII конференції молодих вчених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (29 жовтня 2020 року, ІГТМ, м. Дніпро); 13th SAFETY GALA virtual workshop (13-14 April 2021, Cyprus); XIX міжнародна конференція молодих вчених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (28 жовтня 2021 року, ІГТМ, м. Дніпро); Міжнародна науково-практична конференція «OSHAgro – 2021 (м. Київ); Охорона праці: освіта і практика у Львівському університеті БЖД (м. Львів 2021, 2022 роки); Online 4th SAFETY GALA VIRTUAL WORKSHOP (5&6 APRIL 2022, ERA Ltd, Athens, Greece); X Міжнародна науково-технічної конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (23–25 листопада 2022 року, НТУ «ДП», Дніпро); X Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності в XXI столітті» (17–18 листопада 2022, НТУ «ДП», м. Дніпро); Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» (11-13 жовтня 2023 року, НТУ «ДП», м. Дніпро); 6nd International Scientific and Technical Internet Conference “Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources (Petroșani, Romania, 2023); XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих

вчених «Наукова весна 2023» (1-3 березня 2023 року, НТУ «ДП», м. Дніпро); XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (22–24 листопада 2023 року, НТУ «ДП», м. Дніпро); THE FIRST INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE “CIVIL PROTECTION IN TIMES OF WAR” (квітень 2025, ЛДУ БЖД, м. Львів).

Публікації. Усього за результатами дисертаційних досліджень опубліковано 57 робіт з них: 3 навчальні посібники, 45 статей у наукових фахових виданнях, з них 7 у міжнародних та вітчизняних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз, 8 у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій; 2 патенти на корисну модель, та 7 публікацій в інших виданнях, не включених до переліку фахових видань.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (328 найменувань) і 6 додатків на 393 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 251 сторінка, у тому числі 119 рисунків та 75 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ З РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ТА ВИМОГ ДО ВИГОТОВЛЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПИЛОГАЗОЗАХИСНИХ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз підходів до проектування фільтрувальних ЗІЗОД

Процес розробки фільтрувальних респіраторів можна описати як сукупність робіт, що включають пошук ідей, визначення принципів функціонування, виконання необхідних розрахунків і проведення лабораторних досліджень, спрямованих на забезпечення необхідних характеристик засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД), які відповідатимуть умовам експлуатації. Цей процес складається з п'яти етапів: проєктного, підготовчого, виробничого, оцінювання відповідності та поствиробничого (утилізація). Загальні принципи конструювання та впровадження ЗІЗОД у виробництво регламентуються стандартом ДСТУ 4676 [1].

Впровадження процедури оцінки ризиків на кожному етапі розробки дозволяє виявляти та запобігати непередбаченим подіям, що дає змогу розробникам заздалегідь ідентифікувати невідповідності та загрози, які можуть впливати як на якість конструкції респіратора, так і на ухвалення рішень на кожному етапі проєктування. Аналіз прийнятих рішень на попередніх етапах з урахуванням виявлених ризиків на поточному етапі з метою мінімізації їх впливу на кінцевий результат є інноваційним підходом у розробці засобів індивідуального захисту (рис. 1.1).

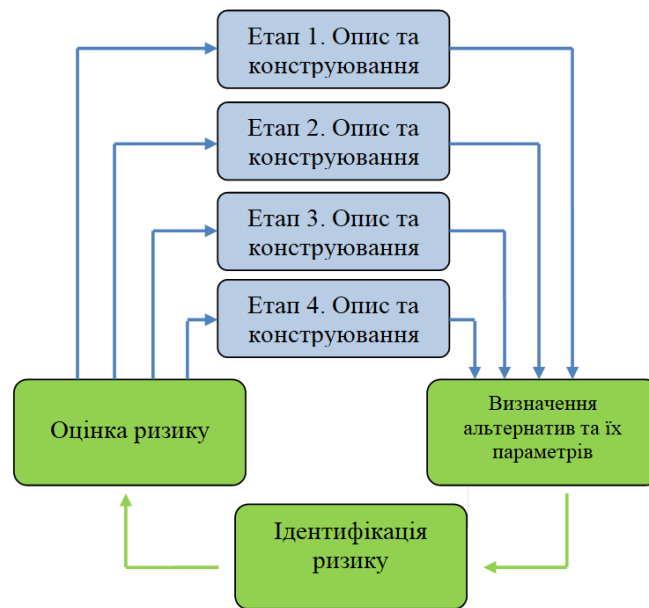


Рисунок 1.1 – Процедура оцінювання ризиків при розробці фільтрувального респіратору та прийняття відповідних управлінських рішень на кожній стадії

Суть запропонованого алгоритму полягає в описі кожного етапу розробки респіратору та проведенні оцінки ризиків з використанням найбільш підходящого методу, який обирається залежно від поставлених завдань. На кожному етапі формуються вихідні дані для переходу до наступного, а також ухвалюються необхідні рішення для реалізації визначених цілей. Водночас здійснюється вибір серед різних альтернатив, орієнтуючись на мінімізацію ризиків із врахуванням виробничих можливостей та умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети з розробки фільтрувального респіратору розглянемо кожен етап, щоб виявити набір ключових елементів зі складного комплексу зв'язків і відношень, які визначають принципи досягнення результату.

На проєктному етапі здійснюються маркетингові та передпроектні дослідження існуючих типів і моделей респіраторів, які дозволяють виявити наявні недоліки у захисті користувачів під час їх експлуатації (табл. 1.1). Виявлені проблеми в конструкціях існуючих засобів захисту стають основою для розробки якісного технічного завдання на створення нової моделі

респіратор з урахуванням нормативних вимог, запитів замовників та умов експлуатації.

Паралельно проводиться оцінка ризиків, пов'язаних як із конструктивними недоліками наявних респіраторів, так і з можливими помилками під час формування технічного завдання (Додаток А). Для оцінки ризиків, що стосуються конструкції респіраторів, відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 12941 рекомендується використовувати метод "FMEA".

Таблиця 1.1 - Фрагмент маркетингового аналізу ЗІЗОД з блоками примусової подачі повітря

Технічні характеристики	SR 500 [2]	X-plore 8700 [3]	Versaflo TR-300 [4]	3M JUPITER [5]
Загальний вигляд				
Максимальна об'ємна витрата повітря, дм ³ /хв	225	210	190	160
Загальна маса, кг	1,49	1,530 кг	1,15	1,48
Клас захисту фільтра	P3; A1BE2K1P3	P3; A1BE2K1P3	P3; A1B1E1	P3; A2P3; ABEK3; ABEK3
Час безперервної роботи, год:	8	8	12	8
Матеріали	Термостійкий полівінілхлорид	Поліпропілен. поліамід		Поліпропілен та поліфінил
Виявлені недоліки	значний опір потоку повітря через - невеликі розміри повітряних каналів;	Фільтри нестандартними, низька всмоктувальна спроможність	Низька всмоктувальна спроможність	швидке забруднення фільтра; незначний термін експлуатації

Цей метод дозволяє, використовуючи організаційні, логічні та математико-статистичні процедури, визначити пріоритетний ранг професійного ризику виникнення небезпечної ситуації на основі трьох ключових показників: тяжкості наслідків (S), ймовірності виникнення відмови або інциденту (O) та можливості виявлення дефекту, пов'язаного з небезпечною дією або її відсутністю (D).

Показник D також враховує вплив психосоціального стану працівника, що може спричинити людську помилку – як активну дію, так і бездіяльність. На основі величини рангу ризику здійснюється вибір і обґрунтування оптимальних рішень, спрямованих на підвищення безпеки під час експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД).

Детальний опис дій експертів відповідно до алгоритму методу "FMEA" (рис. 1.2) подано у стандарті [23]. Значення пріоритетного ризику (RPN) визначається як добуток компонентів S, O і D за формулою, наведеною у стандарті [6]:

$$RPN = S \times O \times D$$

Рівень прийнятності пріоритетного ризику оцінюється у діапазоні від 0 до 150. Показники тяжкості наслідків (S), ймовірності виникнення відмови чи інциденту (O) та можливості виявлення небезпечного психосоціального стану (D) визначаються за шкалою від 1 до 10, де 1 відповідає найнижчому значенню показника, а 10 – найвищому. Для виявлення конструктивних недоліків необхідно керуватися вимогами відповідних стандартів, які встановлюють технічні вимоги до засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД).

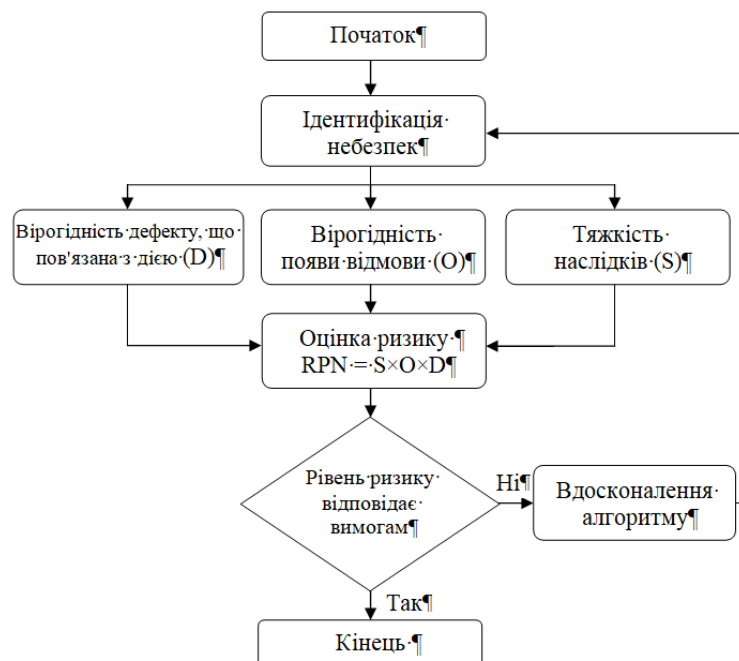


Рисунок 1.2 – Алгоритм дій оцінювання ризику методом "FMEA" [6]

Відповідно до стандарту ДСТУ EN 12941 [7], моторизовані респіратори повинні відповідати низці важливих вимог. Вони мають забезпечувати надійний захист від аеродисперсних часток різного походження, таких як пи́л, дим і туман, а також максимально ефективно захищати від токсичних газів і парів. Конструкція респіраторів повинна забезпечувати нормований опір диханню, що дозволяє використовувати їх протягом тривалого часу. Ключовою особливістю таких респіраторів є вдосконалені конструктивні елементи, які запобігають забрудненню вдихуваного повітря за рахунок мінімізації підсмоктування через нещільності обтюратора або клапанних систем. Вони також повинні мати незначний «мертвий» об'єм, що дозволяє уникнути вдихання повітря з підвищеним рівнем вмісту CO₂. Респіратори мають бути легкими та зручними, легко адаптуватися до антропометричних параметрів обличчя користувача. Важливо, щоб їхня конструкція була міцною і зберігала свої експлуатаційні характеристики в широкому діапазоні температур – від +50°C до мінус 40°C. Окрім цього, вони повинні забезпечувати комфортні умови використання для користувача.

Аналіз ризиків виявив низку основних недоліків моторизованих респіраторів. Зокрема, недостатня ефективність вентилятора обумовлена значним опором повітряного потоку у повітропроводі, що виникає через невеликі розміри повітряних каналів. Крім того, захисні характеристики поглиначів шкідливих речовин виявилися недостатніми. Низька потужність відцентрового вентилятора обмежує його здатність ефективно видаляти забруднення з повітря, що створює труднощі при використанні респіратора в умовах атмосферного забруднення кількома видами токсичних речовин (Додаток Б).

Для кожної стадії розробки респіратора наводимо конкретні приклади їх застосування з урахуванням шести аспектів: передумов, необхідних ресурсів, часу проведення, контролю та вхідних і вихідних даних (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Фрагмент опису стадій, що характеризують процес розробки респіраторів

Аспекти методу	Питання	Стадії процесу		
		проектна	підготовча	виробнича
Вхід	З чого починається функція?	Аналіз існуючих конструкцій	Аналіз виявлених шляхів з виконання вимог зацікавлених сторін і виявлених недоліків	Аналіз ТЗ
	На що функція діє?	На формування ТЗ	На встановлення необхідних ресурсів для розробки ЗІЗОД	На етапи виготовлення ЗІЗОД
Вихід	Що є результатом функції?	Виявлені недоліки існуючих конструкцій	ТЗ	Виготовлені зразки нових ЗІЗОД
	Кому потрібен результат?	Зацікавленим сторонам	Розробникам ЗІЗОД	Зацікавленим сторонам
Передумова	Що має бути для виконання функції?	Наявні дані існуючих конструкцій	Аналіз властивостей необхідних матеріалів, характеристики всіх комплектуючих ЗІЗОД	Виробниче обладнання для виготовлення конструктивних елементів ЗІЗОД
	Що робити, за відсутності передумов?	Проводити патентний пошук	Повертатись на попередню стадію для пошуку недоліків	Повертатись на попередню стадію для пошуку недоліків
Ресурс	Які ресурси потрібні для виконання функції?	Фінанси для придбання існуючих конструкцій ЗІЗОД	Обладнання для побудови макетів, матеріали і складові конструкції ЗІЗОД	Матеріали для виготовлення конструктивних елементів ЗІЗОД
	Що робити, якщо ресурсів немає?	Проводити аналіз різних наукових досліджень	Повертатись на попередню стадію для пошуку недоліків	Повертатись на попередню стадію для пошуку недоліків
Контроль	Чи чіткі процедури або інструкції?	ні	Так, вимоги замовників та стандарту	Так, розроблені внутрішні процедури
	Чи є необхідність контролю за функцією?	так	Так, терміни виготовлення та показники ефективності ЗІЗОД	Так, показники ЗІЗОД
	Чи є критичні показники?	Карти ризиків	Так, коефіцієнт захисту, опір дихання	Так, коефіцієнт захисту, опір дихання
Час	Скільки часу, для виконання функції?	місяць	Місяць	Відповідно до проекту
	Чи є якісь часові обмеження?	Так, проектні	Так, проектні	Так, проектні

Для аналізу ризиків, які впливають на прийняття управлінських рішень, може бути застосований метод Functional Resonance Analysis Method (FRAM). Цей метод дозволяє досліджувати взаємозв'язки між основними етапами розробки респіратору, описувати їх та перевіряти обґрунтованість прийнятих рішень. Перевірка ґрунтується на аналізі необхідного часу для виконання завдання, ресурсів та умов, потрібних для досягнення бажаного результату.

Основою методу FRAM є функціональний шестикутник (рис. 1.3) [8], який включає шість ключових аспектів кожного етапу: час, контроль, вихід, ресурси, передумови та вхідні дані. Ці аспекти спрямовані на виявлення потенційних джерел небезпек і ризиків.

Кожна стадія розробки респіратору характеризується певною варіативністю, що може бути зумовлена різними факторами, такими як брак ресурсів, відсутність необхідних передумов, невиконання аналізу, нечітке визначення строків або впровадження нового виробничого обладнання (табл. 1.3).

Отже, для прийняття відповідного рішення виникає необхідність в оцінюванні мінливості стадій відповідно до заданих часових рамок і якості їх завершення. Зазвичай для цього використовують такий опис: стадія завершена вчасно та виконана у повному обсязі; стадія залишилася незавершеною і виконана незадовільно; стадія виконана з затримкою, але у повному обсязі; стадія завершена вчасно, але з допущенням помилок.

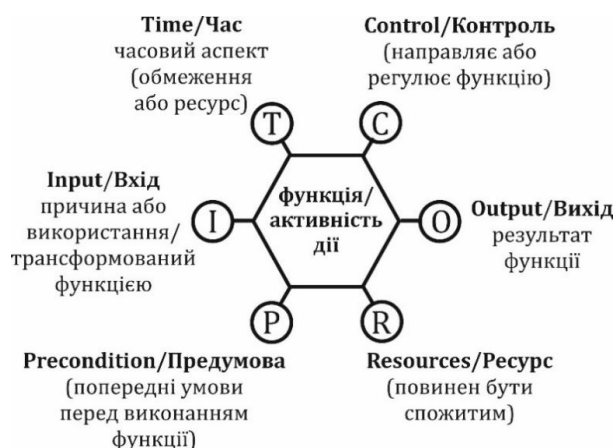


Рисунок 1.3 – Функціональний шестикутник методу «FRAM»

Таблиця 1.3 – Фрагмент опису мінливості стадій розробки респіратора

Стадія	Варіативність	Опис можливих ситуацій
Проектна	F1V0	Вибір правильний і своєчасний
	F1V1	Вибір правильний, але несвоєчасний
	F1V2	Вибір прийнятний (задовільний без критичних помилок), але своєчасний
	F1V3	Вибір неправильна
Підготовча	F2V0	Перевірка правильна і своєчасна
	F2V1	Перевірка правильна, але не своєчасна
	F2V2	Перевірка прийнятна і своєчасна
	F2V3	Перевірка неправильна
Виробнича	F3V0	Експлуатація відповідна і своєчасна
	F3V1	Експлуатація відповідна, але несвоєчасна
	F3V2	Експлуатація з помилками, але своєчасна
	F3V3	Експлуатація невідповідна і не своєчасна

Для прийняття рішення в подальшому необхідно робити аналіз можливих невідповідностей, які можуть призвести до непередбачуваних невідповідних результатів, що дозволяє завчасно розробити різні сценарії. Результат оформлюється у вигляді таблиці із зазначенням дій, які потрібні для контролю поточного стану стадій розробки. Наприклад на підготовчій стадії виконується організаційно-економічне обґрунтування необхідних матеріалів з яких планується виготовлення респіратора. Для цього на основі проведених маркетингових досліджень формується технічне завдання (ТЗ) (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 - Фрагмент технічного завдання для розробки конструкцій фільтрувального ЗІЗОД

Шкідливі фактори	Конструктивні і елементи ЗІЗОД	Принцип дії	Матеріали	Контрольні показники
Аеродисперсні частини різного походження (пил, дим, туман), токсичні гази і пари	-обтюратори різних конструкцій, у тому числі шийні, -фільтруючі елементи - вузли клапанів вдиху і видиху, - елементи фіксації.	- ізоляція підмаскового простору - фільтрація, герметичність за рахунок щільного прилягання пелюстка клапанів вдиху і видиху до сидловини	-повітронепроникні матеріали (гума, силікон, поліетилен тощо); - фільтруючі матеріали (активоване вугілля, фільтрувальні матеріали); - допоміжні матеріали.	Коефіцієнт підсосу: - через смугу обтюраторії; - через клапани вдиху і видиху. Коефіцієнт проникання через фільтруючий матеріал. Час захисної дії.

Як показано в таблиці 1.4, на захисні властивості респіратору впливають конструктивні елементи лицевої частини, тип фільтрів і властивості фільтрувальних матеріалів. Важливо розглянути різні альтернативні варіанти, які можуть забезпечити необхідні контрольні показники ЗІЗОД. Однак розробники можуть зіткнутися з небезпечними чинниками, що ускладнюють досягнення необхідних показників: брак матеріалів, неврахування часу на їх виготовлення чи доставку, недостатня якість матеріалів або їх постачання з невідповідними характеристиками (табл. 1.5).

Досягти необхідних проектних показників нових конструкцій ЗІЗОД можна шляхом вибору відповідних основних та допоміжних матеріалів. Важливо, щоб вони відповідали розробленим технологічним процесам та контролювались під час лабораторних випробувань. Також слід вживати коригувальні дії у випадку відхилень від запланованих технічних завдань.

Таблиця 1.5 – Фрагмент опису мінливості стадії і можливих наслідків

Функція	Варіативність	Опис можливих ситуацій	Наслідки
Підготовча	F2V0	Втрата результатів аналізу, досліджень для формування бази матеріалів для виготовлення ЗІЗОД	Не забезпечується своєчасна реалізація стадії виготовлення
	F2V1	Не своєчасне доставка, виготовлення, забезпечення необхідними матеріалами для виготовлення ЗІЗОД відповідно з проведеними дослідженнями і аналізом недоліків конструкцій існуючих ЗІЗОД	Не забезпечується своєчасна реалізація стадії виготовлення
	F2V2	Наявність незначних невідповідностей у проведених дослідженнях, які призводять до відхилень у контрольних показниках респіраторів, які не перевищують вимоги стандартів, але не задовільняють вимогам замовників	Не забезпечується відповідні вимоги зацікавлених сторін
	F2V3	Встановлення невідповідних результатів досліджень умов експлуатації, які призвели до помилок з підібраними матеріалами для виготовлення ЗІЗОД	Не забезпечується проектні вимоги до виготовленні ЗІЗОД

На виробничий стадії проводиться виготовлення зразків ЗІЗОД. У більшості випадків створення конструкції здійснюється за допомогою евристичних методів, які головним чином базуються на ерудиції, інтуїції, попередньому досвіді розробок та наявних базах даних про аналоги. Відповідна стадія може бути представлена наступною схемою (рис. 1.4):

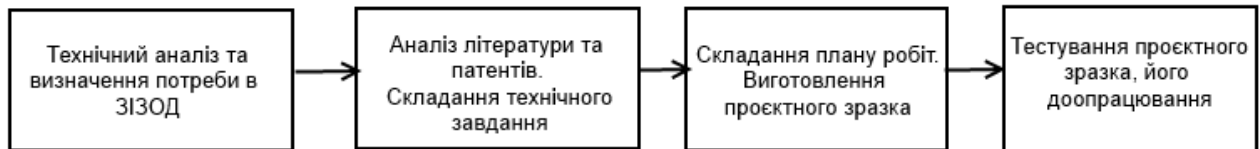


Рисунок 1.4 – Схема виробничої стадії ЗІЗОД

Аналіз схеми свідчить, що для зменшення варіативності стадії виготовлення потрібно знайти способи автоматизації кожного процесу, щоб швидко вносити зміни з мінімальним часовим проміжком для отримання макету ЗІЗОД з заданими параметрами. Це можливо шляхом створення 3D поверхонь лицевої частини за допомогою NURBS – поверхонь, B-сплайнів або іншого цифрового інструментарію і відповідного програмного забезпечення, а також шляхом уніфікації конструкцій за схожими антропометричними даними, функціональним призначенням. Важливо також заздалегідь підбирати альтернативні пакети фільтрувальних матеріалів ще на стадії підготовки до виготовлення респіратора відповідно до умов експлуатації тощо. Для розробки відповідних рекомендацій знову виникає необхідність в оцінюванні ризиків при виготовленні респіраторів (таблиця 1.6).

Відповідно до виявлених можливих недоліків розробляються рекомендації для зменшення мінливості стадії виготовлення (табл. 1.7).

Таблиця 1.6 – Фрагмент оцінки ризиків при виготовленні ЗІЗОД

Опис можливої невідповідності	Опис можливої причини	Опис наслідків	Розрахунок числа пріоритетності ризику			
			S	O	D	RPN
1. Невідповідна фактура матеріалу повітропроводу (занадто жорсткий або м'який) F3V1	- знижений тиск повітря в системі подачі; - порушення температурного режиму при виготовленні матеріалу .	- недостатній тиск в повітропроводі ; - виникнення можливості пориву елементів респіратора; - зменшення захисної ефективності та пилоємності фільтра.	8	5	1	40
2. Пошкодження матеріалу або брак F3V2	-механічний вплив при виготовленні матеріалу; -людський чинник; -дія зовнішніх факторів на готовий матеріал	-втрата захисних властивостей респіратора.	10	7	5	350
3. Деформація лицевої частини респіратора F3V3	- невідповідна фактура матеріалу; - неправильна процедура зберігання; - невідповідні кліматичні умови	-зниження фільтрувальних властивостей	4	7	6	168
4. Дефекти фактури корпусу моторового блоку F3V4	- невідповідність властивостей матеріалу, який обрано; - брак постачальника;	- погіршення експлуатаційних властивостей респіратора; - зменшення продуктивності виготовлення	7	2	5	70
5. Дефекти деталей (облой, задирки) F3V5	-наявність зазорів матриці в прес-формі; - відхилення від температурного режиму лиття	- розрив матеріалу Елефлен, втрата захисних властивостей; - поранення користувача	6	5	5	150
6. Нерозбірливе маркування виробу та складових частин F3V6	- засмічена друкуюча головка маркіратора; - неправильно вибрана роздільна здатність друку.	-невірний підбір класу ефективності респіратора відповідно умовам використання	8	3	2	48

Таблиця 1.7 – Фрагмент рекомендацій щодо зменшення наслідків помилок при виготовленні фільтрувальних респіраторів

Стадія	Варіативність	Рекомендації щодо зменшення ймовірності небезпечної ситуації
Виготовлення	F3V11	своєчасна профілактика розпилюючої установки
	F3V12	систематичний контроль стиснуте повітря
	F3V21	контролювання умов зберігання складових частин респіратора
	F3V22	своєчасна очистка поверхонь зберігання й транспортування матеріалів
	F3V31	контролювання умов навколишнього середовища
	F3V41	використовувати тільки затверджений перелік матеріалів
	F3V42	періодичний перегляд списку постачальників
	F3V51	проводити своєчасне технічне обслуговування обладнання
	F3V52	контролювання параметрів технологічного процесу
	F3V61	контролювання стану друку та роботи маркіратора

Якість конструкцій, що розробляються, визначається характеристиками конструктивних елементів, які повинні відповідати вимогам, що вказані у нормативних документах. Найбільш важливими є наступні [9]:

- показники призначення фільтрів, які визначаються функціональним призначенням ЗІЗОД: коефіцієнт проникання, пиломісткість, час захисної дії.

- ергономічні показники вузлів клапанних систем вдиху-видиху, смуги обтюрації, елементів кріплення лицевої частини: опір вдиху та видиху, вміст діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі, відповідність лицевої частини антропометричним розмірам обличчя, поля зору, розбірливість промовляння;

- показники надійності (можливість збереження властивостей протягом задекларованого терміну зберігання): гарантійний термін зберігання, коефіцієнт проникання, час захисної дії.

На виробничій стадії спроектовані ЗІЗОД починають виготовлятися як пробні зразки, що формують окремі партії продукції. Завданням даного етапу показати, що спроектований ЗІЗОД можна виготовляти серійно з однаковими параметрами. Ефективність таких ЗІЗОД ще не підтверджена, тому повноцінно використовувати їх на виробництві заборонено, окрім випадків, коли вони проходять виробничі випробування.

На стадії оцінки відповідності ЗІЗОД проходять випробування в лабораторних умовах на відповідність вимогам нормативних документів до них [10-12]. Наприклад, для моторизованих фільтрувальних респіраторів повнолицеві маски перевіряються на відповідність вимогам ДСТУ EN 136, а потім вже маска, яка була позитивно оцінена за результатами випробувань, тестується разом з моторизованим блоком на відповідність вимогам ДСТУ EN 12942. Тому, на цьому етапі можуть виникати ситуації, коли ЗІЗОД частково не відповідає вимогам. В такому випадку проєктувальники мають повернутись до підготовчої стадії та визначити причини, що стали джерелом невідповідності вимогам. До таких джерел можуть відноситись: недосконалість конструкції, конструкторські прорахунки, неправильно підібрані матеріали тощо.

Завершує життєвий цикл будь-якого ЗІЗОД поствиробнича стадія, коли приймається рішення про закінчення виробництва даного виробу та його подальша утилізація. Зазвичай вироби знімаються з виробництва у випадку, коли:

- не відповідають вимогам чинного законодавства або стандартам на цей вид продукції. Наприклад, стандарт на ЗІЗОД залишився без змін, але було затверджено новий Технічний регламент засобів індивідуального захисту. В такому випадку виріб може не відповідати вимогам нормативного документу більш вищого за значимістю;
- за власним рішенням виробника, через відсутність замовлень або початок випуску нової більш сучасної моделі ЗІЗОД;
- вимушено, через відсутність комплектуючих або зміну використовуваних матеріалів.

В подальшому усі ЗІЗОД мають утилізуватись як відходи згідно Закону України «Про відходи» та Закону України «Про металобрухт», якщо в складі таких виробів були метали.

Застосування сучасних підходів до проектування ЗІЗОД дозволяє знизити фінансові витрати та зменшити строк виконання конструкторських робіт, а також забезпечити швидке і якісне виготовлення оснащення [13].

1.2 Аналіз вимог до комплексних ЗІЗОД

Вимоги до комплексних респіраторів в першу чергу визначаються нормативним документами, яким вони відповідають. Так, півмаски фільтрувальні з фільтрами, що від'єднуються, для захисту від газів, газів та аерозолів або лише аерозолів за ДСТУ EN 1827 мають бути такими, що покривають ніс, рот і підборіддя, при цьому фільтр має бути таким, що від'єднується, та замінним, фільтри призначені для використання не більше однієї зміни [14].

Натомість фільтрувальні півмаски з клапанами для захисту від газів або газів і аерозолів за ДСТУ EN 405 конструктивно мають складатись повністю або частково з фільтрувального матеріалу, що є невід'ємною частиною респіратора.

Скомбіновані фільтри за ДСТУ EN 14387 мають захищати користувача від різного типу забруднюючих речовин, включаючи аерозолі, гази та випари. Такі фільтри можуть однонаправленої дії, тобто захисту від однієї визначеної речовини, наприклад NH_3 , або багатотипними, що захищають від більше ніж одного газу або шкідливої речовини. Дані фільтри складаються з протигазового фільтра та протиаерозольного фільтра.

Усі вище зазначені респіратори мають відповідати щодо захисних та ергономічних характеристик, надійності у використанні та здатності витримувати фізичний вплив [15-17]. До захисних характеристик відносяться коефіцієнт проникання та час захисної дії фільтра, загальний коефіцієнт проникання виробу (табл. 1.8).

Таблиця 1.8 – Захисні характеристики пилогазозахисних фільтрувальних ЗІЗОД

Позначення типу та класу	Максимальне допустиме значення коефіцієнту проникання фільтра, %	Час захисної дії фільтра, хв.	Максимальне допустиме значення загального коефіцієнту проникання виробу, %	Примітки
Півмаски фільтрувальні з фільтрами, що від'єднуються, за ДСТУ EN 1827				
FM Gas1 P1	20	70 (для C ₆ H ₁₂) 40 (для H ₂ S) 20 (для SO ₂) 50 (для NH ₃)	5 %	
FM Gas2 P2	6	40 (для C ₆ H ₁₂) 40 (для H ₂ S) 20 (для SO ₂) 40 (для NH ₃)	5 %	
FM Gas3 P3	0,05	-	5 %	
Фільтрувальні півмаски з клапанами ДСТУ EN 405				
FFGas1 P1	20	70 (для C ₆ H ₁₂) 40 (для H ₂ S) 20 (для SO ₂) 50 (для NH ₃)	5 %	
Продовження таблиці 1.8				
FFGas1 P2	6	40 (для C ₆ H ₁₂) 40 (для H ₂ S) 20 (для SO ₂) 40 (для NH ₃)	5 %	
FFGas1 P3	1	-	5 %	
Фільтри скомбіновані ДСТУ EN 14387				
Gas1 P1	20	70 (для C ₆ H ₁₂) 40 (для H ₂ S) 20 (для SO ₂) 50 (для NH ₃)	-	
Gas2 P2	6	40 (для C ₆ H ₁₂) 40 (для H ₂ S) 20 (для SO ₂) 40 (для NH ₃)	-	
Gas3 P3	0,05	105 (для C ₆ H ₁₂) 120 (для H ₂ S) 60 (для SO ₂) 120 (для NH ₃)	-	

Ергономічні характеристики стосуються опору вдиху та видиху виробу, вмісту діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі, зручності в користуванні виробом, оцінці прийнятності площі поля зору та зручності елементів кріплення наголів'я (табл. 1.9).

Таблиця 1.9 – Ергономічні характеристики пилогазозахисних фільтрувальних ЗІЗОД

Позначення типу та класу	Максимально допустиме значення опору диханню, мбар, за витрати		Вміст діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі, %
	30 л/хв	95 л/хв	
Півмаски фільтрувальні з фільтрами, що від'єднуються, за ДСТУ EN 1827			
FM Gas1 P1	1,6	6,1	1,0 %
FM Gas2 P2	1,7	6,4	
FM Gas1 P3	2,2	8,2	
Фільтрувальні півмаски з клапанами ДСТУ EN 405			
FFGas1 P1	1,6	6,1	1,0 %
FFGas1 P2	1,7	6,4	
FFGas1 P3	2,0	7,0	
Фільтри скомбіновані ДСТУ EN 14387			
Gas1 P1	1,6	6,1	Не застосовується
Gas2 P2	2,1	8,0	
Gas1 P3	2,2	8,2	

Оцінка прийнятності площі поля зору респіратора та зручності його в користуванні виконується кваліфікованими випробувачами, тому й оцінка прийнятності є переважно експертним методом, конкретних числових значень немає [18]. Натомість такі показники як опір диханню та вміст діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі мають встановлені значення [19, 20].

До характеристик ЗІЗОД зі здатності до витримування зовнішнього впливу відносяться міцність кріплення клапанів вдиху та видиху, температурний вплив та перевірка з механічної міцності. Складові частини фільтрувальних ЗІЗОД мають витримувати розтягувальне зусилля, що прикладається перпендикулярно до осі виробу. Для фільтрувальних півмасок дане зусилля становить 10 Н. яке прикладається протягом 10 с. Після закінчення прикладення зусилля виріб візуально не повинен мати пошкоджень.

Щодо температурного впливу, то дана вимога перевіряє виріб щодо здатності витримувати критичні температури без зниження захисних та ергономічних характеристик. Респіратори мають послідовно витримуватись

за температур мінус 30 °С протягом 24 годин та + 70 °С протягом 24 годин з проміжками між температурними впливами не менше 4 годин.

Перевірка з механічної міцності допомагає оцінити респіратор щодо можливого фізичного впливу при транспортуванні та використанні. Така перевірка передбачає вібраційний вплив при цьому респіратор підкидається на висоту до 2 см з частотою 100 Гц. Після випробування такий респіратор не повинен мати пошкоджень та продовжувати нормально працювати.

Окрім вище зазначених вимог, що встановлені в стандартах на респіратор, останні додатково повинні відповідати й вимогам ТР ЗІЗ, який визначає наступні моменти:

- ЗІЗОД мають бути спроектовані та виготовлені таким чином, щоб вони не створювали ризиків або інших будь-яких несприятливих наслідків для користувача при користуванні ним за призначенням [21];

- матеріали, що використовуються для виробництва ЗІЗОД, а також будь-які можливі речовини, що можуть з них виділятися в процесі використання, не повинні створювати небезпеку для користувача;

- усі частини ЗІЗОД, що безпосередньо контактують або потенційно можуть контактувати з тілом користувача, не повинні створювати загроз користувачеві через наявність гострих країв та виступів, шорсткуватих поверхонь тощо [22];

- конструкція та форма ЗІЗОД мають сприяти його правильному розташуванню і фіксації на голові користувача протягом усього строку використання [23];

- ЗІЗОД повинні бути найменшої маси, щоб не створювати додаткового навантаження на голову користувача та незручностей при використанні;

- респіратори, що потенційно можуть використовуватись з іншими ЗІЗ, мають бути сумісними з такими та не створювати додаткових небезпек [24];

- забезпечувати очищення вдихуваного користувачем повітря протягом всього періоду їх застосування у визначених виробником умовах [25].

1.3 Аналіз шляхів вирішення задачі з ізолювання органів дихання півмасками (масками) від навколишнього середовища

Ізолювання органів дихання від навколишнього середовища шляхом використання ЗІЗОД здійснюється по смузі щільного прилягання лицевої частини респіратора, яка називається смугою обтюрації, до обличчя користувача, а також за допомогою використання клапана(ів) видиху [26].

Клапан(и) видиху дозволяє(ють) виводити повністю або частково видихуване людиною повітря в навколишнє середовище, що дозволяє зменшувати вміст діоксиду вуглецю в підмасковому просторі та відводити видихувану вологу. Проте, щоб сам клапан видиху не став джерелом потрапляння не фільтрованого повітря в підмасковий простір – він має бути еластичним, герметичним та швидко перекривати канал відводу повітря [27-34].

Смуга обтюрації, в залежності від виду та конструкції використовуваного ЗІЗОД, може бути різною, а тому й захищати відмінні ділянки обличчя користувача [35-36].

Загалом будь-яка смуга обтюрації має форму суцільної замкненої лінії, що характеризується шириною та еластичністю (гнучкістю). Саме дані параметри найчастіше впливають на ефективність припасування. З іншої сторони, фільтрувальні респіратори має певну конструктивну форму, яку їм було надано виробником, тому еластичність лише дозволяє незначно змінювати своє положення в просторі при носінні користувачем.

Смуга обтюрації фільтрувальних півмасок являє собою замкнений контур, що проходить через перенісся, щоки та підборіддя користувача. На рисунку 1.5 показано смугу обтюрації на прикладі легкої фільтрувальної півмаски для захисту від аерозолів та газів «Respy» виробництва ТОВ НВП «СТАНДАРТ» (м. Дніпро, Україна). В залежності від конструкції фільтрувальної півмаски смуга обтюрації також змінюватиметься [37].



Рисунок 1.5 – Смуга обтюрації легкої фільтрувальної півмаски «Respy»

Для фільтрувальних респіраторів даної конструкції для більшості користувачів саме ділянка навколо носу та вилиць є проблемною щодо створення щільного прилягання. Це пояснюється складною формою поверхні та присутністю мимічних рухів обличчя користувача.

На рисунку 1.6 показано смугу обтюрації півмаски РПА-ДС виробництва ТОВ НВП «СТАНДАРТ» (м. Дніпро, Україна), до якої приєднується комплект з двох скомбінованих фільтрів. Даний тип фільтрувальних респіраторів характеризується більш ефективною в плані захисту смугою обтюрації у порівнянні з легкими фільтрувальними респіраторами (рис. 1.5).



Рисунок 1.6 – Смуга обтюрції півмаски РПА-ДЄ

Смуга обтюрції маски являє собою замкнутий контур і проходить через лоб, скроні, щоки та підборіддя. Вона є більш ефективною, оскільки виготовляється з непроникних матеріалів зокрема ТРЕ чи чума.

Щодо конструкцій масок (повно лицевих масок) існують два варіанти виконання, а саме виключно з повнолицевої маски та повнолицевої маски з підмасочником (рис. 1.7 та 1.8).



Рисунок 1.7 – Смуга обтюрації маски без підмасочника



Рисунок 1.8 – Смуга обтюрації маски з підмасочником

У справному і правильно підібраному ЗІЗОД до обличчя користувача надходження нефільтрованого повітря у підмасковий простір можливий тільки за смугою обтюрації і нещільностями клапанів видиху на фазі вдиху [38-40]. Треба зауважити, що для правильно підібраного ЗІЗОД підсмоктування за смугою обтюрації виникає при мимічних рухах обличчя, коли користувач розмовляє, позіхає або дихає ротом. Також підсмоктування за смугою обтюрації може виникати при рухах головою, наприклад вгору-вниз або вправо-вліво, в цьому випадку респіратор може зміщувати на обличчі від свого нормального положення розташування [41, 42].

Надходження аерозолів, газів і/або парів токсичних речовин в підмасковий простір через клапан видиху не викликано підсмоктуванням, оскільки клапани проєктуються та виготовляються герметичними. В даному випадку рушійною силою потрапляння не фільтрованого повітря є розрідження, яке створюється людиною в підмасковому просторі при вдиху [43, 44].

Розрідження дорівнює різниці між атмосферним тиском навколишнього середовища та тиску, що створюється в підмасковому просторі при вдиху за формулою

$$P_{атм} - P_{пм} = \mu v (R_{ф} + R_{кл} + R_{обт}), \quad (1.1)$$

де $P_{пм}$ – перепад тиску під маскою, Па; $R_{ф}$ – аеродинамічний опір фільтра, Па•с/м; $R_{кл}$ – аеродинамічний опір клапана видиху Па•с/м; $R_{обт}$ – аеродинамічний опір обтюратора, Па•с/м; μ – динамічна в'язкість повітря, Па с; v – швидкість руху повітря, м/с.

Таким чином, розрахована величина розрідження в підмасковому просторі залежить від аеродинамічного опору фільтра(ів) ЗІЗОД, опору клапанів вдиху, що встановлені на фільтрі(ах), а також від обсягу легеневої вентиляції (хвилинного обсягу дихання), який залежить від фізичного навантаження [45-47]. Так, зі збільшенням фізичного навантаження підвищується легенева вентиляція, а тому й швидкість та глибина вдиху, все це збільшує розрідження в підмасковому просторі [48, 49]. Треба зауважити,

що аеродинамічні опори фільтру та клапану вдиху не є постійними величинами, а залежать одна від одної та змінюються від прикладеного зусилля вдиху людиною [50].

Підсмоктування також може виникати через нещільності за смугою обтюрації, а також через клапан видиху, що залежить від інерційності або швидкості закриття останнього [51-56].

Для того, щоб оцінити величину підсмоктування переважно використовується коефіцієнт ізолювання [57]. Коефіцієнт ізолювання (KI) під лицеву частину який дорівнює відношенню концентрації парів (газів) та аерозолів, що потрапили у підмасковий простір через смугу обтюрації і клапани видиху C_i , до концентрації відповідно парів, газів та аерозолів у навколишньому повітрі робочої зони C_o . Даний коефіцієнт є розрахунковим, він теоретично встановлює загальну кількість забруднюючої речовини, що надійшла в підмасковий простір. Він розраховується з урахуванням величини витрати повітря через фільтри та нещільностей за смугою обтюрації, а також коефіцієнтів проникнення крізь фільтри K_n і підсмоктування K_{no} .

Кількість речовини, що може проникнути в підмасковий простір, мг, в такому випадку можна розрахувати за формулою

$$C_i = C_o (Q_\phi K_\Pi + Q_{\Pi o} K_{\Pi o}) t, \quad (1.2)$$

де t – час роботи в респіраторі, хв.; Q_ϕ – витрата повітря через фільтр, $\text{дм}^3/\text{хв.}$; $Q_{\Pi o}$ – витрата повітря через зазори, $\text{дм}^3/\text{хв.}$

Виходячи з вище зазначеного рівняння коефіцієнт захисту респіратора можна розрахувати за формулою

$$K_3 = \frac{C_o}{C_i} = \frac{\left[1 + \frac{Q_{\Pi o}}{Q_\phi} \right]}{K_\Pi + \frac{Q_{\Pi o}}{Q_\phi} K_{\Pi o}}. \quad (1.3)$$

З вище вказаної формули можна отримати формулу для визначення коефіцієнта ізолювання

$$K_i = \left[1 + \frac{Q_{по}}{Q_{\phi}} \right] / K_{по}, \quad (1.4)$$

де відношення $Q_{по}/Q_{\phi}$ – це показник щільності прилягання півмаски до обличчя. Дана величина залежить від конструкції обтюратора, розмірів обличчя користувача та виду виконуваної роботи.

Дослідження науковців показали, що рух повітря через фільтр є переважно ламінарним, тому витрата повітря лінійно залежить від перепаду тиску та її можна виразити рівнянням

$$Q_{\phi} = k_{\phi} \Delta p, \quad (1.5)$$

де Δp – перепад тиску на фільтрі, Па; k_{ϕ} – коефіцієнт опору фільтра, $\text{м}^5/\text{Н}\cdot\text{с}$.

З іншого боку витрата повітря через зазори за смугою обтюрації та нещільностями в конструкції також пов'язана з перепадом тиску формулою

$$Q_{по} = k_{по} (\Delta p_1 - \Delta p), \quad (1.6)$$

де Δp_1 – перепад тиску на респіраторі, Па; $k_{по}$ – коефіцієнт опору щілин, що створюються по смузі обтюрації, $\text{м}^5/\text{Н}\cdot\text{с}$.

Залежність показника щільності $K_{щ}$ від перепаду тиску можна показати через витрату повітря, що проходить через нещільності. В такому випадку величину щільності прилягання півмаски до обличчя в числовому еквіваленті можна визначити за формулою

$$K_{щ} = \frac{Q_{по}}{Q_{\phi}} = \frac{(\Delta p_1 - \Delta p) k_p}{\Delta p}, \quad (1.7)$$

де $k_p = k_{\phi} / k_{пс}$.

Показник щільності прилягання для кожної респіратора визначається окремо та залежить від конструкції респіратора й антропометричних особливостей користувача.

Для розрахунку витрат повітря через зазори можна скористатись формулою

$$Q_B = k_B (\Delta p)^a (d_B)^b, \quad (1.8)$$

де Q_v – витрата повітря через витоки за смугою обтюрації, $\text{дм}^3/\text{хв}$; a , b – константи, які визначаються експериментально для кожного типу півмасок; $k_{\text{по}}$ – коефіцієнт опору зазорів, $\text{м}^5/\text{Н}\cdot\text{с}$; d_v – геометричний розмір отворів між обтюратором і обличчям користувача, м.

Аналізуючи вище наведені формули та умови для визначення коефіцієнтів підсмоктування через зазори можна спрогнозувати рішення, якими реально зменшити підсмоктування за нещільностями. До основаних шляхів зменшення підсмоктування можна віднести наступне:

- Підвищення коефіцієнту опору обтюратора шляхом збільшення площі смуги обтюрації, рівномірного розподілу притискних зусиль шляхом оптимізації конструкції головного гарнітуру, підвищення еластичності матеріалу обтюратора [58];

- Оптимізація роботи клапану видиху за рахунок зміни його конструкції шляхом підбору відповідного розміру та матеріалу пелюстки клапану [59];

- Зменшення опору фільтрів за рахунок зміни конструкції фільтра і підбору відповідних фільтрувальних матеріалів [60];

- Використання подвійної смуги обтюрації, яка б ураховувала особливості антропометричних параметрів обличчя [61, 62];

- Створенням надлишкового тиску в підмасковому просторі шляхом нагнітання автоматизованими системами очищеного через фільтри повітря [63].

Визначення коефіцієнту ізолювання масок або півмасок можна виконувати шляхом експериментального випробування зразків. Методи визначення коефіцієнту ізолювання описані у відповідних стандартах на вироби та складаються з тестування зразків з імітацією забрудненого повітря. Тест-аерозолями можуть бути хлорид натрію, гексафторид сірки та інші. Людина в респіраторі заходить у випробувальну камеру, де розпилено тест-аерозоль, та виконують вправи при цьому обладнання реєструє кількість речовини у підмасковому просторі [64, 65]. Дані методи є кількісними та можуть надати вичерпну відповідь щодо коефіцієнту ізолювання.

Ще одним кількісним методом з визначення щільності прилягання є Fit Test [66]. Концентрація тест-речовини, що розпилена в зоні дихання людини, реєструється спеціальним обладнанням та в режимі реального часу показує, як змінюється щільність прилягання респіратора під час його застосування [67].

Зауважимо, що використання тест-аерозолів має свої переваги зокрема надання конкретних числових значень щодо величини проникнення речовини в підмасковий простір, але також мають й недоліки як от діаметр часток тест-аерозолу та його стан [68-70]. На рисунку 1.9 представлено розподіл часток у відсотках за діаметром для двох найбільш поширених тест-аерозолів – хлориду натрію та парафінової оливи. Графіки побудовано згідно даних стандарту ДСТУ EN 13274-7:2019, в якому встановлено вимоги до вище згаданих аерозолів.

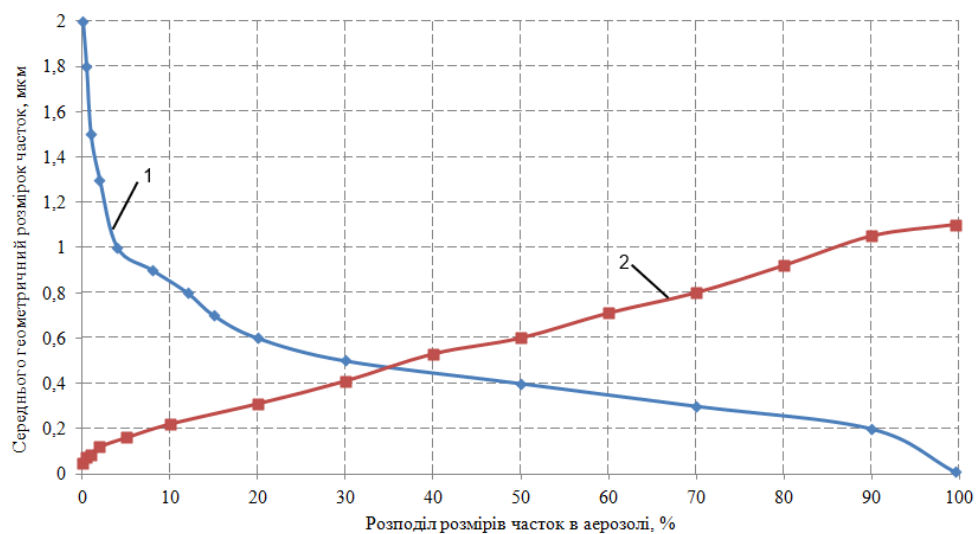


Рисунок 1.9 – Розподіл часток тест-аерозолів за діаметром:

1 – парафінова олива; 2 – хлорид натрію

Аналізуючи даний рисунок можна побачити, що тест-аерозоль хлорид натрію переважно має більш крупні за діаметром частинки та характеризується їх розподілом від 0,02 до 1,1 мкм, тоді як парафінова олива переважно має більш дрібніші частинки, що підтверджується значенням середньомасового розподілу часток 0,4 мкм [71]. Тож, використання тест-

аерозолів надає числові значення для аналізування, проте використання конкретної речовини може вносити свій вплив на загальний отримуваний результат [72-74]. Вважасться, що використання цих двох типів аерозолів дозволяє змодельовати ситуації з проникнення частинок різного походження. Так, хлорид натрію характеризує тверді частинки зокрема пил, що зустрічається в навколишньому середовищі, тоді як парафінова олива є характерною для рідких аерозолів, наприклад краплинки фарби, парафіну тощо, що можуть зустрічатись також в робочих умовах.

Окремий напрямок тестування стосується використання наноаерозолів, проте на даний час запроваджені методики є дороговартісними та мають велику похибку.

Інший підхід з використанням якісних методів, де тест-аерозолями можуть бути речовини з солодким або гірким смаком [75, 76]. Людині в респіраторі надягають на голову спеціальний ковпак, що обмежує зону поширення тест-аерозолю, потім розпилюють сам тест-аерозоль під ковпаком. Якщо є нещільності прилягання чи брак в конструкції респіратора, то користувач відчує цей смак, це означатиме, що нещільність присутня. Проте такий підхід є повністю суб'єктивним та залежить від багатьох факторів зокрема припасування респіратора до обличчя користувача або наявності волосяного покриву [77-80].

Також застосовуються методи з визначення щільності прилягання через оцінку герметичності прилягання респіратора [81]. Наприклад, за допомогою порівняння витрати повітря до можливих витоків за нещільністю обтюратора через визначення розрідження у підмасковому просторі. Дані методи пов'язані з визначенням швидкості зменшення величини розрідження в підмасковому просторі та подальшим перерахунком на об'єм повітря, що надійшло в підмасковий простір. Проте недоліком даного методу є те, що достеменно невідомо через які саме місця відбувається надходження не фільтрованого повітря [82, 83].

1.4 Аналіз характеристик та конструктивних особливостей існуючих моделей моторовий фільтрувальних респіраторів з капюшоном

З метою розробки вдосконаленої конструкції моторного фільтрувального респіратора (МФР), орієнтованого на використання в умовах надзвичайних ситуацій та аварійно-рятувальних робіт, було проведено порівняльний аналіз характеристик трьох популярних на ринку моделей. Аналіз дозволив визначити їхні переваги та недоліки, а також сформулювати вимоги до нового зразка, що забезпечуватиме підвищену ергономіку, надійність і захисну ефективність.

3M Versaflo TR-600 [84] це компактний МФР, широко застосовуваний у виробничих умовах. Має один універсальний розмір капюшону, не інтегрований із каскою, подача повітря здійснюється на фіксованій швидкості, моніторинг додаткових небезпек відсутній.

Honeywell North Primair PA7000 [85] це модульна система з можливістю обслуговування та адаптації. Недоліками є значна вага, підвищений рівень шуму вентилятора, роздільні капюшон і каска, відсутність автоматичної адаптації потоку повітря та сенсорів радіаційного контролю.

Scott Safety Duraflow SRS [86] це рішення з можливістю регулювання потоку «по потребі». Має високу вартість, обмежені розміри капюшона, відсутність орієнтації на аварійно-рятувальні та інші надзвичайні ситуації, немає ударозахисного елемента в конструкції.

Аналіз проводився за системним підходом, що включав чотири етапи:

На першому етапі проводилось визначення критеріїв оцінки. Було обрано ключові параметри, які впливають на ефективність і зручність використання МФР, а саме підгонка лицевої частини, система захисту голови користувача, регулювання об'єму повітряного потоку, моніторинг середовища, призначення та ергономіка.

На другому етапі проводився збір даних. Використано технічну документацію виробників, результати незалежних тестів та огляди

користувачів з відкритих джерел мережі Інтернет для моделей 3M Versaflo TR-600, Honeywell North Primair PA7000 та Scott Safety Duraflow SRS.

На третьому етапі проводилось порівняння за критеріями. Для кожного параметра визначено типові рішення, їх недоліки, запропоновані конструктивні зміни та очікувані переваги.

На четвертому етапі проводилось узагальнення результатів, яке представлено у вигляді порівняльної таблиці (табл. 1.10), що демонструє відмінності між існуючими рішеннями та проектованою конструкцією.

Розглядались наступні існуючі на ринку моделі:

3M Versaflo TR-600 компактний моторний фільтрувальний респіратор із одним універсальним розміром капюшона, не інтегрований із каскою. Подача повітря здійснюється на фіксованій швидкості, моніторинг додаткових небезпек відсутній.

Honeywell North Primair PA7000 модульна система з можливістю обслуговування та адаптації. Недоліки: значна вага, підвищений рівень шуму вентилятора, роздільні капюшон і каска, відсутність автоматичної адаптації потоку повітря та сенсорів радіаційного контролю.

Scott Safety Duraflow SRS рішення з можливістю регулювання потоку «по потребі». Має високу вартість, обмежені розміри капюшона, відсутність орієнтації на аварійно-рятувальні роботи, немає ударозахисного елемента.

На основі аналізу було розроблено концепцію конструкції МФР, що складається з капюшона, інтегрованого з каскою, моторового блоку та шлангу для подачі повітря, а також плечової системи з поясным ременем для комфортного носіння. Усі елементи мають забезпечувати високу надійність при роботі в надзвичайних ситуаціях та відповідати вимогам захисної ефективності й ергономіки.

Таблиця 1.10 – Результати аналізування конструктивних особливостей різних МФР

Критерій	Типові моделі	Недоліки	Запропонована розробка	Переваги розробки
Підгонка лицевої частини за розміром	Один універсальний розмір	Погана герметичність та комфорт для користувачів з нестандартними розмірами голови	Два типорозміри (М, L) на основі антропометрії	Краща герметичність і зручність
Захист голови	Окремий капюшон і каска	Додаткова вага, громіздкість, складність одягання	Капюшон інтегрований з каскою	Менша вага, швидке надягання, захист від пилу та ударів
Регулювання повітряного потoku	Постійна швидкість вентилятора	Не компенсує падіння тиску при забиванні фільтра чи зміні дихання	Автоматичне регулювання через MP7002 та Arduino	Стабільний потік, енергоефектив ність
Моніторинг середовища	Відсутній	Немає оперативної інформації про небезпеки	Датчик радіації в реальному часі	Оперативне реагування на радіаційне забруднення
Призначення	Промислові умови	Не оптимізовані для аварійно- рятувальних робіт	Розробка під надзвичайні ситуації (ХБРЯ-загрози)	Підвищена ефективність у критичних умовах
Ергономіка	Велика вага та шум	Втома користувача	Оптимізований розподіл ваги, шумозахист	Менше втоми, комфорт тривалої роботи

1.5 Аналіз фільтрувальних матеріалів, що використовується при виготовленні ЗІЗОД

При застосуванні волокнистих матеріалів для високоефективної очистки за нормальних умов, швидкість лінійної фільтрації через них зазвичай становить декілька см/с, головними механізмами захвата часток будуть електростатичний, дифузійний та зачеплення [87, 88]. Проте, з часом зберігання такого матеріалу, дієвість електростатичного ефекту зменшується та в повній мірі починають працювати механізми дифузійний та зачеплення. В такому разі сумарний коефіцієнт захвата та фільтрації частинок буде збільшуватись зі зменшенням діаметру волокна. Так, в роботах [89, 90] було проведено дослідження із застосуванням тест-аерозолі з діаметром частинок 0,4 мкм та фільтрувальним матеріалом з волокнами діаметром менше 1 мкм, в результаті було отримано підтверджувальні дані вище зазначеного формулювання.

Однак матеріали з тонкими волокнами, діаметр яких становить менше 1 мкм, характеризуються низькою механічною міцністю щодо впливу зовнішніх чинників [91]. Тут під зовнішніми чинниками слід розуміти розтягувальні або стисні зусилля, вплив екстремально високих або низьких температур, згинання та зминання [92, 93]. У цьому випадку прийнятний компроміс досягається створенням мультирозмірного матеріалу, де будуть присутні волокна різного діаметру, наприклад 0,2 мкм та 1 мкм. У такій композиції більш тонкі волокна забезпечують матеріалу підвищення коефіцієнта фільтрації, а більш товсті – створюють каркасну основу, що буде зберігати достатню механічну міцність [94-97]. Характеристики подібних вітчизняних та зарубіжних фільтрувальних матеріалів представлені в таблицях 1.11 та 1.12.

Таблиця 1.11 – Основні характеристики вітчизняних волокнистих фільтруючих матеріалів для вискоєфективної очистки

Марка фільтруючого матеріалу	Маса одиниці площі, г/м ²	Середній діаметр волокна, мкм	Щільність, г/м ²	Опір повітряно му потоку, Па	Коефіцієнт проникання (випробування з парафіною оливою за витрати 95 л/хв.)	Нормативний документ на матеріал
Елефлен 5Р	45-55	1,5	45÷55	4÷7	5÷8	ТУ У 25513947.010-20000
Елефлен 5Л	45-55	1,2	45÷55	5÷8	3÷5	ТУ У 25513947.010-20000
НФП	45-55	2,0	45÷55	4÷6	8÷10	ТУ У 13486464.003-96

Таблиця 1.12 – Основні характеристики закордонних волокнистих фільтруючих матеріалів для вискоєфективної очистки

Фірма, країна	Марка матеріалу	Речовина волокон	Середній діаметр волокон, мкм	Товщина Н, мм	Щільність матеріалу, г/м ²	Стандартний опір [ΔР], (мм в.с.) с/см	Проникність К, %	Посилання
Технологія Meltblown								
Sterlitech, США	GA-55	Скло	0,6	0,21	55	23	0,5	[98]
DORSAN filtration, Німеччина	FV-110	Скло	0,6	0,25	52	18	0,1	[99]
Hollingsworth & Vose	PE13050N A-H	Поліпропілен	0,7	0,46	50	4	2,6 ³	[100]
NOWOmel	FT 35 W, PP 91289	Поліпропілен	1,2	1,0	35-37	8,2	3,8	[101]
NOWOmel	FT 30 W, PP, FFP-3 91307	Поліпропілен	1,0	0,8	30-32	6,9-8,1	1,1	[101]
Berry Synergex	BP3 R20, natur	Поліпропілен	0,4	1,2	50	8,9-9,5	0,1	[102]
Berry Synergex	BP2 R20, natur	Поліпропілен	0,8	1,0	45	7,1-7,7	0,8-1,3	[102]
Паперова технологія								
США	HEPA	Скловолокно	0,63	1	7	7,5	10 ⁻⁵	[103]
США	ULPA		0,37	1	8	8,0	10 ⁻⁶	[103]

Якщо розглядати узагальнено характеристики матеріалів, то їх можна поділити за вихідною речовиною (матрицею) з якої вони виготовляються. Найчастіше такі матеріали є синтетичними оскільки хімічна промисловість змогла створити цілий комплекс варіацій, крім того органічні матеріали є дорогими для використання в масовому виробництві. Дану картину можна побачити за результатами оцінки ефективності фільтрування частинок PM_{2,5} синтетичними матеріалами (табл. 1.13).

Таблиця 1.13 – Основні характеристики волокнистих фільтруючих матеріалів за матеріалом

Тип матеріалу	Ефективність фільтрації, %	Перепад тиску, Па	Коефіцієнт ефективності	Посилання
Поліамід (PI)	99.97	73	0.1072	[104]
Полістирол (PS)	99.99	145	0.15	[105]
Поліакрилонітрил (PAN)	96.12	133	0.024	[106]
Полівініл (PVA)	96,70	178	0,019	[107]
Полівінілпиролідон (PVP)	95	101	0,029	[108]
Полівінілденфторид (PVDF)	98,16	30	0,120	[109]

Крім того, існують технологічні прийоми підвищення коефіцієнта фільтрації без втрати міцності матеріалу, наприклад напилення волокон на вже готову матрицю або його ущільненням шляхом холодної прокатки.

Для підвищення пиломісткості волокнистого матеріалу використовується інший прийом – змінюють радіус волокон матеріалу та щільність їх упаковки по глибині так, щоб розподілення по ній осаду аерозольних частинок було якомога більш рівномірним [110, 111]. Це забезпечується використанням пакету матеріалів з різними параметрами, що в подальшому технологічно з'єднуються між собою (рис. 1.10 а), або

пошаровим формуванням цілісного матеріалу з потрібними параметрами ще на стадії виготовлення (рис. 1.10 б).



Рисунок 1.10 – Загальна схема багатошарового фільтрувального матеріалу:

- а – сформованого з пакету матеріалів,
б – шляхом наплення волокон на матрицю

Для вибору оптимальних характеристик такого структурованого по глибині волокнистого матеріалу вирішують відповідну варіаційну задачу, використовуючи зазвичай чисельні методи. Детальніше це питання розглянуто в [112-115].

Уловлювання парогазоподібних шкідливих речовин фільтрувальними ЗІЗОД базується на фізико-хімічному процесі їх поглинання – сорбції [116]. При цьому, коли сорбент забезпечує знешкодження за рахунок протягування молекул шкідливої речовини до свого поверхневого шару, цей процес називають адсорбцією.

При фізичній адсорбції здійснюються три типи міжмолекулярної взаємодії:

- дисперсна взаємодія, коли молекули адсорбенту і шкідливої речовини мають значення дипольного моменту близькі до нуля. Диполі виникають в парах шкідливої речовини миттєво як тільки вона потрапляє в силове поле електронів адсорбенту. Як приклад можна привести випадки, коли активоване вугілля адсорбує пари вуглеводнів;

- індукційна взаємодія, коли один з двох учасників процесу має молекули з постійними диполями. В такому випадку, один з учасників

процесу є активним та генерує з'єднання в іншим учасником процесу, як приклад можна навести випадок адсорбції аміаку з активним вугіллям;

- орієнтаційна взаємодія, коли молекули, як адсорбенту, так і адсорбуючої речовини, мають постійний електричний диполь, наприклад, при адсорбції парів води силікагелем. В такому випадку вони реагують виключно один на одного та не вступають в реакцію з іншими речовинами.

Рушійною силою адсорбції є градієнт концентрації. При адсорбції відбувається зміна енергії E системи «речовина - тверде тіло». Чим більша E , тим міцніше взаємозв'язок адсорбційної молекули з молекулами твердого тіла. Надлишкова енергія при адсорбції виділяється у вигляді тепла.

Основними факторами, що обмежують повне використання адсорбційної здатності поглинального шару в динамічних умовах, є кінетика адсорбції та поздовжнє перенесення шкідливих речовин. В умовах реального поглинання швидкість адсорбції є високою, але не безмежною. Поздовжнє перенесення зумовлене трьома ефектами: стіновим ефектом, що виникає через менший аеродинамічний опір гранульованого сорбенту біля стінок фільтру порівняно з його внутрішнім об'ємом; ефектом грануляції, який обумовлений різним розміром гранул сорбенту; та ґрунтовим ефектом, що пов'язаний із використанням пружин і додаткових пристроїв для ущільнення активованого вугілля та запобігання його переміщенню.

При додаванні до пористих сорбентів каталізаторів або інших хімічно активних сполук поглинання шкідливих газів і парів відбувається завдяки хемосорбції. Цей процес полягає в хімічній взаємодії молекул газу з пористою поверхнею сорбенту, що веде до їх подальшої реакції з нанесеними компонентами, і є незворотним процесом [117].

Фізична адсорбція обумовлена в основному ван-дер-ваальсовими силами, при цьому процесі адсорбована сполука не зазнає хімічної зміни. Окрім фізичної адсорбції відомий також процес хемосорбції [118-120]. Такий тип сорбційного процесу, подібно до інших хімічних перетворень, відрізняється великою енергією активації; при цьому виникає хімічний

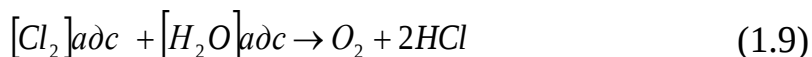
зв'язок, який змінює хімічну природу сорбованої молекули. При цьому також виділяється певна кількість теплової енергії в навколишнє середовище, що призводить до нагрівання сорбенту, або поглинається певна кількість теплової енергії з навколишнього середовища, що зустрічається на практиці не часто. У більшості випадків при хемосорбції виникають міцніші зв'язки, ніж при фізичній адсорбції, хоча іноді можливе проміжне явище - так звана легко оборотна хемосорбція.

Для практичного використання адсорбційного процесу критично важливою є здатність адсорбенту поглинати певну шкідливу речовину. Тому експериментально визначають рівноважну адсорбційну ємність за постійної температури як функцію рівноважної концентрації та парціального тиску. Ця залежність графічно зображується як ізотерма адсорбції. В окремих випадках також цікавляться ізобарою адсорбції – температурною залежністю адсорбції за постійного парціального тиску (концентрації речовини) [121, 122].

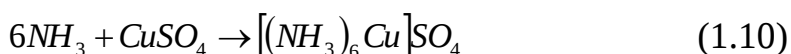
Основними критеріями вибору хімічних реагентів, які будуть використовуватись в якості сорбентів є: не токсичність і достатня розчинність у воді, відсутність запаху, неможливість утворення шкідливих газоподібних продуктів реакції, стійкість продуктів реакції при кімнатній температурі і близьких до неї температурах, доступність і відносна дешевизна.

До основних механізмів сорбції парів і газів промислових токсичних хімікатів відносять:

- гідроліз; є найбільш ймовірним механізмом реакції з хлором за наступним рівнянням:



- фізична адсорбція (найчастіше виявляється при поглинанні аміаку хімічним поглиначем «купраміт»:



- каталіз; наприклад окис вуглецю в шарі гопкаліту перетворюється в оксид вуглецю за формулою:



Поглинання газоподібних шкідливих речовин найчастіше забезпечується використанням активних речовин, які випускаються у вигляді гранул, циліндрів або зерен неправильної форми. До таких відносяться: активне вугілля, силіконові гранули, гопкаліт та алюмогель.

Адсорбція на поверхні макропор таких речовин не має практичного значення у зв'язку з їх малою питомою поверхнею. В сорбційному процесі вони грають роль транспортних каналів, по яким молекули речовини, яка поглинається, проникають вглиб зерен сорбенту [123, 124]. Як правило, об'єм макропор активного вугілля знаходиться в інтервалі 0,2-0,8 см³/г, а питома поверхня складає 0,5-2 м²/г.

В залежності від величини питомої поверхні активних речовин, вони можуть грати значну роль при поглинанні парогазообразних речовин за високих концентрацій. Їх об'єм знаходиться у межах від 0,02 до 0,1 см²/г, а питома мікропористість – в інтервалі від 20 до 70 м²/г. Тому саме активне вугілля здобуло значне поширення у використанні в конструкції протигазових фільтрів.

Активоване вугілля використовується як носій каталітичних і хемосорбційних добавок для поглинання різноманітних речовин, зокрема спиртів, основних і кислих газів, парів ртуті та інших полярних сполук [125]. Найчастіше такими добавками є солі важких металів. Наприклад, для поглинання аміаку й основних газів застосовують сульфат міді, хлорид кобальту або хлорид нікелю, а для кислих газів, таких як хлорид сірководню або сірчаний ангідрид, використовують оксиди хрому та марганцю.

При наявності каталізаторів та інших хімічно активних речовин у пористій структурі сорбенту поглинання шкідливих парів і газів відбувається через хемосорбцію [126]. Цей процес ґрунтується на хімічній взаємодії молекул газу з пористою поверхнею сорбенту. Хемосорбція є сильнішою за

фізичну адсорбцію та часто є незворотною. На відміну від фізичної адсорбції, де поглинені речовини можуть десорбуватися у незмінному вигляді при зміні температури чи тиску, хемосорбція супроводжується виділенням тепла [127]. Це особливо важливо враховувати, оскільки значне виділення тепла під час процесу може призвести до самозаймання фільтрувальних елементів.

1.6 Аналіз шляхів вирішення задачі з визначення часу захисної дії фільтрувальних ЗІЗОД

Основним документом, що регулює вимоги до проектування, виготовлення, перевірки та використання будь-яких ЗІЗ в Україні, є Технічний регламент засобів індивідуального захисту (ТР ЗІЗ) [128]. Однак конкретних вимог щодо впровадження систем ідентифікації закінчення терміну служби виробів не передбачено. У стандарті ДСТУ EN 14387 [129], який визначає вимоги до протигазових і комбінованих фільтрів, також немає вимоги щодо наявності таких систем. Виробник або постачальник повинні зазначати в інструкції, що мінімальний час захисної дії визначається виключно в умовах лабораторних випробувань за стандартних умов і не є показником можливого часу експлуатації у реальних умовах. Фактичний час використання може відрізнятися від захисного, встановленого відповідно до цього стандарту, як у бік збільшення, так і зменшення, залежно від умов експлуатації [130].

У стандарті [131], впровадженому в США, вже встановлено вимоги до систем ідентифікації закінчення терміну служби виробу. Згідно з пунктом 1910.134(b) цього стандарту, визначено наступне: індикатор закінчення терміну служби (ESLI) – це система, яка попереджає користувача респіратора про наближення завершення належного захисту органів дихання, наприклад, у разі наближення насичення сорбенту або втрати його ефективності.

Захист від газів і парів забезпечується респіратором, обладнаним сертифікованим NIOSH індикатором ESLI, відповідним для конкретного типу забруднень. Якщо ESLI відсутній, роботодавець зобов'язаний впровадити графік заміни фільтрів, заснований на об'єктивних даних, які гарантують їх заміну до завершення терміну служби. У програмі використання респіраторів роботодавець повинен зазначити інформацію та дані, які були використані для розробки графіка заміни фільтрів, а також обґрунтування достовірності цих даних.

Стандарт ДСТУ EN 529:2006 [132] зазначає, що встановити універсальне правило для визначення безпечної тривалості використання протигазових фільтрів доволі складно. Користувачі повинні отримувати максимально детальну інформацію про забруднюючі речовини в повітрі робочої зони, їх ймовірні концентрації, рівні вологості та температури, а також про інтенсивність виконуваної роботи. Враховуючи ці дані, працівники мають дотримуватись рекомендацій виробника щодо ймовірної тривалості використання фільтрів.

Підходи до визначення часу захисної дії фільтрів можна узагальнити та класифікувати за такими напрямками [133]:

Заміна фільтрів за збільшенням їх маси базується на теоретичному припущенні, що маса активної речовини, такої як активоване вугілля, залишається сталою, оскільки об'єм корпусу фільтра незмінний, а активоване вугілля не висипається. Отже, зростання маси фільтра можливе лише внаслідок накопичення шкідливих газів під час їх сорбції. Для контролю фільтр періодично зважують, і за фактом збільшення його маси приймається рішення щодо можливості подальшого використання.

Недоліком цього методу є неможливість врахування впливу вологості повітря та осідання пилу на корпусі фільтра чи гранулах активованого вугілля. Крім того, застосування цього підходу може бути рекомендоване лише виробником відповідної продукції.

Заміна фільтра при появі запаху в підмасковому просторі є одним із найпоширеніших методів на підприємствах України. Цей підхід базується на тому, що під час фільтрації активоване вугілля поступово насичується шкідливими речовинами, втрачаючи свої поглинальні властивості. У результаті кількість неочищеного повітря, яке проходить через фільтр до органів дихання, починає збільшуватись.

Коли користувач починає відчувати запах шкідливої речовини, а в деяких випадках також присмак або подразнення дихальних шляхів (першіння в горлі, набряклість), це є сигналом для негайного залишення небезпечної зони. У таких ситуаціях необхідно замінити фільтр на новий.

Заміна фільтрів за визначеним графіком можлива за умови, що на робочих місцях регулярно (щозміни) контролюється склад атмосфери, концентрація шкідливих речовин залишається стабільною протягом зміни, всі шкідливі речовини ідентифіковані, і нові не з'являються. У такій ситуації відповідальні за безпеку та гігієну праці можуть розрахувати орієнтовний час використання протигазових фільтрів і скласти відповідний графік їх заміни.

Лабораторні випробування фільтрів є ефективним методом оцінки їх якості та визначення тривалості захисної дії. Випробування можуть проводитись для встановлення загального або залишкового часу захисної дії.

Перший підхід передбачає, що лабораторія, з якою співпрацює підприємство, імітує робочі умови використання фільтрів. Для цього створюється суміш шкідливих газів та повітря, яку пропускають через фільтри, щоб визначити реальний час їх захисної дії в заданих умовах.

Другий підхід полягає у передачі до лабораторії зразків фільтрів, які вже використовуються на підприємстві. Завданням лабораторії є визначення залишкового часу захисної дії або прийняття рішення про необхідність їх заміни.

Розрахунок часу захисної дії за допомогою комп'ютерних програм. На сьогодні провідні світові виробники надають користувачам можливість використовувати власні програмні рішення для визначення часу захисної дії

протигазових фільтрів. Ці програми враховують концентрацію забруднювальних речовин у повітрі, бажану пропускну концентрацію, температуру, тиск, вологість повітря, а також інтенсивність роботи. На основі введених даних програма пропонує оптимальні засоби індивідуального захисту з асортименту продукції конкретного виробника.

Основними перевагами такого підходу є зручність і доступність. Користувач може швидко вибрати протигазовий фільтр необхідного класу захисту в будь-який час за умови доступу до мережі Інтернет. Крім того, бази даних програм регулярно оновлюються, а алгоритми обробки даних удосконалюються, що підвищує точність рекомендацій.

Проте цей підхід має і недоліки. Зокрема, програми не дають інформації про те, коли саме слід замінювати використаний фільтр. Також вони не враховують можливості використання фільтрів інших виробників, обмежуючи вибір лише продукцією конкретної компанії. Крім того, різні програми мають свої особливості та функціональні відмінності, що може спричинити труднощі для користувачів під час введення даних.

Тож, визначення часу захисної дії протигазових фільтрів є важливим заходом із запобігання негативних наслідків для користувачів. Існує велика кількість методів з визначення часу захисної дії, які можна поділити на дві категорії – організаційно-наукові та технічні. Найбільш перспективними та ефективними являються використання фільтрів з індикаторами та розрахунок часу захисної дії за допомогою спеціальним програм.

Висновки до розділу 1. Постановка задач дослідження

Проведений аналіз з підходів проектування та шляхів підвищення ізолювальних властивостей ЗІЗОД, а також розрахунку часу захисної дії фільтрів дозволяє зробити підсумок, щодо необхідності проведення:

- дослідження геометричних параметрів коробок пилогазозахисних фільтрів з метою встановлення залежностей процесу руху повітряних мас та фільтрації шкідливих речовин через фільтр в залежності від його конструктивних особливостей, що дозволить проектувати фільтри з оптимальними параметрами;

- побудови цифрових моделей пилогазозахисних фільтрів із заданими параметрами з метою прогнозування руху повітряних мас, що дозволить вдосконалити теоретичні основи фільтрації шкідливих речовин.

Зауважуючи, що з кожним роком підвищуються вимоги до захисту працівників, а також конкурентну боротьбу між ведучими виробниками засобів індивідуального захисту органів дихання за ринки збуту, даний алгоритм необхідно постійно модернізувати і удосконалювати з метою скорочення часу виготовлення ЗІЗОД з підвищенням якості кінцевого продукту. Тому, при розробці фільтрувальних респіраторів важливо врахувати:

- параметри виробничого середовища (мікроклімат, якісний і кількісний склад небезпечних та шкідливих виробничих чинників, властивості сучасних матеріалів);

- режими використання (тривалість, циклічність, періодичність), важкість і напруженість діяльності працівників з мінімізацією додаткових ризиків, пов'язаних з електризацією і перегріванням працівників під час виконання трудових завдань;

- взаємозв'язки між структурними елементами ЗІЗОД для забезпечення функціональної їх цілісності;

- оптимізаційні моделі ЗІЗОД за критеріями захисту, надійності та ергономічності з урахуванням вимог нормативних документів, що дає змогу подолати проблеми, які раніше не було вирішено.

Аналізуючи сучасні тенденції можна прогнозувати, що покращення алгоритму розробки ЗІЗОД буде відбуватись в сфері пошуку нових ефективних методів з:

- швидкої обробки статистичних даних антропометричних параметрів облич з метою побудови аутентичної цифрової моделі голови, яка б дозволяла враховувати у цифровому зображенні зміни рис обличчя працівників за віком, статтю і національністю;
- коректної побудови 3D поверхні півмаски, які б дозволяли враховувати зміни індивідуальних рис людини для виготовлення обтюратора півмаски;
- перевірки якості респіраторів, як на етапі розробки так і на етапі виготовлення проектного зразка, що дозволило б вносити корективи у побудовану модель для забезпечення високої якості кінцевого продукту;
- обрахунку часу захисної дії з урахуванням різних як кліматичних так і експлуатаційних параметрів, що вимагає пошуку новітніх фільтрувальних матеріалів з відповідною індикацією їх властивостей;
- теоретичного розрахунку захисної ефективності респіраторів, що дозволяє на етапі проектування провести оцінювання захисних властивостей респіраторів з урахуванням як функціональних, так і експлуатаційних параметрів.

Зважаючи на проведений аналіз сформовано мету дисертаційного дослідження, яка полягає у встановленні теоретичних основ фільтрації речовин, що відбувається в конструктивних елементах респіраторів з подальшою розробкою моделі універсального моторового фільтрувального респіратора.

Для її досягнення необхідно вирішити наступні завдання:

- встановити залежності та сформулювати теоретичні моделі зокрема конструктивних елементів, визначення часу захисної дії, фільтрації забрудненого повітря через протигазовий фільтр та дії зовнішніх факторів, що впливають на процес фільтрації, які будуть покладені в розробку універсального респіратора;
- дослідити конструктивні елементи комплексних засобів індивідуального захисту органів дихання, що допоможе встановити

залежності впливу складових частин виробу на загальний принцип фільтрації та розробити рекомендації по вдосконаленню конструкцій комплексних респіраторів.

- базуючись на результатах досліджень розробити конструкцію універсального моторового фільтрувального респіратора, що може бути застосовним в промислових умовах та у випадках надзвичайних ситуацій;

- виконати оцінку ризиків, що можуть впливати на застосування моторових фільтрувальних респіраторів в умовах надзвичайних ситуацій та розробити рекомендації щодо правильного їх використання.

Результати досліджень представлені в даному розділі опубліковані в [9-26], [35-40], [45], [50], [60], [71], [91, 92], [110-112], [133]

Література до розділу 1

1. ДСТУ 4676:2006. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Засоби індивідуального захисту. Основні положення. Чинний від 2007-07-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 24 с.

2. PAPR Sundstrom SR 500. URL: <https://srsafety.com/en-US/product/sr-500-2> (дата звернення: 18.12.2024).

3. Drager PAPR Respirators. URL: https://www.draeger.com/en-us_us/Safety/PAPR (дата звернення: 18.12.2024).

4. 3M Versaflo TR-300+ Series PAPR Systems. URL: https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b5005486003/ (дата звернення: 18.12.2024).

5. 3M Jupiter Powered Air Turbo. URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1420267O/3m-jupiter-powered-pdf.pdf> (дата звернення: 18.12.2024).

6. Blaško P., Šolc M., Petřík J., Girmanová L., Blašková A. Application of the FMEA Tool in an Accredited Testing Laboratory in the Context of the ISO/IEC 17025:2017 Standard. Standards. 2023. Vol. 3(1). P. 57–69. URL: <https://doi.org/10.3390/standards3010006> (дата звернення: 18.12.2024).

7. ДСТУ EN 12941:2004. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом або капюшоном. Вимоги, випробовування, маркування. Чинний від 2006-01-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 47 с.

8. Patriarca R., Del Pinto G., Di Gravio G., Costantino F. FRAM for Systemic Accident Analysis: A Matrix Representation of Functional Resonance. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. 2018. Vol. 25(1). Art. 1850001. URL: <https://doi.org/10.1142/S0218539318500018> (дата звернення: 18.12.2024).

9. Cheberyachko S., Yavors'ka O., Stolbchenko O., Radchuk D. Protective Efficiency of Filtering Respirators. *Advanced Engineering Forum*. 2017. Vol. 25. P. 88–96. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.25.88> (дата звернення: 18.12.2024).

10. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Денисова С. А., Гордєєва Л. І., Наумов М. М. Підвищення якості оцінки захисної ефективності протипилових засобів індивідуального захисту органів дихання. *Метрологія та прилади*. 2013. № 5. С. 61–65.

11. Яворська О. О., Чеберячко С. І., Радчук Д. І. Визначення розмірів вибірки для проведення лабораторних випробувань фільтрувальних півмасок. *Метрологія та прилади*. 2015. № 3. С. 24–29.

12. Чеберячко С. І., Радчук Д. І. До питання підвищення якості випробування протипилових респіраторів. *Метрологія та прилади*. 2014. № 1. С. 66–71.

13. Cheberyachko S., Cheberyachko Yu., Radchuk D., Deryugin O., Nesterova O. Improvement of the procedure of new filter masks development. *MATEC Web Conf.* 2020. Vol. 305. 00038. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202030500038> (дата звернення: 17.10.2024).

14. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М. Оцінка надійності протипилових респіраторів. *Геотехнічна механіка*. 2013. Вип. 112.

С. 72–82. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/87389> (дата звернення: 17.10.2024).

15. Cheberiachko S., Yavors'ka O., Radchuk D., Yavorskyi A. Respiratory Protection Provided by Negative Pressure Half Mask Filtering Respirators in Coal Mines. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 232–240. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.232> (дата звернення: 17.10.2024).

16. Bazaluk O., Tsopa V., Cheberiachko S., Deryugin O., Radchuk D., Borovytskyi O., Lozynskyi V. Ergonomic risk management process for safety and health at work. *Frontiers in Public Health*. 2023. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1253141> (дата звернення: 17.10.2024).

17. Чеберячко С. І., Радчук Д. І. Ергономічна оцінка респіраторів. *Геотехнічна механіка*. 2012. Вип. 107. С. 51–57. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/54389> (дата звернення: 17.10.2024).

18. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І. Методика підбору випробувачів дослідження фільтрувальних респіраторів. *Метрологія та прилади*. 2016. № 2. С. 36–40.

19. Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності конструкцій фільтрувальних коробок. *Наукові вісті НТУ “Київський політехнічний інститут”*. 2017. № 2. С. 114–118. URL: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551> (дата звернення: 17.10.2024).

20. Чеберячко С. І., Столбченко О. В., Радчук Д. І., Зіборова М. О. До способу розробки ергономічних фільтрувальних півмасок. *Геотехнічна механіка*. 2017. Вип. 134. С. 67–75. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000887013> (дата звернення: 17.10.2024).

21. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Сушко Н. С., Кравченко Б. Д. Розробка нової класифікації засобів індивідуального захисту органів дихання. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету*. 2022. Вип. 45. С. 109–119. URL: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022> (дата звернення: 17.10.2024).

22. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Клімов Д. Г., Шароватова О. П., Грідяєв В. В. Засоби індивідуального захисту органів дихання: Інновації щодо зниження ризику професійних захворювань. Комунальне господарство міст. 2023. Т. 1, Вип. 175. С. 221–228. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-221-228> (дата звернення: 17.10.2024).

23. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Шароватова О. П., Луценко Т. О. Вплив фільтрувальних респіраторів на розбірливість мовлення. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. Вип. 3(36). С. 219–232. URL: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-17> (дата звернення: 17.10.2024).

24. Cheberiachko S. I., Cheberyacko Yu. I., Yavors'ka O. A., Radchuk D. I. Study of the Efficiency of Dust Filters in Terms of Coal Mines. Mechanics, Materials Science & Engineering. 2017. Vol. 10. P. 218–228. URL: <https://issuu.com/mmsejournal/docs/mmse-journal-vol-10-2017> (дата звернення: 17.10.2024).

25. Яворська О. О., Радчук Д. І., Яворський А. В., Лантух Д. О., Сосулев Є. І. Вплив пандемії COVID-19 на безпекову стійкість підприємств. Науковий вісник ДонНТУ. 2022. № 1(8)–2(9). С. 228–238. URL: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-228-238](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-228-238) (дата звернення: 17.10.2024).

26. Cheberyachko S. I., Radchuk D. I., Cheberyachko Y. I., Ziborova M. O. On Development of a New Filtering Half-Mask. Mechanics, Materials Science & Engineering. 2016. Vol. 4. P. 164–170. URL: https://issuu.com/mmsejournal/docs/mmse_journal_vol4 (дата звернення: 17.10.2024).

27. Jiao G. Y., Newhart J. W. Bench study on active exhalation valve performance. Respir Care. 2008. Vol. 53(12). P. 1697–1702. PMID: 19025705. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19025705/> (дата звернення: 17.10.2024).

28. Bellin P., Hinds W. C. Aerosol penetration through respirator exhalation valves. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1990. Vol. 51(10). P. 555–560. URL: <https://doi.org/10.1080/15298669091370095> (дата звернення: 17.10.2024).

29. Zhuang E., Thurman P., Chen H., McDiarmid M., Hines S. Physiological Impacts of Surgical Mask Coverage of Elastomeric Half-mask Respirator Exhalation Valves in Healthcare Workers. *Annals of Work Exposures and Health.* 2021. Vol. 66. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/annweh/wxab069> (дата звернення: 17.10.2024).

30. Snyder E. M., McKay R. T. An evaluation of irritant smoke to detect exhalation valve leakage in respirators. *Appl Occup Environ Hyg.* 2003. Vol. 18(9). P. 702–707. URL: <https://doi.org/10.1080/10473220301382> (дата звернення: 17.10.2024).

31. Delaney L. J., McKay R. T., Freeman A. Determination of known exhalation valve damage using a negative pressure user seal check method on full facepiece respirators. *Appl Occup Environ Hyg.* 2003. Vol. 18(4). P. 237–243. URL: <https://doi.org/10.1080/10473220301399> (дата звернення: 17.10.2024).

32. McKay R. T., Davies E. Capability of respirator wearers to detect aerosolized qualitative fit test agents (sweetener and Bitrex) with known fixed leaks. *Appl Occup Environ Hyg.* 2000. Vol. 15(6). P. 479–484. URL: <https://doi.org/10.1080/104732200301269> (дата звернення: 17.10.2024).

33. Sri L. H. K., Prashant S. N95 Mask with Exhalation Valve: Reporting of One Safety Issue. *AANA J.* 2021. Vol. 89(5). P. 379. PMID: 34586987. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34586987/> (дата звернення: 17.10.2024).

34. Ippolito M., Iozzo P., Gregoretti C., Grasselli G., Cortegiani A. Facepiece filtering respirators with exhalation valve should not be used in the community to limit SARS-CoV-2 diffusion. *Infect Control Hosp Epidemiol.* 2021. Vol. 42(3). P. 369–370. URL: <https://doi.org/10.1017/ice.2020.244> (дата звернення: 17.10.2024).

35. Голинько В. И., Чеберячко Ю. И., Чеберячко С. И., Радчук Д. И. Improving the protective efficiency of elastomeric filter respirators. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 2(6(74)). С. 60–64. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.41210> (дата звернення: 17.10.2024).

36. Holinko V., Cheberiachko S., Yavorska O., Radchuk D. Study of protective properties of half-masks respirators used by miners. Mining of Mineral Deposits. 2016. Vol. 10(4). P. 29–36. URL: <https://doi.org/10.15407/mining10.04.029> (дата звернення: 17.10.2024).

37. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Столбченко О. В., Клімов Д. Г. Дослідження ізоляційних властивостей півмаски респіратора. Геотехнічна механіка. 2019. Вип. 149. С. 223–232. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001103613> (дата звернення: 17.10.2024).

38. Долгова Т. І., Чеберячко С. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності роботи клапанів видиху фільтрувальних півмасок. Геотехнічна механіка. 2014. Вип. 115. С. 199–208. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000167955> (дата звернення: 17.10.2024).

39. Колесник В. Є., Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Нестерова О. Ю. Експериментальна перевірка ізолювальних властивостей легких протипилових півмасок. Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия безопасность жизнедеятельности. 2018. Вип. 105. С. 166–173.

40. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В. Розрахунок коефіцієнта захисту фільтрувального респіратору з врахуванням підсосів по смузі обтюрації. Вісті Донецького гірничого інституту. 2020. № 1(46). С. 232–239. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-232-239> (дата звернення: 17.10.2024).

41. He G., Liang Y., Li Y., Wu M., Sun L., Xie C., Li F. A method for simulating the entire leaking process and calculating the liquid leakage volume of a damaged pressurized pipeline. J Hazard Mater. 2017. Vol. 332. P. 19–32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.039> (дата звернення: 17.10.2024).

42. Crutchfield C. D., Fairbank E. O., Greenstein S. L. Effect of test exercises and mask donning on measured respirator fit. Appl Occup Environ Hyg.

1999. Vol. 14(12). P. 827–837. URL: <https://doi.org/10.1080/104732299302062> (дата звернення: 17.10.2024).

43. Bergman M. S., Zhuang Z., Xu S. S., Rengasamy S., Lawrence R. B., Boutin B., Harris J. R. Assessment of respirator fit capability test criteria for full-facepiece air-purifying respirators. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2019. Vol. 16(7). P. 489–497. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1609006> (дата звернення: 17.10.2024).

44. McKay R. T. Respirator fit test methods — Are faster protocols equivalent to OSHA? *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2018. Vol. 15(7). P. D53–D57. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2018.1463098> (дата звернення: 17.10.2024).

45. 3M™ Versaflo™ TR-600 Series PAPR Systems. URL: https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b5005486002/ (дата звернення: 17.10.2024).

46. Honeywell North Primair PA7000. URL: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/his/en-gb/products/respiratory-protection/documents/sps-his-honeywell-north-primair-pa700-brochure-en.pdf> (дата звернення: 17.10.2024).

47. Scott Safety Duraflow SRS. URL: <https://www.frontline-safety.co.uk/scott-safety-duraflow-powered-air-respirator-unit> (дата звернення: 17.10.2024).

48. He X., Reponen T., McKay R. T., Grinshpun S. A. Effect of Particle Size on the Performance of an N95 Filtering Facepiece Respirator and a Surgical Mask at Various Breathing Conditions. *Aerosol Sci. Technol.* 2013. Vol. 47(11). P. 1180–1187. URL: <https://doi.org/10.1080/02786826.2013.829209> (дата звернення: 17.10.2024).

49. Gao S., Kim J., Yermakov M., Elmashae Y., He X., Reponen T., Grinshpun S. A. Penetration of Combustion Aerosol Particles Through Filters of NIOSH-Certified Filtering Facepiece Respirators (FFRs). *J Occup Environ Hyg.* 2015. Vol. 12(10). P. 678–685. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1043057> (дата звернення: 17.10.2024).

50. Drewnick F., Pikmann J., Fachinger F., Moormann L., Sprang F., Borrmann S. Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks. *Aerosol Sci. Technol.* 2020. Vol. 55(1). P. 63–79. URL: <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1817846> (дата звернення: 17.10.2024).

51. Laengert S. E., Kwon Y. J., Corbin J. C., Sipkens T. A., Morkus P., LaRue R. J., Latulippe D. R., Clase C. M., De Lannoy C.-F. Aerosol charge neutralization and its impact on particle filtration efficiency of common face mask materials. *Journal of Aerosol Science*. 2023. Vol. 173. Art. 106189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106189> (дата звернення: 17.10.2024).

52. Radchuk D., Cheberiachko S., Deryugin O., Sharovatova O. The Study of the Mechanical Strength of Polypropylene Filter Material for the Production of Disposable Respirators. *Solid State Phenomena*. 2024. Vol. 364. P. 89–100. URL: <https://doi.org/10.4028/p-c3LL1b> (дата звернення: 17.10.2024).

53. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Фрундін В. Ю. Експериментальні дослідження впливу вологості повітря на захисні властивості електретних фільтрів. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2016. № 96. С. 59–66.

54. Yao B., Wang Y., Ye X., Zhang F., Peng Y. Impact of structural features on dynamic breathing resistance of healthcare face mask. *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 689. P. 743–753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.463> (дата звернення: 17.10.2024).

55. MacIntyre C. R., Chughtai A. A. A rapid systematic review of the efficacy of face masks and respirators against coronaviruses and other respiratory transmissible viruses for the community, healthcare workers and sick patients. *Int. J. Nurs. Stud.* 2020. Vol. 108. Art. 103629. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2020.103629> (дата звернення: 17.10.2024).

56. O'Dowd K., Nair K. M., Forouzandeh P., Mathew S., Grant J. J., Moran R., Bartlett J., Bird J., Pillai S. C. Face Masks and Respirators in the Fight Against

the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials. *Materials*. 2020. Vol. 13. Art. 3363. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13153363> (дата звернення: 17.10.2024).

57. Schilling K., Gentner D. R., Wilen L. та ін. An accessible method for screening aerosol filtration identifies poor-performing commercial masks and respirators. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2021. Vol. 31. P. 943–952. URL: <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0258-7> (дата звернення: 17.10.2024).

58. Junninen H., March N. M. F., Vana M. та ін. Particle Filtration Efficiency, Breathability, and Reusability of Common Masks. *Aerosol Air Qual. Res.* 2024. Vol. 24. Art. 240021. URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.240021> (дата звернення: 17.10.2024).

59. STERLITECH. Glass fiber filters. URL: <https://www.sterlitech.com/glass-fiber-filter.html> (дата звернення: 17.10.2024).

60. DORSAN. Glass microfiber filter paper. URL: <https://www.dorsanfiltration.com/en/filtration-solutions/glass-microfibre-filter-paper/> (дата звернення: 17.10.2024).

61. Hollingsworth & Vose. Meltblown. URL: <https://www.hollingsworth-vose.com/products/filtration-solutions/meltblown/> (дата звернення: 17.10.2024).

62. NOWOMELT. Filter media for protective masks. URL: <https://www.nowomelt.info/en/filter-media-for-protective-masks.html> (дата звернення: 17.10.2024).

63. SYNERGEX ONE. New filter media for general face masks. URL: <https://synergexone.com/> (дата звернення: 17.10.2024).

64. Xuzheng J., Jianying H., Lin T., Shuhui L., Xiao L., Weilong C., Zhong C., Yuekun L. Advances in particulate matter filtration: Materials, performance, and application. *Green Energy & Environment*. 2023. Vol. 8(3). P. 673–697. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.03.012> (дата звернення: 17.10.2024).

65. Zhang R., Liu C., Hsu P.-C., Zhang C., Liu N., Zhang J., Lee H. R., Lu Y., Qiu Y., Cui Y. Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM_{2.5} removal from the pollution sources. *Nano Lett*. 2016. Vol. 16(6). P. 3642–

3649. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00771> (дата звернення: 17.10.2024).

66. Rajak A., Hapidin D. A., Iskandar F., Munir M. M., Khairurrijal K. Electrospun nanofiber from various source of expanded polystyrene (EPS) waste and their characterization as potential air filter media. *Waste Management*. 2020. Vol. 103. P. 76–86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.017> (дата звернення: 17.10.2024).

67. Liu C., Wang L., Tang Y., Luo S., Liu Y., Zhang S., Zeng Y., Xu Y. Vertical single or few-layer MoS₂ nanosheets rooting into TiO₂ nanofibers for highly efficient photocatalytic hydrogen evolution. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015. Vol. 164. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.08.046> (дата звернення: 17.10.2024).

68. Zhang Q., Li Q., Young T. M., Harper D. P., Wang S. A novel method for fabrication an electrospun poly(vinyl alcohol)/cellulose nanocrystals composite nanofibrous filter with low air resistance for high-efficiency filtration of particulate matter. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019. Vol. 7(9). P. 8706–8714. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00605> (дата звернення: 17.10.2024).

69. Lu S., Li C., Liu R., Lv A. PVP-Assisted Shellac Nanofiber Membrane as Highly Efficient, Eco-Friendly, Translucent Air Filter. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(23). Art. 11094. URL: <https://doi.org/10.3390/app112311094> (дата звернення: 17.10.2024).

70. Fan Q., Liang W., Fan T.-T., Li X., Yan S.-Y., Yu M., Ning X., Long Y.-Z. Polyvinylidene fluoride composite nanofibrous filter for high-efficiency PM_{2.5} capture. *Composites Communications*. 2020. Vol. 22. Art. 100533. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100533> (дата звернення: 17.10.2024).

71. Фрундін В. Ю., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності протипилових фільтрів для умов вугільних шахт. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. № 49. С. 285–296. URL: <http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/10-2015-rik> (дата звернення: 17.10.2024).

72. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Пустовой Д. С. Експериментальне дослідження пиломісткості фільтрувальних матеріалів для протипилових респіраторів. Проблеми охорони праці в Україні. 2020. Вип. 36(1). С. 12–17. URL: <https://doi.org/10.36804/nndipbor.36-1.2020.12-17> (дата звернення: 17.10.2024).

73. Радчук Д. І. Улучшение защитных характеристик легких фильтрующих полумасок. Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия безопасность жизнедеятельности. 2015. Вып. 83. С. 165–170.

74. Plebani C., Listrani S., Tranfo G., Tombolini F. Variation in penetration of submicrometric particles through electrostatic filtering facepieces during exposure to paraffin oil aerosol. J Occup Environ Hyg. 2012. Vol. 9(9). P. 556–561. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.709433> (дата звернення: 17.10.2024).

75. Karki S., Hazarika G., Yadav D., Ingole P. G. Polymeric membranes for industrial applications: Recent progress, challenges and perspectives. Desalination. 2024. Vol. 573. Art. 117200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117200> (дата звернення: 17.10.2024).

76. Beloshenko V. A., Plavan V. P., Rezanova N. M. та ін. Production of high-performance multi-layer fine-fibrous filter material by application of material extrusion-based additive manufacturing. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 101. P. 2681–2688. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3152-x> (дата звернення: 17.10.2024).

77. Noraini N. M. R., Zainol M. M., Alias A. B. та ін. Activated carbon for gas adsorption and its application in gas mask respirator filters: a review. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06188-1> (дата звернення: 17.10.2024).

78. Еннан А. А.-А., Хома Р.В., Длубовський Р. М., Захаренко Ю. С., Беньковська Т., Книш І. М. Моно- та біфункціональні імпрегновані волокнисті хемосорбенти респіраторного призначення. Вісник Одеського

національного університету. Хімія. 2022. Вип. 27, № 1(81). С. 5–30. URL: [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1\(81\).248297](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1(81).248297) (дата звернення: 17.10.2024).

79. Yoon Y. H., Nelson J. H. Application of Gas Adsorption Kinetics — II. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life and Its Practical Applications. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1984. Vol. 45(8). P. 517–524. URL: <https://doi.org/10.1080/15298668491400205> (дата звернення: 17.10.2024).

80. Linders M. J. G. Adsorption Processes in Gas Mask Filter Canisters: Practical Aspects, New Materials and Modeling. In: Mota J.P., Lyubchik S. (eds) *Recent Advances in Adsorption Processes for Environmental Protection and Security*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. 2008. Dordrecht : Springer. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6805-8_14 (дата звернення: 17.10.2024).

81. Ricci E., Minelli M., De Angelis M. G. Modelling Sorption and Transport of Gases in Polymeric Membranes across Different Scales: A Review. *Membranes*. 2022. Vol. 12(9). Art. 857. URL: <https://doi.org/10.3390/membranes12090857> (дата звернення: 17.10.2024).

82. Zbair M., Bennici S. Survey Summary on Salts Hydrates and Composites Used in Thermochemical Sorption Heat Storage: A Review. *Energies*. 2021. Vol. 14(11). Art. 3105. URL: <https://doi.org/10.3390/en14113105> (дата звернення: 17.10.2024).

83. Rahman Md. M., Shafiullah A. Z., Rupa M. J., Karmaker S. C., Hosan S., Pal A., Saha B. B. Selecting an optimum kinetic model for gas–solid adsorption based on statistical approaches and a model selection criterion. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 229. Art. 120581. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120581> (дата звернення: 17.10.2024).

84. Wu B., Zhou B., Liu Z., Li L., Zhou K., Wang Z., Shan Y., Feng W., Shao Z., Xue H., Wang Z. Adsorption characteristics of used granular activated

carbon regenerated by ultrasonic backwashing. *Arabian Journal of Chemistry*. 2024. Vol. 17(4). Art. 105704. URL: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105704> (дата звернення: 17.10.2024).

85. Ahmed A. S., Alsultan M., Sabah A. A., Swiegers G. F. Carbon Dioxide Adsorption by a High-Surface-Area Activated Charcoal. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7(5). P. 179. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs7050179> (дата звернення: 17.10.2024).

86. Wang X., Cheng H., Ye G., Fan J., Yao F., Wang Y., Jiao Y., Zhu W., Huang H., Ye D. Key factors and primary modification methods of activated carbon and their application in adsorption of carbon-based gases: A review. *Chemosphere*. 2022. Vol. 287(2). Art. 131995. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131995> (дата звернення: 17.10.2024).

87. Sircar S., Golden T. C., Rao M. B. Activated carbon for gas separation and storage. *Carbon*. 1996. Vol. 34(1). P. 1–12. URL: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00128-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00128-X) (дата звернення: 17.10.2024).

88. Larasati A., Fowler G. D., Graham N. J. D. Chemical regeneration of granular activated carbon: preliminary evaluation of alternative regenerant solution. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2020. Vol. 6. P. 2043–2056. URL: <https://doi.org/10.1039/D0EW00328J> (дата звернення: 17.10.2024).

89. Технічний регламент засобів індивідуального захисту : Постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 771. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 17.10.2024).

90. ДСТУ EN 14387:2021. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові та фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування. Чинний від 2022-08-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 24 с.

91. Cheberiachko S., Deryugin O., Mirnenko V., Borodina N. Selection of effective filter respirators. Challenges and opportunities. *Social Development and*

Security. 2020. Vol. 10(4). P. 23–41. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3> (дата звернення: 17.10.2024).

92. NIOSH Guide to the Selection and Use of Particulate Respirators. Cincinnati, OH : U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, 1996. DHHS (NIOSH) Publication No. 96-101. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/96-101/default.html> (дата звернення: 17.10.2024).

93. ДСТУ EN 529:2006. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, використання, догляду і обслуговування. Настанова. Чинний від 2007-10-01. Київ, 2008. 38 с.

94. Радчук Д. І., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В. Аналіз ефективності існуючих способів визначення часу захисної дії протигазових фільтрів. Науковий вісник ДонНТУ. 2023. № 2(11). С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-128-137> (дата звернення: 17.10.2024).

95. O'Dowd K., Nair K. M., Forouzandeh P., Mathew S., Grant J. J., Moran R., Bartlett J., Bird J., Pillai S. C. Face Masks and Respirators in the Fight Against the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials. Materials. 2020. Vol. 13. Art. 3363. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13153363> (дата звернення: 17.10.2024).

96. Schilling K., Gentner D. R., Wilen L. та ін. An accessible method for screening aerosol filtration identifies poor-performing commercial masks and respirators. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2021. Vol. 31. P. 943–952. URL: <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0258-7> (дата звернення: 17.10.2024).

97. Junninen H., March N. M. F., Vana M., Tamme K., Lipp H., Mirme S., Pikker S., Hussein T., Kulmala M. Particle Filtration Efficiency, Breathability, and Reusability of Common Masks. Aerosol and Air Quality Research. 2024. Vol. 24.

Art. 240021. URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.240021> (дата звернення: 17.10.2024).

98. STERLITECH. Glass fiber filters. URL: <https://www.sterlitech.com/glass-fiber-filter.html> (дата звернення: 17.10.2024).

99. DORSAN. Glass microfiber filter paper. URL: <https://www.dorsanfiltration.com/en/filtration-solutions/glass-microfibre-filter-paper/> (дата звернення: 17.10.2024).

100. Hollingsworth & Vose. Meltblown. URL: <https://www.hollingsworth-vose.com/products/filtration-solutions/meltblown/> (дата звернення: 17.10.2024).

101. NOWOMELT. Filter media for protective masks. URL: <https://www.nowomelt.info/en/filter-media-for-protective-masks.html> (дата звернення: 17.10.2024).

102. SYNERGEX ONE. New filter media for general face masks. URL: <https://synergexone.com/> (дата звернення: 17.10.2024).

103. Xuzheng J., Jianying H., Lin T., Shuhui L., Xiao L., Weilong C., Zhong C., Yuekun L. Advances in particulate matter filtration: Materials, performance, and application. *Green Energy & Environment*. 2023. Vol. 8(3). P. 673–697. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.03.012> (дата звернення: 17.10.2024).

104. Zhang R., Liu C., Hsu P.-C., Zhang C., Liu N., Zhang J., Lee H. R., Lu Y., Qiu Y., Cui Y. Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM_{2.5} removal from the pollution sources. *Nano Letters*. 2016. Vol. 16(6). P. 3642–3649. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00771> (дата звернення: 17.10.2024).

105. Rajak A., Hapidin D. A., Iskandar F., Munir M. M., Khairurrijal K. Electrospun nanofiber from various source of expanded polystyrene (EPS) waste and their characterization as potential air filter media. *Waste Management*. 2020. Vol. 103. P. 76–86. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.017> (дата звернення: 17.10.2024).

106. Liu C., Wang L., Tang Y., Luo S., Liu Y., Zhang S., Zeng Y., Xu Y. Vertical single or few-layer MoS₂ nanosheets rooting into TiO₂ nanofibers for

highly efficient photocatalytic hydrogen evolution. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015. Vol. 164. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.08.046> (дата звернення: 17.10.2024).

107. Zhang Q., Li Q., Young T. M., Harper D. P., Wang S. A novel method for fabrication an electrospun poly(vinyl alcohol)/cellulose nanocrystals composite nanofibrous filter with low air resistance for high-efficiency filtration of particulate matter. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7(9). P. 8706–8714. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00605> (дата звернення: 17.10.2024).

108. Lu S., Li C., Liu R., Lv A. PVP-Assisted Shellac Nanofiber Membrane as Highly Efficient, Eco-Friendly, Translucent Air Filter. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(23). Art. 11094. URL: <https://doi.org/10.3390/app112311094> (дата звернення: 17.10.2024).

109. Fan Q., Liang W., Fan T.-T., Li X., Yan S.-Y., Yu M., Ning X., Long Y.-Z. Polyvinylidene fluoride composite nanofibrous filter for high-efficiency PM_{2.5} capture. *Composites Communications*. 2020. Vol. 22. Art. 100533. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100533> (дата звернення: 17.10.2024).

110. Фрундін В. Ю., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності протипилових фільтрів для умов вугільних шахт. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. № 49. С. 285–296. URL: <http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/10-2015-rik> (дата звернення: 17.10.2024).

111. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Пустовой Д. С. Експериментальне дослідження пиломісткості фільтрувальних матеріалів для протипилових респіраторів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2020. Вип. 36(1). С. 12–17. URL: <https://doi.org/10.36804/nndipbor.36-1.2020.12-17> (дата звернення: 17.10.2024).

112. Радчук Д. І. Улучшение защитных характеристик легких фильтрующих полумасок. *Строительство, материаловедение,*

машиностроение. Серия безопасность жизнедеятельности. 2015. Вып. 83. С. 165–170.

113. Plebani C., Listrani S., Tranfo G., Tombolini F. Variation in penetration of submicrometric particles through electrostatic filtering facepieces during exposure to paraffin oil aerosol. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2012. Vol. 9(9). P. 556–561. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.709433> (дата звернення: 17.10.2024).

114. Karki S., Hazarika G., Yadav D., Ingole P. G. Polymeric membranes for industrial applications: Recent progress, challenges and perspectives. *Desalination*. 2024. Vol. 573. Art. 117200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117200> (дата звернення: 17.10.2024).

115. Beloshenko V. A., Plavan V. P., Rezanova N. M. та ін. Production of high-performance multi-layer fine-fibrous filter material by application of material extrusion-based additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 2681–2688. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3152-x> (дата звернення: 17.10.2024).

116. Noraini N. M. R., Zainol M. M., Alias A. B. та ін. Activated carbon for gas adsorption and its application in gas mask respirator filters: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06188-1> (дата звернення: 17.10.2024).

117. Еннан А. А.-А., Хома Р., Длубовський Р. М., Захаренко Ю. С., Беньковська Т., Книш І. М. Моно- та біфункціональні імпрегновані волокнисті хемосорбенти респіраторного призначення. *Вісник Одеського національного університету. Хімія*. 2022. Вип. 27, № 1(81). С. 5–30. URL: [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1\(81\).248297](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1(81).248297) (дата звернення: 17.10.2024).

118. Yoon Y. H., Nelson J. H. Application of Gas Adsorption Kinetics — II. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life and Its Practical Applications. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1984. Vol. 45(8).

P. 517–524. URL: <https://doi.org/10.1080/15298668491400205> (дата звернення: 17.10.2024).

119. Linders M. J. G. Adsorption Processes in Gas Mask Filter Canisters: Practical Aspects, New Materials and Modeling. In: Mota J. P., Lyubchik S. (eds) Recent Advances in Adsorption Processes for Environmental Protection and Security. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Dordrecht : Springer, 2008. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6805-8_14 (дата звернення: 17.10.2024).

120. Ricci E., Minelli M., De Angelis M. G. Modelling Sorption and Transport of Gases in Polymeric Membranes across Different Scales: A Review. *Membranes*. 2022. Vol. 12(9). Art. 857. URL: <https://doi.org/10.3390/membranes12090857> (дата звернення: 17.10.2024).

121. Zbair M., Bennici S. Survey Summary on Salts Hydrates and Composites Used in Thermochemical Sorption Heat Storage: A Review. *Energies*. 2021. Vol. 14(11). Art. 3105. URL: <https://doi.org/10.3390/en14113105> (дата звернення: 17.10.2024).

122. Rahman Md. M., Shafiullah A. Z., Rupa M. J., Karmaker S. C., Hosan S., Pal A., Saha B. B. Selecting an optimum kinetic model for gas–solid adsorption based on statistical approaches and a model selection criterion. *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 229. Art. 120581. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120581> (дата звернення: 17.10.2024).

123. Wu B., Zhou B., Liu Z., Li L., Zhou K., Wang Z., Shan Y., Feng W., Shao Z., Xue H., Wang Z. Adsorption characteristics of used granular activated carbon regenerated by ultrasonic backwashing. *Arabian Journal of Chemistry*. 2024. Vol. 17(4). Art. 105704. URL: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105704> (дата звернення: 17.10.2024).

124. Ahmed A. S., Alsultan M., Sabah A. A., Swiegers G. F. Carbon Dioxide Adsorption by a High-Surface-Area Activated Charcoal. *Journal of*

Composites Science. 2023. Vol. 7(5). P. 179. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs7050179> (дата звернення: 17.10.2024).

125. Wang X., Cheng H., Ye G., Fan J., Yao F., Wang Y., Jiao Y., Zhu W., Huang H., Ye D. Key factors and primary modification methods of activated carbon and their application in adsorption of carbon-based gases: A review. Chemosphere. 2022. Vol. 287, Part 2. Art. 131995. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131995> (дата звернення: 17.10.2024).

126. Sircar S., Golden T. C., Rao M. B. Activated carbon for gas separation and storage. Carbon. 1996. Vol. 34(1). P. 1–12. URL: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00128-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00128-X) (дата звернення: 17.10.2024).

127. Larasati A., Fowler G. D., Graham N. J. D. Chemical regeneration of granular activated carbon: preliminary evaluation of alternative regenerant solution. Environmental Science: Water Research & Technology. 2020. Vol. 6. P. 2043–2056. URL: <https://doi.org/10.1039/D0EW00328J> (дата звернення: 17.10.2024).

128. Технічний регламент засобів індивідуального захисту : Постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 771. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 17.10.2024).

129. ДСТУ EN 14387:2021. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові та фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування. Чинний від 2022-08-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 24 с.

130. Cheberiachko S., Deryugin O., Mirnenko V., Borodina N. Selection of effective filter respirators. Challenges and opportunities. Social Development and Security. 2020. Vol. 10(4). P. 23–41. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3> (дата звернення: 17.10.2024).

131. NIOSH Guide to the Selection and Use of Particulate Respirators. Cincinnati, OH : U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety

and Health, 1996. DHHS (NIOSH) Publication No. 96-101. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/96-101/default.html> (дата звернення: 17.10.2024).

132. ДСТУ EN 529:2006. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, використання, догляду і обслуговування. Настанова. Чинний від 2007-10-01. Київ, 2008. 38 с.

133. Радчук Д. І., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В. Аналіз ефективності існуючих способів визначення часу захисної дії протигазових фільтрів. Науковий вісник ДонНТУ. 2023. № 2(11). С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-128-137> (дата звернення: 17.10.2024).

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЛИЦЕВОЇ ЧАСТИНИ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА

2.1 Удосконалення конструкції лицевої частини універсального респіратора

Для удосконалення дизайну захисного капюшону використовувався комплексний підхід, що поєднував наукові методи, інженерні принципи та сучасні технології [1-3]. Зокрема, статистичний аналіз антропометричних баз даних для збору та обробки даних щодо розмірів голови, обличчя, шиї різних груп населення (за віком, статтю, етнічною приналежністю). Це дозволяє визначити діапазони розмірів та форми капюшонів [1]. Також використовували комп'ютерне моделювання повітряних потоків, які здатні усунути застійні явища в підмасковому просторі, а також мінімізують опір повітряному потоку [2]. Для визначення необхідності чи доречності кожного елементу дизайну капюшона використовували принцип функціональності [3]. Він визначає, що будь-яка лінія або матеріал у дизайні капюшона будуть чітко обґрунтовані і сприятимуть досягненню основної мети – забезпеченню надійного захисту та комфорту користувача в конкретних виробничих умовах.

Для розробки дизайну застосовується спеціальне програмне забезпечення CAD-систем для точного проєктування форми капюшона, панорамного скла та його компонентів, що дозволяє здійснювати віртуальну перевірку коректності збирання та герметичності прилягання виробу [4].

Етапи розробки капюшона, як і будь-якого складного інженерного продукту, є циклічним процесом, який включає: дослідження, проєктування, тестування та вдосконалення. Хоча конкретні деталі можуть відрізнятися залежно від типу капюшона (саморятівник чи PAPR) та виробника, загальна послідовність етапів виглядає наступним чином [5]:

1. Визначення вимог до капюшонів на основі аналізу потреб замовника.
2. Визначення функціональних вимог: рівень захисту (коефіцієнт захисту), час захисної дії, діапазон температур експлуатації тощо.
3. Огляд відповідних національних та міжнародних стандартів (наприклад, EN 403, EN 12941, NIOSH), які визначають мінімальні вимоги до продуктивності та безпеки.
4. Розробка концептуальних ескізів на основі визначених концепцій форми капюшона, панорамного скла, системи кріплень та загальної архітектури.
5. Технічне проєктування (фаза дизайну): вибір матеріалів, створення детальних 3D-моделей усіх частин капюшона за допомогою програмного забезпечення для автоматизованого проєктування (CAD). Це дозволяє точно визначити розміри, форми, з'єднання.
6. Інженерні симуляції (CAE/CFD/FEA), CFD (Computational Fluid Dynamics) для моделювання потоків повітря всередині капюшона та оптимізації вентиляції, запобігання запотіванню панорамного скла та ефективного розподілу очищеного повітря.
7. Попередня перевірка, що складається з аналізу міцності матеріалів та конструкції, розподілу тиску на обличчя, деформацій під навантаженням.
8. Проєктування системи герметизації, розробка ущільнювальних елементів, які забезпечать щільне прилягання до обличчя/ший без надмірного тиску.
9. Інтеграція компонентів, проєктування місць кріплення та взаємодія з фільтрувальними елементами (для саморятівників), вентиляторним блоком та повітроводами (для PAPR).

До існуючого процесу розробки капюшонів на четвертому етапі розробки концептуальних ескізів, додаємо декілька нових елементів, які базуються на двох наукових принципах: антропометричної відповідності та аеродинамічної оптимізації.

Принцип антропометричної відповідності ґрунтується на засадах ергономіки, біоінженерії та антропометричного моделювання, відповідно до якого конструкція виробу повинна бути адаптована до геометричних та фізіологічних особливостей користувачів. У практичному втіленні, принцип передбачає використання точних антропометричних даних, отриманих шляхом 3D-сканування голів користувачів, для формування цифрової бази параметрів (окружність голови, довжина, ширина, контури щелепи тощо). На основі цієї бази розроблено параметричну матрицю розмірів, що дозволяє адаптувати капюшон до широкого спектра морфологічних типів з урахуванням комфортності прилягання, відсутності надмірного тиску та стабільної фіксації.

Принцип аеродинамічної оптимізації заснований на положеннях механіки рідини та комп'ютерного інженерного моделювання, цей принцип орієнтований на забезпечення контрольованої циркуляції повітря в межах внутрішнього об'єму капюшона.

Для забезпечення цих принципів до етапів розробки капюшона додаємо:

- дослідження фізіологічних реакцій; визначення антропометричних параметрів голів користувачів, за якими формується матриця розмірів;
- внесення змін до системи повітряних каналів для ефективного та тихого розподілу повітря, мінімізуючи «мертві зони» та забезпечуючи приємний обдув обличчя в середні капюшона.

Наявність матриці розмірів голів людей дозволяють формувати типорозміри капюшонів з урахуванням ергономічних, функціональних та естетичних вимог. Також дозволить забезпечити не тільки щільне прилягання та комфорт, а й мінімізацію мертвих зон із застійним повітрям.

Для розробки дизайну захисного капюшона пропонується визначення антропометричних параметрів користувачів згідно ISO/TS 16976-2 (рис. 2.1):

- 1) Округність голови **ОГ**, що визначає базовий розмір (діаметр) капюшону та вимірюється по горизонталі через лоб та потилицю;

- 2) Довжина голови **ДГ**, визначає вертикальний розмір капюшону та вимірюється від верхівки голови до нижньої точки підборіддя;
- 3) Ширина голови **ШГ**, визначає мінімальну ширину капюшону, яка не буде створювати дискомфорту користувачу та є максимальною горизонтальною шириною між боковими частинами черепа над вухами;
- 4) Ширина обличчя **ШО**, визначає розміри панорамного скла та вимірюється між виступами виличних кісток;
- 5) Довжина обличчя **ДО**, визначає розміри панорамного скла та вимірюється від межі волосся до нижньої точки підборіддя;
- 6) Довжина носу **ДН**, визначає мінімальну відстань від обличчя до панорамного скла та вимірюється від поверхні обличчя до кінчика носу;
- 7) Контур підборіддя та щелепи, визначає параметри та вигляд манжети в нижній частині капюшону.

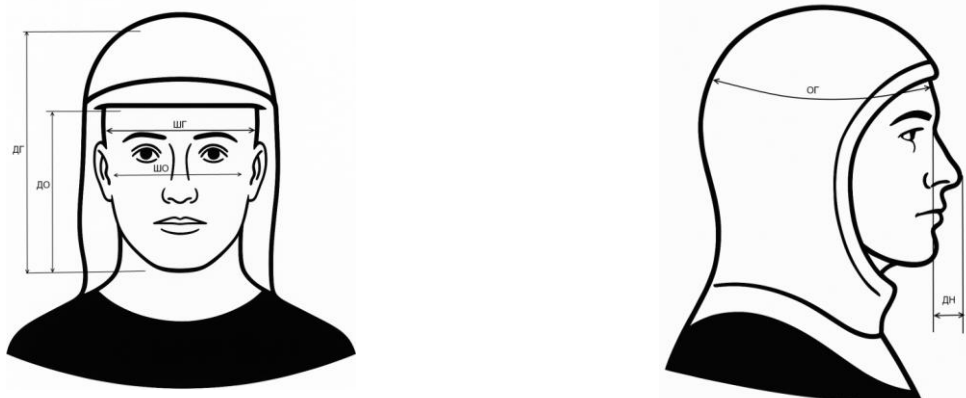


Рисунок 2.1 – Вимірювані параметри голови користувача

Геометричні параметри голів на площині визначали за допомогою ручного 3D-сканеру EinScan Pro 2X та через програмний продукт EXScan Pro. Дані зі сканера формувались в загальне зображення, а його характеристики в режимі ручного сканування з якістю HD: точність (до 0.05 мм), швидкість (до 20 кадрів/с), об'ємна точність (0,3 мм/м). Він є безпечним для очей та ефективним при взаємодії з м'якими тканинами, включаючи шкіру обличчя та волосся (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Вигляд відсканованого обличчя з вимірюваними параметрами

Для аналізу геометричних параметрів голів, отриманих шляхом 3D-сканування, використовувалася програма MeshLab [6], яка дозволяє працювати з трикутними сітками (mesh) та здійснювати базові геометричні вимірювання. Вихідні дані були отримані за допомогою ручного 3D-сканера EinScan Pro 2X, у результаті чого сформовано цифрові 3D-моделі у форматі .stl. Далі ці моделі було імпортовано до MeshLab для аналізу. У середовищі MeshLab здійснювалося вимірювання відстаней між характерними точками голови. Перед вимірюванням модель орієнтувалася у зручному положенні за допомогою навігаційних засобів програми (обертання, масштабування, панорамування). Для підвищення точності вибору контрольних точок застосовувалося масштабування зображення. Отримані значення експортувалися вручну до таблиці для подальшої статистичної обробки. Для визначення антропометричних розмірів голів у дослідженні брали участь 412 добровольців (210 чоловіків і 202 жінки) віком від 20 до 30 років з ряду здобувачів та викладачів НТУ «Дніпровська політехніка».

Для перевірки раціонального розподілу повітряних потоків в середині захисного капюшону проводили моделювання в програмному середовищі SolidWorks, зокрема в модулі SolidWorks Flow Simulation [7]. Було задано наступні параметри: вхід повітря від вентилятора 170-200 л/хв ($0.0028 - 0.0033 \text{ м}^3/\text{с}$); температура повітря 20°C ; automatic meshing (автоматичне розбиття сітки) складало 6 – 7 рівнів деталізації; позитивний тиск під капюшоном 20 Па. На основі результатів моделювання була визначена

рівномірність потоку повітря в захисному капюшоні, на основі коефіцієнту варіації швидкості CV :

$$CV = \sigma / V_{\text{місц}},$$

де σ - стандартне відхилення швидкості, м/с, $V_{\text{місц}}$ - середня швидкість у певній зоні, м/с (наприклад, на панорамному склі або в зоні дихання).

У межах дослідження визначалося співвідношення швидкісних показників: мінімального до максимального

$$\text{Ratio} = V_{\text{max}} / V_{\text{min}}$$

Крім того, розраховували час очищення/заміни повітря $t_{\text{оч}}$ з кроком 0,1 с., який порівнювався з розрахунковим за формулою:

$$t_{\text{оч}} \approx \text{Об'ємна витрата повітря } (Q_0) / \text{Об'єм капюшону } (V_{\text{заг.к}})$$

Ще одним показником, що вимірювався, був розподіл тиску в середні захисного капюшону. Вимірювання проводилися в 5 точках: біля панорамного скла, біля шиї (в області манжети, фронтальна частина), в верхній частині капюшону (ділянка чола), біля роту/носу, біля потилиці.

Для здійснення моніторингу величини тиску в середині капюшону використовували електронний мікроманометр Testo 512 з діапазоном від мінус 200 Па до 200 Па, з точністю 0,3 Па та частотою оновлення даних 1 с. Один штуцер для шлангів мікроманометра знаходився в навколишньому середовищі та був відкритий. А інший штуцер для шлангів мікроманометра через гнучкий шланг із зовнішнім діаметром 3 мм заводився до капюшону в контрольні точки. Тривалість перебування шлангу в контрольній точці становила не менше 5 секунд для стабілізації отримуваних даних, після чого протягом наступних 10 секунд здійснювалися вимірювання.

Для основної перевірки захисного капюшона проводились експлуатаційні випробування згідно EN 13274-2. Випробувачі виконували наступні вправи:

- випробування у стані спокою, без виконання будь-якої роботи, випробувач знаходиться сидячи у зручному положенні;
- ходьба по горизонтальній поверхні у повний зріст із постійною швидкістю 6 км/год. протягом 10 хв.;
- ходіння протягом 5 хв. по горизонтальній площині в приміщенні з габаритною висотою $(1,3 \pm 0,2)$ м;
- пересування протягом 5 хв. по горизонтальній площині в приміщенні з габаритною висотою $(0,7 \pm 0,05)$ м;
- заповнення невеликої корзини (об'ємом 8 дм^3) гумовою стружкою або іншим придатним матеріалом з бункера (висотою 1,5 м). Такі дії виконувалися 19 разів протягом 10 хв.

Для оцінювання було залучено 5 випробувачів (3 чоловіки та 2 жінки) віком від 25 до 50 років, які були розподілені за розмірами голів відповідно до класифікації (рис. 2.3): двоє – у 3-ю комірку, двоє – у 5-у комірку, один – 8-му комірку. Додатково, на стадії затвердження переліку випробувачів, що брали участь у тестуванні, проводилось їх опитування щодо стану здоров'я, нещодавнього медичного втручання або перенесених захворювань. У разі позитивного рішення, таких випробувачів рекомендували. Перед тестуванням випробувачів ознайомлювали з процедурою випробувань та навчали правилам користування капюшоном. Участь випробувачів в тестуванні була добровільною, про що вони підписали відповідний документ (погодження) на участь, за яким не мають претензій до організаторів.

Додатково проводилось опитування користувачів, щодо комфорту застосування захисного капюшону. Під час якого на кожне запитання суб'єктивно виставлялись бали від 1 до 5, де 1 – дуже погано, а 5 – дуже добре.

	мм		
195 - 209	6 25 чоловік	8 120 чоловік	9 18 чоловік
180 - 194	3 114 чоловік	5 74 чоловік	7 2 чоловік
165 - 179	1 55 чоловік	2 4 чоловік	4 0 чоловік
	531 - 570	571 - 610	611 - 648 мм

Рисунок 2.3 – Удосконалена параметрична таблиця з вказаною кількістю людей, які потрапили в певну комірку за відповідними типорозмірами

Під час опитування випробувачі оцінювали наступні показники:

- зручність головного гарнітура (ЗГГ);
- легкість знімання та надягання (ЛЗН);
- надійність кріплень (НК);
- чіткість і поле зору, охоплюючи запотівання (ЧПЗ);
- зберігання рівноваги під час використання апарата (РВА);
- розсіювання повітря та швидкість повітряного потоку (РШП).

Отримані дані переносились з паперових анкет в електронний документ, для обробки експериментальних даних використовувалась програма Microsoft Excel 365.

Результати експериментальних даних осереднювались з оцінкою невизначеності вимірювань при $P < 0.05$ відповідно до Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. - JCGM 100:2008 [8]. Обробка експериментальних даних та побудова апроксимаційних кривих здійснювалася в програмному продукті Microsoft Excel 365.

В таблиці 2.1 наведені осереднені результати вимірів основних антропометричних характеристик облич чоловіків і жінок, які необхідні для проєктування ряду моделей захисних капюшонів до моторових респіраторів. Визначені параметри голів, а саме окружності ОГ (від 531 мм до 648 мм) та

довжини ДГ (від 165 мм до 209 мм), які дозволили встановити основні розміри параметричної таблиці (рис. 2.3). Поле таблиці рівномірно поділене на дев'ять комірок за діапазоном антропометричних показників параметрів голів. Далі розраховувалась кількість людей, які потрапили в ту чи іншу комірку параметричної таблиці (табл. 2.2). Дані параметри є базовими для проєктування захисних капюшонів в розрізі діаметру та довжини виробу. Для визначення необхідних параметрів панорамного скла скористаємося наступними показниками: ширина обличчя ШО (від 126 мм до 165 мм) та довжина обличчя ДО (від 90 мм до 131 мм). Результати представлені у вигляді параметричної таблиці (рис. 2.3). Поле таблиці рівномірно поділене на дев'ять комірок за діапазоном антропометричних параметрів голів. Далі розраховували кількість людей, які потрапили в ту чи іншу комірку параметричної таблиці (табл. 2.2 та 2.3). Дані параметри є базовими для проєктування панорамного скла капюшона та враховують необхідну площу поля зору.

Таблиця 2.1 – Узагальнені результати вимірів розмірів облич, мм

Розмір	Чоловіки (210)	Жінки (202)	Всього (412)
Вік випробувачів, р	$22,5 \pm 2,3$	$22,6 \pm 1,7$	$22,5 \pm 2,0$
Окружність голови ОГ , мм	$590,2 \pm 15,0$	$556,6 \pm 13,5$	$573,9 \pm 21,3$
Довжина голови ДГ , мм	$195,6 \pm 7,0$	$183,9 \pm 7,8$	$189,9 \pm 9,4$
Довжина обличчя ДО , мм	$115,0 \pm 6,4$	$108,0 \pm 7,0$	$111,6 \pm 7,6$
Ширина голови ШГ , мм	$163,3 \pm 4,4$	$151,2 \pm 4,8$	$157,4 \pm 7,6$
Ширина обличчя ШО , мм	$154,5 \pm 4,4$	$142,0 \pm 4,9$	$148,4 \pm 7,8$
Довжина носу ДН , мм	$20,2 \pm 2,2$	$16,6 \pm 2,1$	$18,4 \pm 2,8$

Таблиця 2.2 – Розподіл антропометричних параметрів голів

№ комірки параметричної таблиці	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість випробувачів, які потрапили в комірку	55	4	114	0	74	25	2	120	18
Співвідношення до загальної кількості людей, залучених до випробування, %	13,3	1,0	27,6	0	18,0	6,1	0,5	29,1	4,4

Таблиця 2.3 – Розподіл антропометричних параметрів облич

№ комірки параметричної таблиці	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кількість випробувачів, які потрапили в комірку	20	31	28	2	186	0	71	42	32
Співвідношення до загальної кількості людей, залучених до випробування, %	4,9	7,5	6,8	0,5	45,1	0	17,2	10,2	7,8

2.2 Визначення характеристик конструктивних елементів капюшону

За результатами проведеного аналізу антропометричних параметрів, було сформовано два основних типорозміри капюшону для подальшого застосування користувачами з урахуванням допусків (± 5 мм по довжині голови та ± 10 мм по окружності) задля забезпечення комфортної посадки без надлишкового тиску. Перший типорозмір (М) – діаметр капюшону 185 мм, висота головної частини 220 мм. Даний розмір покриває 47 % випробувачів,

що були задіяні, з достовірністю отриманих результатів 95 %. Другий типорозмір (L) – діаметр капюшону 200 мм, висота головної частини 230 мм. Даний розмір покриває 48 % випробувачів, що були задіяні, з достовірністю отриманих результатів 95 % (рис. 2.4).

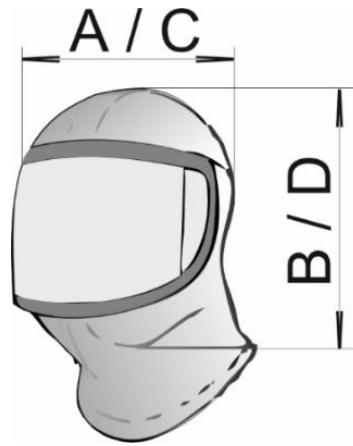


Рисунок 2.4 – Ескіз захисних капюшонів двох типів: захисний капюшон розмір M, параметр $A = 185$ мм, $B = 220$ мм; захисний капюшон розмір L, параметр $C = 200$ мм, $D = 230$ мм.

Мінімальні розміри панорамного скла становлять 130×165 мм. Вони визначені з урахуванням потреби забезпечення достатнього поля зору користувача під час виконання робіт в умовах обмеженої видимості (в умовах задимлення, запиленому середовищі, недостатньому освітленні) та антропометричних параметрів користувачів. Форма та розміри оглядового елемента були запозичені з конструкцій стандартних захисних щитків обличчя, що відповідають вимогам стандартів типу EN 166. Такий підхід гарантує достатній горизонтальний та вертикальний огляд.

Використання прозорого ударостійкого ПЕТ матеріалу із захисним покриттям проти подряпин і запотівання також сприяє підвищенню безпеки при роботі у потенційно небезпечному середовищі. Панорамне скло має легку кривизну для розширення поля зору без оптичних спотворень.

Для припасування капюшону до голови користувача в середині конструкції розміщуємо стандартний регульований обід із захисним головним гарнітуром (рис. 2.5), який зазвичай застосовується в моделях

каска за EN 397 та може бути використаним для голів з окружністю від 510 мм до 620 мм.

Конструкція капюшону передбачає можливість швидкого регулювання обода однією рукою без зняття ЗІЗ, що підвищує ергономічність використання у виробничих умовах. Згідно з ергономічними вимогами до ЗІЗ голови (EN 397, ISO 27528), регульовані обідки повинні забезпечувати комфортне носіння щонайменше протягом повної стандартної зміни (8-12 годин) без викликання точкового тиску, дискомфорту або порушення кровообігу. Тому дане технічне рішення забезпечує комфортне носіння капюшону протягом робочої зміни тривалістю до 12 годин без надмірного тиску на голову користувача.

Також у процесі проектування враховувався параметр довжини носа (ДН) користувача. З метою забезпечення анатомічної відповідності та уникнення тиску на зону перенісся і кінчик носу, фронтальна частина капюшону має конструктивне видовження. Воно забезпечується опорним каркасом, що міцно утримує панорамне скло в статичному положенні (рис. 2.6). Така особливість дозволяє зберігати оптимальну відстань між панорамним склом та обличчям користувача, що покращує комфортність при тривалому носінні, а також забезпечує достатній простір для розміщення додаткових елементів, наприклад окулярів для зору.



Рисунок 2.5 – Стандартний регульований обід з захисним головним гарнітуром

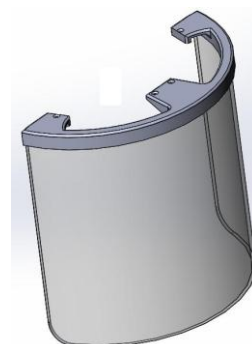


Рисунок 2.6 – Модель панорамного скла з опорним каркасом

Передбачається використання легких полімерних матеріалів з загальною поверхневою масою до 500 г/м^2 для зменшення навантаження на шийний відділ хребта.

Для забезпечення герметичності та комфортного прилягання капюшона в нижній частині конструкції пропонується встановити спеціальну манжету-юбку, яка охоплює ділянку шиї, плечей та верхньої частини грудної клітки. Цей елемент виконує функцію додаткового бар'єра, що перешкоджає потраплянню шкідливих речовин під капюшон, а також сприяє зручному поєднанню з іншим захисним одягом. У зоні шиї пропонується встановлення регулюючої еластичної зав'язки (ущільнюючий шнур із фіксатором), що дозволяє користувачеві, індивідуально налаштувати ступінь прилягання капюшона до тіла (рис. 2.7). Такий елемент конструкції забезпечує щільне та надійне прилягання в критично важливій зоні навколо шиї, не створюючи при цьому надмірного тиску або дискомфорту під час тривалого носіння. Індивідуальне затягування зав'язки дозволяє враховувати різницю в анатомічній будові шиї користувачів і забезпечує стабільну посадку капюшона навіть під час активних рухів.



Рисунок 2.7 – Модель манжети для шиї з регулюючою еластичною зав'язкою

У конструкції капюшону пропонується встановлення системи подачі та відведення повітря, що забезпечить підтримання комфортного мікроклімату всередині капюшону та буде запобігати накопиченню вуглекислого газу,

тепла та вологи. Система подачі передбачає рух повітря через розсіювач (рис. 2.8).

Вигнута форма розсіювача сприятиме плавному перенаправленню повітряного потоку без утворення зон турбулентності. На випускній частині елемента планується встановити перфорований щілинний блок, що буде виконувати функцію розсіювача. Щілини рівномірно розташовані по периметру, що дозволить забезпечити всебічне, рівномірне розподілення повітря всередині капюшона. Такий принцип подачі повітря запобігатиме утворенню зон з підвищеною вологістю або перегрівом. Конструкція передбачає можливість кріплення до корпусу шолому за допомогою монтажного фланця. Загальний вигляд головного гарнітуру з панорамним склом і системою активної щілинної вентиляції представлено на рисунку 2.9.

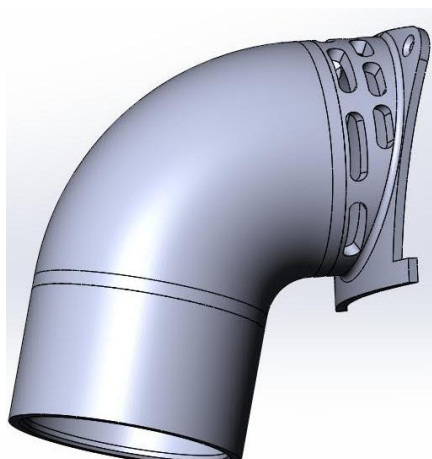


Рисунок 2.8 – Розсіювач повітря з системою щілинної подачі



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд головного гарнітуру з панорамним склом і системою активної щілинної вентиляції

2.3 Розрахунок та обґрунтування параметрів шланга для подачі повітря від моторового блоку до капюшона

Подача повітря здійснюється через гнучкий шланг, з'єднаний із джерелом чистого повітря (моторовим блоком з позитивним тиском). Введення повітря до внутрішнього об'єму капюшону забезпечує постійне

оновлення повітряного середовища, створює надлишковий тиск, який додатково перешкоджає проникненню забрудненого зовнішнього повітря крізь конструктивні щілини (рис. 2.10). Випуск відпрацьованого повітря планується виконувати через контрольовані нещільності в області шиї, зокрема в місці прилягання нижньої частини капюшону до тіла користувача. Такий підхід забезпечить природну циркуляцію повітря без потреби у встановленні додаткових клапанів, водночас зберігаючи герметичність конструкції на достатньому для захисту рівні.

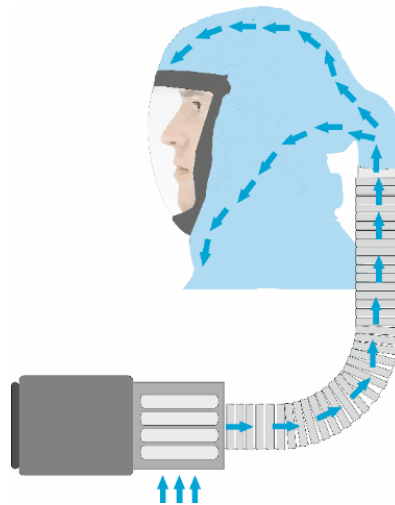


Рисунок 2.10 – Схема руху повітря в капюшоні

Шланг для подачі повітря відіграє ключову роль у забезпеченні рівномірної та безперебійної подачі чистого повітря від моторового блоку до капюшона. Перед початком розрахунків було проведено аналіз та оцінку характеристик різних матеріалів, з яких виготовляються шланги, з урахуванням їхньої стійкості до механічних навантажень, перепадів температур, впливу вологи та агресивних середовищ. Особлива увага приділялась гнучкості шланга, адже вона визначає зручність експлуатації та можливість вільного переміщення та рухів головою користувача без ризику перекриття подачі повітря (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Характеристики матеріалів шланга [9, 10]

Назва матеріалу шланга	Переваги	Недоліки
Полівінілхлорид (ПВХ)	Легкий і гнучкий. Стійкий до вологи та пилу. Недорогий. Можливість стискання для компактного зберігання.	Може створювати підвищений опір потоку. Менша стійкість до високих температур і агресивних хімікатів. З часом зменшується еластичність
Силікон	Гнучкий навіть при низьких температурах. Стійкий до озону, УФ, вологи та більшості хімікатів. Гладка внутрішня поверхня, тому менший опір повітряному потоку.	Вища ціна порівняно з ПВХ. Дещо більша вага
Поліуретан (PU)	Висока зносостійкість і міцність. Хороша гнучкість і пружність, шланг не зминається. Прозорість дозволяє візуально контролювати чистоту.	Дорожчий за ПВХ. Може втрачати пружність при сильному охолодженні
Гума	Дуже міцний і довговічний. Стійкий до механічних пошкоджень і стирання.	Важчий за інші варіанти. Менш гнучкий. Може мати специфічний запах.
Медичний ПВХ або силікон (харчовий)	Безпечний для дихальних систем, не виділяє шкідливих речовин. Легкий і прозорий. Добра гнучкість.	Не такий міцний при механічних навантаженнях. Чутливий до ультрафіолету (особливо ПВХ).

Додатковим параметром, що враховувався при виборі шланга була пропускна здатність за хвилину, тобто максимальний об'єм повітря, що може пройти через шланг певного діаметру за одну хвилину. Розглядалися шланги діаметром 25 мм (силікон), 32 мм (медичний ПВХ) та 40 мм (PU), оскільки саме такі зразки найчастіше можна зустріти на ринку України. Інші комплектації виготовляються під замовлення або постачаються з-за кордону.

Для оцінки перепаду тиску в шлангу використано закон Дарсі-Вейсбаха у вигляді

$$\Delta P = f \frac{L_{\text{шл}}}{d_{\text{шл}}} \frac{\rho V^2}{2}, \text{ Па}$$

де ρ – густина повітря, (1,2) кг/м³; V – лінійна швидкість повітря, м/с; $L_{\text{шл}}$ – довжина шланга, м; $d_{\text{шл}}$ – внутрішній діаметр шланга, м; f – коефіцієнт тертя (0,02 для гладких труб в турбулентному режимі).

Довжина шланга для розрахунку прийнята $L_{\text{шл}}=1,0$ м. Кінематична в'язкість $\nu_{\text{шл}} \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Витрата повітря Q задавалась в межах 95-200 дм³/хв., що відповідає об'ємній витраті 0.00158-0.00333 м³/с. Лінійну швидкість визначали як $\nu = Q / S_{\text{шл}}$, де $S_{\text{шл}}$ це площа поперечного перерізу шланга. Для оцінки коефіцієнта тертя f використано емпіричну формулу Блазіуса $f=0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$, що коректна для числа Рейнольдса в наближенні $\text{Re} \approx 4 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^5$.

Тестування шланг виконувалось за наступною схемою (рис. 2.11). Повітря від компресора подавалось через витратомір РМ-25ГУЗ до дифузора, який був розмішений горизонтально для зменшення впливу руху повітряного потоку через шланг. Регулювання витрати повітряного потоку виконувалось вентилем, що забезпечував необхідну подачу постійного потоку повітря. На дифузорі знаходились кріплення для фіксації резинової прокладки з отвором діаметром 22 мм, в який вставлявся випробуваний зразок шланга. Резинова прокладка є гнучкою та забезпечувала фіксацію зразків, а діаметр міг збільшуватись до необхідного значення. У випробуваних зразках різного діаметру заздалегідь були зроблені отвори діаметром 7 мм на відстані 50 мм

та 150 мм від країв відповідно для встановлення штуцерів від електронних мікроманометрів Testo 512, які паралельно фіксували значення перепаду тиску в випробуваному зразку шлангу.

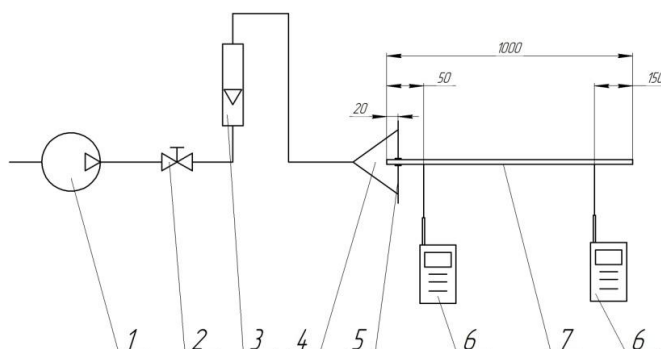


Рисунок 2.11 – Схема для визначення перепаду тиску в шлангу: 1 - компресор; 2 – регулювальний вентиль; 3 – витратомір РМ-25 ГУЗ; 4 – дифузор з кріпленням; 5 – резинова прокладка з отвором; 6 – електронний мікроманометр Testo 512 з штуцерами; 7 – випробуваний зразок шланга

Відхилення отриманих результатів розраховувалось за формулою:

$$\sigma_{\text{рез}} = \left(\frac{\Delta P_{\text{розр}} - \Delta P_{\text{експ}}}{\Delta P_{\text{експ}}} \right) 100\%$$

Результати математичних розрахунків та експериментально отримані дані представлені в таблицях 2.5-2.7 та на рисунку 2.12.

Таблиця 2.5 – Результати математичних розрахунків шланг різного діаметру

Діаметр шланга, мм	Витрата повітря Q, дм ³ /хв.	Розрахована швидкість V, м/с	Число Рейнольдса Re	Розрахований перепад тиску ΔP _{розр} , Па
25	95	3,22	5,33·10 ³	50
25	160	5,45	8,99·10 ³	143
25	200	6,80	1,12·10 ⁴	221
32	95	1,98	4,19·10 ³	15
32	160	3,34	7,06·10 ³	42
32	200	4,16	8,79·10 ³	65
40	95	1,26	3,30·10 ³	5
40	160	2,12	5,60·10 ³	13
40	200	2,64	6,99·10 ³	21

Таблиця 2.6 – Експериментально отримані дані випробувань шланг різного діаметру

Діаметр шланга, мм	Витрата повітря Q, дм ³ /хв.	Перепад тиску на вході шланга, Па	Перепад тиску на виході шланга, Па	Перепад тиску $\Delta P_{\text{експ}}$, Па
25	95	36	-4	40
25	160	115	-14	129
25	200	186	-20	206
32	95	14	0	14
32	160	39	-5	44
32	200	66	-9	75
40	95	6	0	6
40	160	20	1	19
40	200	33	2	29

Таблиця 2.7 – Порівняльні характеристики отриманих даних

Діаметр шланга, мм	Витрата повітря Q, дм ³ /хв.	$\Delta P_{\text{експ}}$, Па	$\Delta P_{\text{розн}}$, Па	Відхилення результатів σ , %
25	95	40	50	25
25	160	129	143	11
25	200	206	221	7
32	95	14	15	7
32	160	44	42	5
32	200	75	65	15
40	95	6	5	20
40	160	19	13	46
40	200	29	21	38

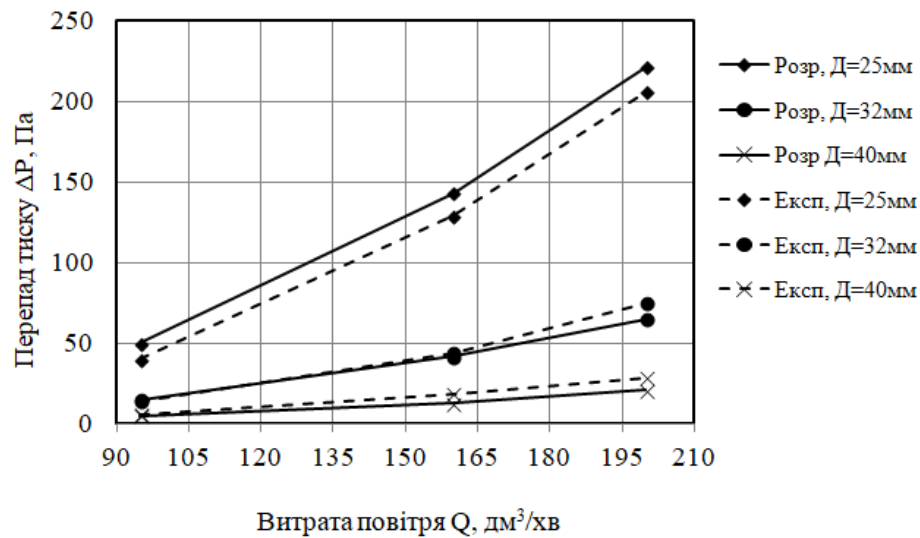


Рисунок 2.12 – Залежності перепаду тиску від витрати повітря для шланг різного діаметра

Можлива розбіжність результатів по перепаду тиску шланг пояснюється використанням фіксованого значення коефіцієнту тертя (0,02), тоді як в реальних умовах він залежить від матеріалу, дизайну та шорсткості шлангу, які відрізняються між собою.

Також певну корективу в отриманні значення можуть вносити нещільності в місці затиску шлангу, що особливо відображається за великої витрати повітря.

В теоретичних розрахунках визначався тиск в шлангу довжиною 1 м, тоді як експериментальна модель мала отвори для приєднання на відстані 5 см та 15 см від країв відповідно, що фактично зменшувало загальну довжину випробуваного зразка.

За максимальної витрати 200 дм³/хв. перепад тиску для 25 мм становить приблизно 206 Па, для 32 мм вже скоротився до 65 Па, тоді як для 40 мм близько 21 Па. Отже, зменшення діаметра з 32 до 25 мм підвищує перепад тиску майже в 3.2 рази за тієї ж довжини та витрати.

Лінійна швидкість у шлангу при 200 дм³/хв. для 25 мм близько 6,8 м/с, для 32 мм приблизно 4,16 м/с, а для 40 мм вже становить 2,64 м/с. Практичне правило для комфортної подачі повітря тримати швидкість у шлангу не

більше 5 м/с, тому шланги діаметром 32 мм та 40 мм дозволяють цього досягти при максимальному значенні витрати повітря 200 дм³/хв. Вища швидкість означає більший рівень шуму, інтенсивнішу турбулентність, сильніші пульсації потоку та відчутний опір при вдиху користувача.

Крім того спостерігаємо для шлангу діаметром 25 мм та 32 мм реєстрування від'ємного значення тиску на виході, що може свідчити про значну швидкість повітряного потоку та створення вакуметричного тиску в трубі приєднаної до електронного мікроманометра.

Оцінена додаткова потужність, що витрачається на тертя в шлангу при Q 200 дм³/хв., становить близько 0.21 Вт для діаметра 25 мм і близько 0,065 Вт для 32 мм. Хоча ці абсолютні значення невеликі, відносна різниця показує, що вентилятору доведеться працювати при значно більшому напорі і обертах у випадку вузького шланга, що веде до збільшення шуму, теплового навантаження, зносу та скорочення часу роботи від акумулятора.

Наведені розрахунки враховують лише опір, що виникає по довжині гладкого шланга; до них треба додати падіння тиску у фільтрах, на різьбових з'єднаннях, переходах, колінах і патрубках моторового блоку. Якщо обраний діаметр замалий (наприклад, 25 мм), то сумарний опір системи може стати критичним, а вентилятор не зможе забезпечити потрібний об'єм повітря або буде працювати на підвищених оборотах і вищому енергоспоживанні. На підставі чисел і практичних критеріїв комфорту впливає рекомендація використовувати діаметр шланга не менший за 32 мм для забезпечення витрат повітря 140-220 дм³/хв. згідно вимог стандарту ДСТУ EN 12941 при довжині 1,0 м. У випадку більшої довжини або значної кількості згинів варто розглядати діаметри 35-40 мм або застосувати шланг зі гладкою внутрішньою поверхнею для мінімізації коефіцієнта тертя.

За результатами математичних розрахунків та експериментальних випробувань було обрано варіант з прозорого поліуретану товщиною 0,6 мм та діаметром 40 мм (ІНТЕРГУМА, Україна). Даний шланг є дуже гнучким (мінімальний радіус вигину 28 мм) та легкий (0,23 кг/м.п.) [11].

2.4 Результати комп'ютерного моделювання руху повітря через капюшон

Поєднання примусової подачі та пасивного відведення повітря дозволить уникнути перегрівання, запотівання оглядового скла та знизить фізіологічне навантаження на користувача під час тривалого використання засобу індивідуального захисту. Результати моделювання (рис. 2.13) та попередньої оцінки рівномірності розподілу повітряного потоку в захисному капюшоні, отримані за допомогою програмного продукту SolidWorks Flow Simulation та результати наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Розрахунок параметрів коливань швидкісних потоків та тиску в захисному капюшоні, розрахований час очищення робочого об'єму капюшону

Витрата повітря через капюшон Q , $\text{дм}^3/\text{хв.}$	$V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$	$P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$	$T_{\text{оч}}, \text{с}$
Типорозмір М (відношення параметрів $A \times B = 40700$)			
60	1,697	1,224	9,4
95	1,800	1,200	6,0
140	1,900	1,182	4,07
200	2,000	1,166	2,85
Типорозмір L (відношення параметрів $A \times B = 46000$)			
60	1,784	1,112	12,4
95	1,900	1,100	8,0
140	2,010	1,091	5,43
200	2,125	1,083	3,8

На рисунках 2.14а та 2.14б наведені графіки залежностей коливань параметрів внутрішнього середовища капюшону від об'ємної швидкості повітря та типорозміру робочої частини.

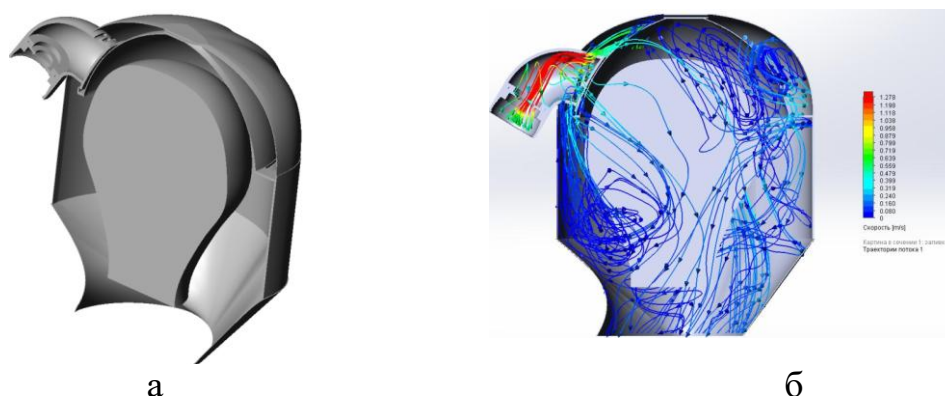
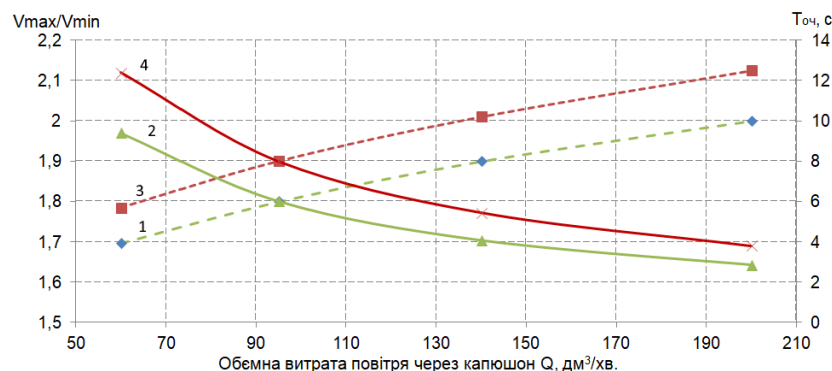
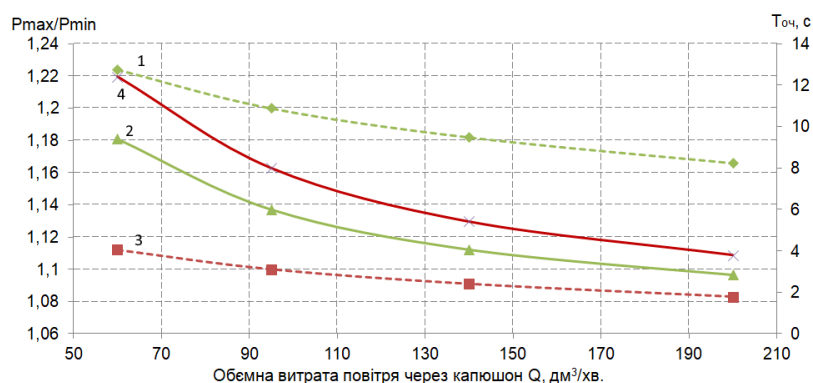


Рис. 2.13 – Цифрова модель капюшона моторового фільтрувального респіратора розміру L з головою користувача: а – розрахункова геометрична модель, б – результати моделювання руху повітряних потоків у внутрішньому об'ємі капюшону



а) коливання швидкостей повітря (1) та часу очищення (2) капюшону типорозміру М, коливання швидкостей повітря (3) та часу очищення (4) капюшону типорозміру L



а) коливання тиску (1) та часу очищення (2) капюшону типорозміру М, коливання тиску (3) та часу очищення (4) капюшону типорозміру L

Рисунок 2.14 – Розподіл руху повітря в капюшоні за різної витрати повітря

Експериментальні результати визначення розподілу тиску повітряного потоку, в середині захисного капюшону наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати визначення розподілу тиску повітряного потоку всередині капюшону

Місце заміру	Середнє значення тиску, Па
Біля панорамного скла	$13,1 \pm 0,54$
Біля шиї (фронтальна частина)	$8,6 \pm 0,68$
Верх капюшону	$13,0 \pm 0,60$
Біля роту/носу користувача	$15,8 \pm 0,64$
Біля потилиці	$18,0 \pm 0,40$

Результати випробувань свідчать, що найбільше значення тиску спостерігається в зоні виходу та розсіювання повітряного потоку з повітропроводу, а найменше значення спостерігається в зоні шиї, де є найбільший об'єм витoku повітря через нещільності. Проте, дані значення тиску є позитивними, тому надходження нефільтрованого повітря не спостерігається.

Виходячи із вище наведеного була розроблена експериментальна модель захисного капюшону розміру L (рис. 2.15), інтегрована з захисною каскою яка відповідає вимогам стандарту EN 397. Базовим елементом конструкції є каска, що забезпечує механічний захист голови, на поверхню якої встановлюється герметичний покривний елемент із непроникного матеріалу (ламінований спанбонд) щільністю 50 г/м^2 . Така конструкція дозволяє поєднати ударозахисні властивості каски з бар'єрними характеристиками капюшона, створюючи комплексний засіб індивідуального захисту. Запропоноване технічне рішення має дві основні складові: по-перше, воно забезпечує ефективний захист голови користувача від можливих ударів, падіння предметів або механічних пошкоджень, що можуть виникати під час виконання виробничих або аварійно-рятувальних робіт; по-друге,

конструкція передбачає індивідуальне припасування до голови за допомогою стандартного регульованого ободу, інтегрованого у внутрішню частину каски. Це дає змогу адаптувати засіб захисту до широкого діапазону антропометричних параметрів користувачів, підвищуючи ергономічність та надійність фіксації під час експлуатації.



Рисунок 2.15 – Загальний вигляд моделі капюшону

На задній частині захисного капюшона передбачено вхідний канал для подачі чистого повітря та призначений для підключення до моторового респіратора. Через гнучкий шланг буде подаватися очищене повітря, яке циркулює всередині капюшона, забезпечуючи користувачу комфортне дихання та знижуючи теплове навантаження. Наявність позитивного тиску всередині об'єму сприяє додатковому захисту від проникнення забрудненого повітря ззовні.

Загалом, запропонована конструкція поєднує механічний захист, герметичність, оглядовість і комфорт, що робить її придатною для використання в умовах підвищеного ризику, зокрема в хімічно-небезпечних, біологічно-заражених або запилених середовищах, а також при виконанні аварійно-рятувальних робіт. Результати попередніх досліджень щодо розроблених типорозмірів захисних капюшонів показали задовільні результати, що базуються на визначенні коефіцієнта варіабельності швидкості, який знаходиться в діапазоні 0,15 – 2; коефіцієнта варіабельності тиску, який не перевищує 0,1; максимальний час очищення внутрішнього

простору капюшону не більше 8 секунд. Оцінка ефективності запропонованого рішення виконувалась шляхом експлуатаційного тестування розробленого прототипу капюшону. Результати опитування наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Результати оцінювання прототипу капюшону випробувачами

Випробувач	Параметри, бали						Середнє за випробувачем
	ЗГГ	ЛЗН	НК	ЧПЗ	РВА	РШП	
1	5	4	4	5	5	4	4,5
2	5	5	4	5	5	5	4,8
3	5	5	5	5	5	5	5,0
4	4	4	4	5	5	4	4,3
5	5	4	4	4	5	4	4,3
Середнє за показником	4,8	4,4	4,2	4,8	5,0	4,4	

Результати експлуатаційних випробувань розроблених типорозмірів захисних капюшонів показали, що більшість випробувачів поставили оцінку добре, відмічаючи позитивною стороною капюшону зручність головного гарнітура, чіткість і поле зору, охоплюючи запотівання та зберігання рівноваги під час використання апарата, тоді як низьку оцінку отримав показник надійність кріплень.

З урахуванням проведеного аналізу антропометричних параметрів та удосконаленої процедури проєктування капюшонів можна сформулювати низку рекомендацій, спрямованих на подальше вдосконалення конструкції та підвищення ефективності її застосування [12].

Насамперед, доцільно розширити розмірний ряд капюшонів. Це особливо важливо для дітей, підлітків, а також для людей з індивідуальними або нетиповими формами голів, включно з користувачами, які мають медичні чи фізіологічні особливості. У таких випадках може знадобитися створення

додаткових типорозмірів або навіть індивідуалізованих моделей. Ефективним підходом є використання еластичних або адаптивних матеріалів у конструкції, що дозволяє покращити посадку капюшона без шкоди для герметичності чи комфорту.

Так, дослідження за допомогою машинного навчання (Variational Autoencoder із точковими хмарами облич) показало, що можна виділити кластерні розмірні групи, які представляють найбільш стандартні типорозміри користувачів. Це дозволяє створити оптимальну розмірну сітку, включно з індивідуалізованими моделями [13].

Окрему увагу слід приділити адаптації капюшонів до особливих умов експлуатації. Залежно від характеру робіт (пожежогасіння, робота в умовах термічного навантаження, запиленості, хімічного чи біологічного забруднення). Необхідно враховувати зовнішні фактори, такі як температурний режим, відносну вологість повітря, наявність агресивних речовин або потребу у швидкому знятті/одяганні капюшона. Це вимагає ретельного підбору матеріалів і конструкторських рішень для збереження функціональності в екстремальних умовах. Важливою характеристикою є можливість індивідуального налаштування капюшону. Використання стандартного регульованого обода, внутрішніх елементів регулювання об'єму та посадки дозволяє забезпечити щільне, але комфортне прилягання капюшону до голови користувача. Це дає змогу уникнути потреби в надмірній кількості типорозмірів і спрощує масове виробництво засобів індивідуального захисту. В роботі [14] автори встановили, що для півмасок ширина обличчя (face width) і ширина рота (mouth width) найсильніше корелюють із показником захисту (Protection Factor), тому використання ключових антропометричних параметрів для розробки капюшонів є важливим елементом [15, 16]. Наприклад, у галузі авіації та добровільних дослідницьких програм рекомендовано створювати репрезентативні моделі облич (RFMs) або типові скановані профілі, які відповідають медіанним розмірам певної популяції. Це дозволяє забезпечити високу точність та

комфорт посадки [17]. Конструкція капюшону має враховувати сумісність з іншими засобами індивідуального захисту: навушниками, захисним одягом тощо. Це дозволить забезпечити комплексний захист без втрати герметичності чи зниження ефективності окремих компонентів. Оглядові статті з фаху пожежної безпеки підкреслюють, що існуючі стандарти типу NFPA здебільшого оцінюють властивості матеріалів, але не враховують реальну експлуатацію, взаємодію з іншими засобами захисту, щільність швів та ефективність очистки. Доцільно включити вимоги до проведення тестування в рамках симуляційних сценаріїв із реальними користувачами [18, 19].

Окрім технічних та ергономічних аспектів, слід враховувати психофізіологічний комфорт користувача. В дослідженні [20] з використанням півмасок було встановлено, що лише 8 % респондентів вважали респіратори комфортними, а 62 % незручними; дизайн ЗІЗ має враховувати ергономічність і комфорт носіння. Особливо це актуально для дітей або людей з підвищеною чутливістю [21]. У таких випадках конструкція повинна мінімізувати тиск на шкіру [22], мати ефективну вентиляцію [23], не створювати відчуття стиснення та забезпечувати хороший огляд через панорамне скло без спотворень зображення. Забезпечення комфортного тривалого носіння без подразнення, втоми чи головного болю є критично важливим фактором для безпеки й продуктивності роботи користувача в умовах потенційної небезпеки [24, 25].

Крім того, варто враховувати вплив демографічних факторів (стать, етнічність, вікові особливості) на розмірні характеристики, що зумовлює необхідність індивідуальних або адаптивних рішень [26, 27]. Таким чином, подальше вдосконалення капюшонів, як засобів індивідуального захисту, повинне базуватись на гнучкому підході до розмірної сітки, враховувати специфіку виробничих умов, анатомічних особливостей користувача та високих вимог до сумісності, ергономіки й комфорту.

2.5 Оцінювання носіння захисного капюшона на когнітивні параметри користувачів

Під час евакуації з місця надзвичайної ситуації, чи виконання виробничих завдань в умовах шкідливих для життя використання засобів індивідуального захисту є необхідною умовою для збереження здоров'я. Часто в зазначених умовах виникає потреба вирішенні різних виробничих задач. Разом з тим, виникає питання щодо оцінювання впливу захисного капюшона на когнітивні параметри користувачів. Іншими словами чи не заважає засіб індивідуального захисту органів дихання сконцентруватись на певній проблемі чи задачі, що виникла для прийняття рішення.

Для відповіді на поставлене питання потрібно:

- підібрати відповідні методи з визначення когнітивних показників, які відповідають за швидкість реакції з обробки інформації для прийняття управлінського рішення користувачем респіратора при імітації виконання професійної діяльності в умовах забрудненого робочого середовища.
- провести оцінювання впливу носіння респіратора на когнітивні здібності користувачів.
- розробити рекомендації щодо безпечного використання респіратора.

В дослідженні брали участь 15 осіб, серед яких 10 чоловіків та 5 жінок віком від 21 до 45 років, які є здобувачами вищої освіти і викладачами у НТУ "Дніпровська політехніка" (табл. 2.11). Всі учасники експерименту надали письмову згоду на участь у дослідженні, та письмо засвідчили, що не мають медичних протипоказань для участі в експерименті. Після отримання письмової згоди щодо участі в експерименті усі випробувачі надали персональні дані щодо свого віку та пройшли оцінку з визначення рівня IQ (за тестом Айзенка). Всі учасники мали досвід носіння респіратора, хоча це не було обов'язковою умовою для участі в експериментальному дослідженні.

Таблиця 2.11 – Базові показники учасників дослідження

Показники	Чоловіки	Жінки
Кількість учасників	10	5
Середній вік учасників	$26 \pm 4,1$	$23 \pm 2,4$
Рівень IQ*	106 – 132	109 – 129
Середня частота серцевих скорочень**	$71,4 \pm 4,6$	$78,6 \pm 3,4$

*Примітка рівень IQ було визначено у відповідності до міжнародного тесту, який дозволяє встановити рівень здатності вчитися, розуміти, формувати поняття, обробляти інформацію, застосовувати логіку та міркування у порівнянні з іншими людьми; тест проводився на онлайн платформі <https://international-iq-test.com/uk/>.

**Середня частота серцевих скорочень визначена для розуміння рівня тривожності за допомогою пульсометру «Cardio Control 7.0» (виробник – «Medica +», Китай).

Експеримент проводився в акредитованій Національним агентством з акредитації України випробувальній лабораторії засобів індивідуального захисту ТОВ «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ», яка має необхідне експериментальне обладнання та досвід роботи з проведення експлуатаційних випробувань респіраторів. Перед початком дослідження всіх учасників експерименту попросили відпочити для відновлення розумових здібностей.

Експеримент проводився 2 дні поспіль при стандартних кліматичних умовах: кімнатної температури (22 ± 2) °C та вологості повітря (70 ± 5) %. Параметри в приміщенні контролювались гігрометром психрометричним ВІТ-2 (виробник «Склоприлад», Україна), регулювання параметрів виконувалось за допомогою кондиціонера OSAKA ST-24HH (виробник «Osaka», Китай). В перший день всі учасники послідовно виконували ряд психометричних тестів в респіраторі, які проводились у певній послідовності. Загальна тривалість тестування становила приблизно 50 хвилин. На початку тестування та по його закінченні в робочих записах реєструвалась частота серцевих скорочень за допомогою пульсометру «Cardio Control 7.0».

Перед початком тестування було проведено інструктаж з виконання on-line тестів. Для проведення дослідження були використано три тести за вказаною послідовністю:

1. Online тест «Stroop Color Word» [28], який визначає здатність пригнічувати перешкоди; у першій частині тесту учасників просять якомога швидше прочитати вголос слова, що складаються з назв кольорів жовтого, зеленого, червоного та синього, надрукованих чорним кольором; у другій частині – пропонується прочитати назви кольорів, коли колір слів не збігається з написаними словами; затримка реакції оцінюються в секундах (рис. 2.16).

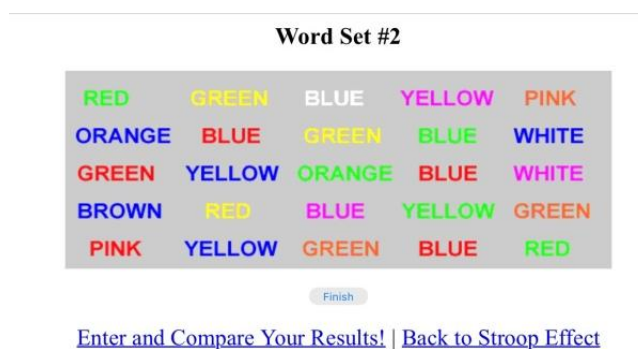


Рисунок 2.16 – Online тест "Stroop Color Word" [29]

Під час проходження тесту за 45 с визначалась кількість правильних тестів при читанні слів (*SWR*), назви кольорів (*SCN*) і кольорових слів (*SCW*). Потім прогнозовану оцінку визначали за формулою:

$$CW = (SWR \times SCN) / (SWR + SCN),$$

де *CW* - здатність пригнічувати, де нижчий показник означає більші труднощі в пригніченні перешкод.

2. Online тест «Trailmaking Halstead-Reitan» [30], який призначений для збору інформації про швидкість візуального пошуку, сканування, швидкості обробки та розумової гнучкості; учаснику пропонується якомога швидше з'єднати набір із 25 точок, зберігаючи при цьому точність (частина А) і

з'єднати цифри від 1 до 13 з відповідними літерами від A до L, які довільно розподілені на аркуші паперу (рис. 2.17).

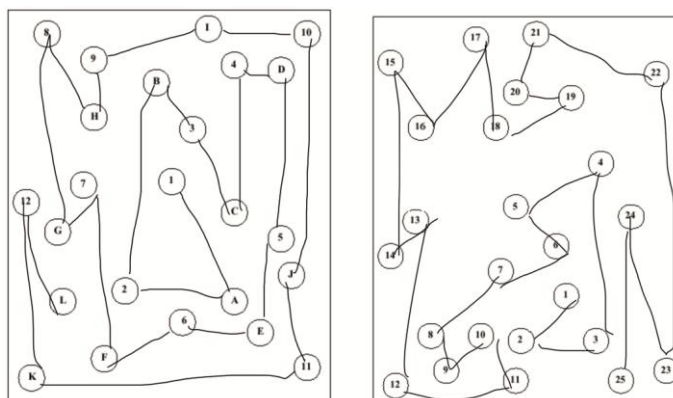


Рисунок 2.17 – Online тест «Trailmaking Halstead-Reitan» [31]

3. Тест Равена [32], який призначений для визначення рівня розвитку інтелекту та вивчення логічності мислення; учасникам пропонуються рисунки з фігурами, які пов'язані між собою певною залежністю, потрібно знайти одну фігуру, якої бракує за визначений час (рис. 2.18).

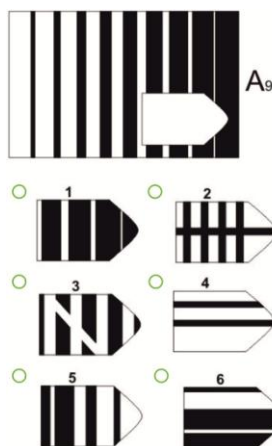


Рисунок 2.18 – Тест Равена [33]

4. Тест на рівень тривожності проводили за допомогою відомого онлайн ресурсу «IDRlabs.com» [34], де пропонується відповісти на 30 запитань, які стосуються поточного внутрішнього стану, наявності занепокоєння, яке нерідко супроводжується такими фізичними симптомами, як спітнілі долоні, аритмія та головний біль; часто тривога проявляється у складних ситуаціях.

Перед початком виконання всіх трьох тестів і після їх проходження виміряти рівень стресового навантаження та тривожності.

На другий день учасники експерименту виконували вище наведені тести за зворотною послідовністю. При виконанні завдань під час носіння респіратора проводилися одночасні вимірювання концентрації CO_2 в вдихуваному повітрі і в лицевій частині (від вдихання до інгаляції). Це дозволило визначити ефективний мертвий простір. Для вимірювання концентрації CO_2 використовувався газоаналізатор «Дозор-С-2» (виробник ТОВ НВП «Оріон», Україна), що здатний визначати концентрацію газу з точністю до 0,001 % в діапазоні від 0 до 5 об. % CO_2 , та системи відбирання проби з підмаскового простору респіратора, до складу якої входив назальний аспіратор «802» (виробник «Medica+», Китай), що забезпечував плавне регулювання об'єму відібраної проби так, щоб вона не впливала на процес дихання людини.

Для аналізу даних використовувався статистичний пакет SPSS (версія 21.0; SPSS, Inc., USA). Асиметрію розподілу отриманих даних оцінювали за критерієм тесту Колмогорова-Смирнова. Відмінності між попередніми та пост-вибірками двох оцінюваних ситуацій були проаналізовані за допомогою «MANOVA» із зразками як фіксованим фактором і за допомогою аналізу «Bonferroni post hoc». Нарешті, було проведено двовимірний кореляційний аналіз між усіма досліджуваними змінними за допомогою кореляційного аналізу Пірсона. Рівень значущості для всіх порівнянь був встановлений на $p \leq 0,05$. Результати дослідження когнітивної продуктивності при виконанні запропонованих тестів без респіратора і при використанні респіратора наведені в таблиці 2.12.

Отримані експериментальні дані мають доволі неоднозначні результати, що можна пояснити різним проявом впливу респіратора на функції прийняття рішення користувачами. Так, під час виконання online тесту «Stroop Color Word» з визначення здатності пригнічувати перешкоди CW було визначено, що значного впливу наявність респіратора на логічність

мислення він не мав. Хоча показник *CW*, дещо вищий при використанні респіратора. Це пояснюється переш за все через підвищення розумової активності, оскільки випробувачі проходили один і той же тест з різницею в один день.

Таблиця 2.12 – Результати дослідження впливу носіння респіратора на когнітивні показники

Показники	Чоловіки		Жінки	
	БР	ВР	БР	ВР
<i>CW</i> (здатність пригнічувати перешкоди) за online тестом «Stroop Color Word», %	3-21	4-18	3-17	5-16
Час виконання online тесту «Trailmaking Halstead–Reitan», (частина А), с	22-35	21-37	20-37	25-36
Час виконання online тесту «Trailmaking Halstead–Reitan», (частина Б), с	52-84	55-86	49-81	51-82
Рівень уважності за тестом Равена, %	83	86	83	83
IQ за тестом Равена, %	85	93	92	92
Рівень тривожності, %	35	41	34	41

Примітка: БР – без респіратора; ВР – з використанням респіратора

З іншого боку, виникає припущення, що наявність респіратора, хоча б і незначно, але все ж таки збільшує увагу, через додаткове навантаження і підвищення концентрації. Подібний ефект був відмічений в іншому дослідженні, щодо оцінки впливу респіратора на розумові здібності [35]. Автори відмітили, що респіратори в деяких користувачів підвищує рівень уважності при цьому виникає пригнічення інтерференції, що говорить про здатність гальмувати сильніші за своєю природою вербальні функції заради сприйняття кольору, висока - про те, що випробуваний насилу звільняється від впливу значення слова при його невідповідності наочному враженню. Втім на результат даного тесту можливий вплив і рівня освіти оскільки учасники мали різний рівень IQ, який був наданий учасниками як одна з необхідних вимог участі в дослідженні (табл. 2.11). Даний висновок підтверджується і зробленими висновками в роботі [29], де говориться про значну кількість помилок у виконанні подібних тестів при низькій успішності здобувачів.

Під час аналізу додаткових даних, які визначались під час виконання online тесту «Trailmaking Halstead-Reitan», наприклад відносної кількості помилок зробленої учасником, яка визначалась до загальної кількості точок, що з'єднувались було виявлено незначний негативний вплив використання респіраторів у жінок на швидкість візуального пошуку точок, що може говорити про певний дискомфорт при носінні респіраторів. Опитування учасниць після експерименту не показало, якогось суттєвого навантаження, що надав респіратор, в той же час, іноді виникала необхідність його поправлення, що відволікало від виконання основного завдання. З іншого боку швидкість пошуку точок при виконанні згаданого тесту у чоловіків, які застосовують респіратори виявився дещо кращий ніж у жінок (рис. 2.19), що може говорити про відсутність відповідного рівня мотивації у виконанні зазначених завдань жінками. Зроблений висновок підтверджують дослідження [31], де зазначалось, що результативність проведення маршрутів в online тесті «Trailmaking Halstead-Reitan» залежить від віку та освіти, але не від статі учасників (рис. 2.20).

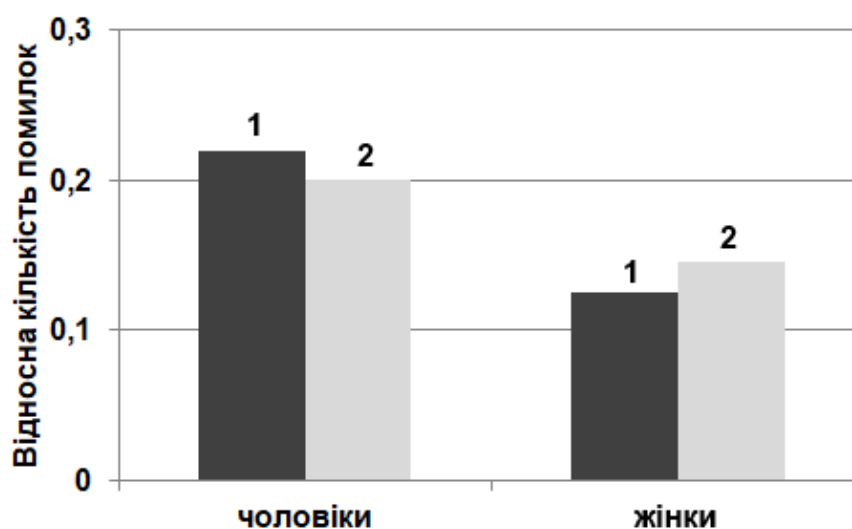


Рисунок 2.19 – Діаграма з визначення відносної залежності кількості помилок при виконанні online тесту «Trailmaking Halstead–Reitan»

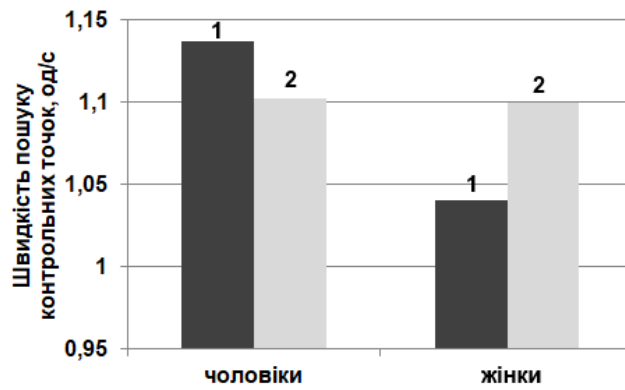


Рисунок 2.20 – Діаграма з визначення швидкості пошуку точок при виконанні online тесту «Trailmaking Halstead-Reitan»

На рис. 2.21 наведено діаграму з визначення IQ за тестом Равена, що дозволяє оцінити вплив респіраторів на логічність мислення, тобто здатність мислити точно й послідовно. Результати даного тесту дозволили з'ясувати вплив респіраторів через дискомфортні відчуття та обмеження поля зору на рівень прийняття рішення. Враховуючи, що рівень розвитку інтелекту учасників був різним (табл. 2.11), що визначалось ще до початку тестування, отримані дані з рівня логічного мислення та рівня уважності (табл. 2.12) дозволяють затверджувати про, мінімальний вплив респіратора на зазначені когнітивні показники. Хоча раніше деякі учасники скаржились на відволікання на певні незручності при використанні респіраторів, що вимагало під час тесту їх виправити на загальний результат це й факт не вплинув. Однак, було вивчено незначне збільшення тривожності і стресового навантаження при виконанні вказаних тестів у респіраторі (рис. 2.22), що ймовірно й компенсувало виявлені незручності. До речі, показник частоти серцевих скорочень, який був визначений відразу після виконання тестів, теж підтверджує дані висновки, оскільки він збільшився на 10 % по відношенню від початкового, що визначався на початку експерименту (табл. 2.11). Крім того, враховуючи спостережуваний зв'язок когнітивної продуктивності від наявності респіратора та IQ, повторно проаналізували наші групові

відмінності, виправивши залежність від віку та IQ (IQ та рівень освіти мають сильну взаємну кореляцію).



Рисунок 2.21 – Діаграма з визначення IQ і кількості правильних відповідей при виконанні тесту Равена

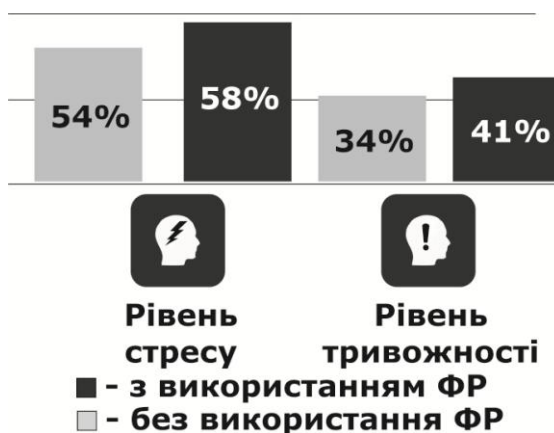


Рисунок 2.22 – Діаграма визначення рівня стресу і тривожності під час виконання зазначених тестів у респіраторі і без нього

Результати розрахунків швидкості прийняття рішень (що залежить від швидкості реакції, яка визначалась за часом виконання online тесту «Trailmaking Halstead-Reitan» та дієвості, що встановлювалась за часом виконання теста Равена) під час виконання пізнавальних завдань показали, що застосування респіатора не тільки не збільшили час для прийняття рішення, а навіть у деяких учасників він покращився, хоча потрібно відмітити, і деяке збільшення кількості помилок. При використанні респіатора час прийняття рішення на одне завдання склав $(0,18 \pm 0,04)$ с,

тоді як без респіратора ($0,23 \pm 0,02$) с, що підтверджено кореляційним зв'язком з часом вимірювань при порівнянні вихідного результату.

Точність реакції визначалася як частка правильних відповідей по відношенню до невірних помилкових виконаних завдань з online тестів «Trailmaking Halstead-Reitan» та «Stroop Color Word» для кожного із завдань, де учасник робив вибір. Істотних відмінностей в точності реакції між результатами при носінні респіратора і контролю не було незалежно від часу вимірювання [36].

Прийнято вважати, що носіння респіратора завжди має негативний фізіологічний і психологічний ефект [37-39]. Однак результати даного дослідження показали, що когнітивні показники на початковому етапі (експеримент проводився протягом 40 хв.) швидкість реакції, здатність пригнічувати перешкоди, час прийняття рішення, а також точність відбору - не змінюються при застосуванні за відсутності інших факторів, наприклад, фізичного навантаження чи екстремальних умов, які значно збільшать навантаження на серцево-судинну систему користувача респіратора. В той же час було виявлено деяке скорочення часу щодо прийняття рішень при виконанні завдання, з розрізнення слів і кольорів (при носінні респіратора). Це дозволяє говорити про те, що респіратор може дещо поліпшити когнітивні показники в деяких випадках через збудження нервової системи завдяки додатковій напрузі, що показує перевірка на рівень стресу (рис. 2.21), який впливає на основні нейронні ланцюги, задіяні в обробці різних вхідних даних та пришвидшує нейроендокринної динаміку [40]. Так, деякі дослідження вказують на ідею про те, що гострий стрес знижує чутливість до навантаження, включаючи поведінкові [33, 41] та нейровізуалізаційні дослідження, що підкреслюють вплив на орбітофронтальну кору, медіальну префронтальну кору, мигдалеподібне тіло та смугасте тіло пришвидшуючи відповідні захисні реакції [35, 42, 43]. В той же час довготривале використання респіратора збільшує тривожність і фізичне навантаження, що призводить до настання втоми, яка також відобразиться і на перевірених

когнітивних показниках. Тому можна, говорити, що короткочасне застосування респіратора не вплине на зазначені показники, але з часом, коли накопичиться достатній рівень втоми, погіршиться рівень уваги проявиться і ефект від носіння респіратора на когнітивних показниках [44, 45].

Можна припустити, що на отримані показники має вплив певне нервово збудження, яке могло б поліпшити увагу учасників, і поліпшити концентрацію при виконанні завдань. Так, обмеження поля зору та фокусування погляду пов'язані з різними впливами, що викликають стрес. Цілком можливо, що звуження поля зору при носінні респіратора покращує зорову увагу, відсіюючи сигнали від периферичного зору, дозволяючи краще зосередитися [46].

Той факт, що дане дослідження не виявило істотного впливу носіння респіратора на когнітивні показники, не доводить, що інші фактори експерименту можуть перешкодити спостереженню за такими вимірами. Тривалість тестового періоду при безперервному носінні респіратора може бути недостатньо тривалою, щоб виявити вплив на вимірювання когнітивних показників [47].

Однією з причин, яка може пояснити більш швидку реакцію у чоловіків у порівнянні з жінками при носінні респіратора, є кращий рівень уваги, через відповідний рівень мотивації, який проявлявся у суперництві за кращий результат, тоді як у жінок подібні виклики були відсутні. У жінок відзначається збільшення часу реакції при носінні респіратора (для всіх завдань, де визначався час реакції) хоча вона і не була статистично значущою. Також можливо, що на результати міг вплинути нерівномірність досвіду носіння респіратора до початку дослідження. Але апостеріорний аналіз показав, що досвід носіння не зробив істотного впливу на виявлену різницю в часі реакції у учасників різної статі. Цей результат узгоджується з результатом, отриманим у роботі [48, 49].

Таким чином, можна прогнозувати, що використання лицевої частини у формі капюшону в конструкції фільтрувального респіратора зокрема моторового зменшить рівень стресу та тривожності для користувача.

2.6 Оцінювання впливу захисного капюшона на зручність комунікації

Комунікація під час евакуації чи виконанні будь-якого виробничого завдання являється основним джерелом передачі потрібної інформації. Виникає питання щодо оцінювання впливу захисного капюшона, а також будь-яких фільтрувальних респіраторів на її спотворення чи зниження розбірливості мовлення, зокрема під час розмови по телефону [50].

Для реалізації поставленої задачі необхідно було виконати такі завдання:

- розробити методику оцінки розбірливості слів при використанні мобільного телефону в умовах носіння захисного капюшона і фільтрувальних респіраторів;
- визначити ступінь зниження чіткості мовлення через визначення рівня чіткості промовляння та рівня потужності звуків;
- проаналізувати вплив гучності та темпу мовлення на якість розбірливості слів у респіраторах.

У дослідженні взяли участь 20 студентів НТУ «Дніпровська політехніка» віком від 18 до 22 років (по 10 чоловіків і жінок). Попередньо всі учасники пройшли короткий тест на перевірку володіння українською мовою [51]. Кожен із них письмово погодився на участь у випробуваннях і підтвердив відсутність медичних протипоказань чи проблем зі слухом.

Під час експерименту для оцінки розбірливості мовлення в умовах носіння респіратора та спілкування через мобільний телефон учасникам

пропонувалося відтворювати ключові слова з тесту С. Рубінштейна для перевірки пам'яті.

У дослідженні використовувались дві моделі фільтрувальних капюшонів, а саме «Пульс» виробництва ТОВ «КАЛПСО 2015» та модель ХНЗЛС-40 виробництва Jiangshan Kexing Fire Equipment Co, Ltd, КНР, а також експериментальна модель капюшону до моторового фільтрувального респіратора (рис. 2.14). Додатково використовували мобільний телефон «Xiaomi Redmi 9 4/64GB» (163,32×77,01 мм), ноутбук «Huawei Mate Book D 14 AMD» та аналізатор спектра шуму WALCOM SL-5868F.

Експериментальні дослідження проводилися у два етапи. На першому етапі учасники спілкувалися за допомогою мобільного телефону, який тримали біля вуха як промовець, так і слухач. На другому етапі телефон переводився у режим гучного зв'язку та розташовувався на відстані 50 см від випробувача. Протягом усього експерименту обидва учасники (промовець і слухач) перебували у капюшонах однієї моделі.

Після проведення короткого інструктажу учасників поділили на 10 пар (по 2 особи: промовець та слухач). Вони по чергові розміщувалися у двох різних приміщеннях, що виключало можливість чути одне одного без телефону. Кожному учаснику надавався перелік із десяти однакових ключових слів, запозичених із тесту С. Рубінштейна для перевірки пам'яті [52]. Тестування виконували послідовно всі групи. Перед початком дослідження проводилося коротке тренування, під час якого відпрацьовувалася гучність мовлення (65–68 дБ), темп вимови та правильність виконання процедури.

У кожному приміщенні знаходилися мобільний телефон і ноутбук. На екрані ноутбука промовця випадковим чином відображалися слова, які він, перебуваючи у респіраторі, передавав слухачеві через мобільний телефон (рис. 2.23). Почувши слово, слухач повторював його у відповідь. Якщо вимова була правильною, промовець підтверджував це та робив позначку в

таблиці на екрані ноутбука (табл. 2.13). У разі помилки промовець повідомляв слухачеві, що слово відтворене невірно.



Рисунок 2.23 – Експериментальне дослідження впливу капюшону на розбірливість слів: 1 – випробувач; 2 – мобільний телефон; 3 – випробуваний капюшон; 4 – шумомір; 5 – ноутбук

Протягом тестування з промовляння слів контролювали гучність голосу випробувача за допомогою шумоміру (аналізатор спектра шуму WALCOM SL-5868F), який знаходився у діапазоні 65–75 дБ та темпом промовляння 100–110 слів/хв. Якщо голосове повідомлення виходило за встановлений діапазон, навчальне слово замінювалося іншим. Після промовляння всіх слів учасники мінялися ролями: слухач ставав промовцем. Другий учасник отримував інший набір із десяти слів, які з'являлися на екрані комп'ютера, і процедура розпізнавання слів повторювалася за тією ж схемою.

Таблиця 2.13 – Зразок внесення даних до таблиці для оцінювання зниження якості мовлення промовця у фільтрувальному респіраторі під час розмови по мобільному телефону

Ключове слово	Гучність промовляння промовцем, дБ	Позначка про відповідне сприйняття ключового слова слухачем	
		правильно	не правильно
пес	65	+	
ложка	66	+	
лялька	65	+	
цукерка	68		-
годинник	67	+	

Після того як усі учасники пройшли описану процедуру, дослідження було продовжено зі зміною темпу мовлення: швидкого з інтенсивністю 150–160 слів/хв. та повільного з інтенсивністю 50–60 слів/хв. Додатково провели випробування, щоб визначити вплив гучності вимови слів у межах від 40 дБ до 80 дБ за умови нормального темпу мовлення.

Величину погіршення рівня промовляння $Q_{\text{пог}}$ у фільтрувальному респіраторі встановлювали за формулою:

$$Q_{\text{пог}} = \left(1 - \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{p_p}\right) 100 \%,$$

де N – кількість учасників дослідження, чол; p_i – кількість правильно зрозумілих слів слухачем, од; p_p – загальна кількість слів, яка вимовлялась одним промовцем, од.

Дві моделі фільтрувальних капюшонів, а саме «Пульс» виробництва ТОВ «КАЛПСО 2015» та модель ХНЗLC-40 виробництва Jiangshan Kexing Fire Equipment Co, Ltd, КНР (рис. 2.24) конструктивно є подібними, проте використовуються різні захисні матеріали самого капюшону.



а)



б)

Рисунок 2.24 – Фільтрувальні капюшони: а – «Пульс»; б – ХНЗЛС-40

Капюшон «Пульс» виготовляється з вогнестійкої полімерної силіконової тканини, яка має високу термостійкість, еластичність та здатність витримувати дію агресивних середовищ. Модель ХНЗЛС-40 виконана з алюмінієвого вогнестійкого матеріалу, що відзначається підвищеною відбивною здатністю теплового випромінювання. Це дозволяє ефективніше захищати користувача від дії відкритого полум'я та інтенсивного теплового потоку, хоча такий матеріал є менш гнучким у порівнянні з силіконовою тканиною. Обидва капюшони оснащені фільтрувально-поглинальними елементами, призначеними для очищення вдихуваного повітря від шкідливих газів і диму (табл. 2.14). Відмінністю даних моделей від експериментального зразка є принцип подачі повітря до підмаскового простору, який є всмоктувального типу на відміну від експериментальної моделі, у якій виконується примусове нагнітання повітря.

Таблиця 2.14 – Порівняльна таблиця матеріалів для виготовлення фільтрувальних капюшонів

Параметр	Вогнестійка полімерна силіконова тканина	Алюмінієвий вогнестійкий матеріал
Температуростійкість	до +250 °С (короткочасно до 300 °С)	відбиває до 90–95% теплового випромінювання, робоча температура до +600 °С
Механічна міцність	Висока гнучкість, стійкість до розтягування й проколів	Менш еластичний, можливе ламання при багаторазовому згинанні
Вага	Легкий матеріал, зручний для тривалого носіння	Важчий, підвищує навантаження на користувача
Хімічна стійкість	Добра стійкість до більшості кислот, лугів, масел	Менш стійкий до корозії
Термін служби	Довговічний при нормальних умовах експлуатації	Швидше зношується при механічних діях (подряпини, згини)
Використання	Хімічний захист, пожежні роботи, промисловість	Захист від відкритого полум'я та сильного теплового випромінювання (металургія, пожежогасіння)

Конструкція фільтрувальних капюшонів представлена на рис. 2.25. Дане конструктивне виконання є найбільш поширеним.



Рисунок 2.25 – Конструкція фільтрувального захисного капюшона:

1 – захисний капюшон; 2 – панорамне скло; 3 – фільтр; 4 – герметизуюча манжета; 5 – клапан видиху

У таблиці 2.15 наведено результати оцінювання зниження розбірливості мовлення для кожної з моделей капюшонів. Аналіз отриманих даних показує, що вплив досліджуваних капюшонів на мовлення є суттєвим і становить від 18 % до 35 %, які знаходяться в межах статистичної похибки.

Таблиця 2.15 – Результати визначення величини погіршення розбірливості мовлення для випробуваних моделей капюшонів

Модель капюшону	Величина розбірливості мови без капюшону, %	Величина розбірливості мови з одягненим капюшоном на обличчі промовця, %		Середня величина розбірливості мови у капюшоні, %
		на гучномовці	біля вуха	
«Пульс»	98±0,14	68±0,47	75±0,44	71
XNZLC-40		61±0,49	69±0,46	65
Експериментальний зразок		79±0,41	85±0,39	82

Для порівняння було визначено розбірливість мовлення без використання капюшону, яка становила 98,0 %. При носінні капюшону цей показник знижувався до 61-68 % при спілкуванні через мобільний телефон у режимі гучномовця та до 69-75 % коли телефон прикладали до вуха для моделей, що виготовляються серійно. Для експериментального зразка величина розбірливості мови з одягненим капюшоном знижувалась до 79 % при спілкуванні через мобільний телефон у режимі гучномовця та до 85 % коли телефон прикладали до вуха для моделей.

На рис. 2.26 наведено усереднені дані щодо величини розбірливості мовлення у капюшонах різних моделей і без них при спілкуванні через мобільний телефон. Аналізування результатів дослідження доводить, що промовляння користувачем при використанні капюшону призводить до погіршення розбірливості слів до 40 %.

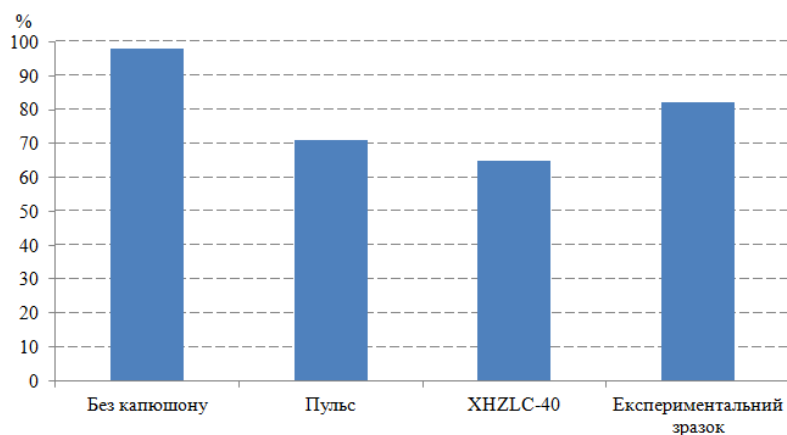


Рисунок 2.26 – Величина розбірливості мовлення без використання і з використанням капюшону різних моделей при спілкуванні через мобільний телефон

Наступним етапом було вивчення впливу гучності мовлення на його розбірливість під час розмови в капюшоні по мобільному телефону. Результати подано на рис. 2.27. За результатами тестування бачимо, що зі збільшенням гучності вимови слів їх розбірливість підвищується, однак при 70 дБ показник, як і для фільтрувальних півмасок, стабілізується та майже не змінюється. Подальші випробування при рівнях понад 80 дБ не проводилися з міркувань безпеки, оскільки перевищення цього порога може негативно впливати на слух.

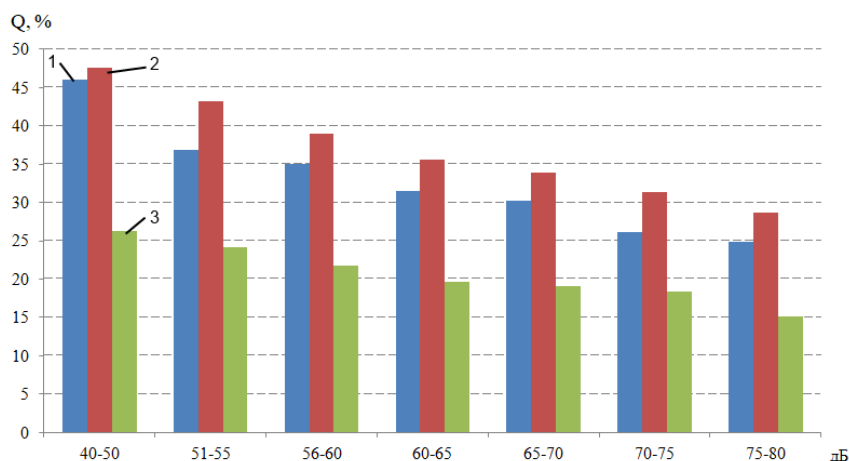


Рисунок 2.27 – Величина погіршення розбірливості слів у капюшоні виходячи із гучності промови: 1 – «Пульс»; 2 – XHZLC-40; 3 – експериментальний зразок

Встановлено, що темп промовляння слів також впливає на розбірливість слів й при використанні капюшону (рис. 2.28). Можна зробити припущення, що низький темп промовляння слів (50–60 слів/хв.) є найкращим для сприйняття. Збільшення інтенсивності промовляння погіршує розбірливість слів через наявність підмасочника, який заважає мимічним рухам користувача.

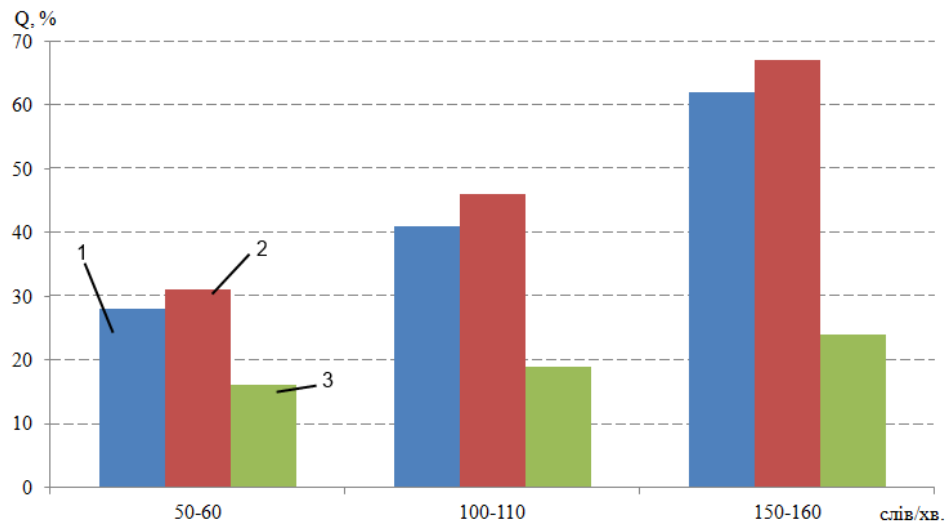


Рисунок 2.28 – Величина погіршення розбірливості слів у капюшоні виходячи із темпу мовлення та гучності 65-75 дБ:

1 – модель «Пульс»; 2 – модель XNZLC-40; 3 – експериментальний зразок

Як і очікувалось, носіння капюшонів знижує розбірливість мовлення до 50 % при гучності 65–75 дБ та темпі 100–110 слів/хв., що може бути зумовлено властивостями матеріалу з якого вони зроблені та наявності внутрішнього підмасочника. Водночас цей показник покращується за рахунок підвищення гучності та зменшення темпу мовлення. За результатами експерименту встановлено, що вплив фільтрувальних капюшонів на розбірливість мовлення під час розмови через мобільний телефон суттєвим і становить до 35 % залежно від типу капюшону, що зумовлено наявністю повністю закритого обличчя користувача та підмасочника. [53, 54]. Відмінність отриманих результатів від даних інших авторів пояснюється тим, що в нашому дослідженні було чітко сформульовано методику оцінювання розбірливості за допомогою набору із десяти ключових слів зі списку С.

Рубінштейна, використаних під час розмови по мобільному телефону. Натомість експериментальний зразок капюшону, в конструкції якого відсутній підмасочник, рівень якості передачі слів на високому рівні, де зниження на рівні 19 % при гучності 65–75 дБ та темпі 100–110 слів/хв.

На відміну від легких фільтрувальних респіраторів в конструкції капюшонів використовуються матеріали з більшою поверхневою щільністю (до 500 г/м²) та ефектом ізолювання від навколишнього середовища, що також значно знижує ефективність та розбірливість передачі звуків користувачем.

Проведені дослідження свідчать, що форма фільтрувального респіратора відіграє важливу роль. Капюшони мають форму сфери з панорамним склом в середині якої знаходиться підмасочник, дизайн та матеріал підмасочника значно впливають та обмежують на мімічні рухи користувача.

Тому доцільно передбачати в інструкціях з експлуатації ЗІЗОД рекомендації щодо оптимальної гучності та темпу мовлення, адже користувачеві необхідно адаптуватися до умов промови в респіраторі.

Для забезпечення максимальної розбірливості пропонуємо звернути увагу на два можливі шляхи, що дозволять зберегти якість мовної комунікації навіть у шумному середовищі:

- застосування переговорних мембран та електронних пристроїв у конструкції респіраторів;
- використання альтернативної (наприклад, письмової) передачі інформації у випадках, коли вербальна комунікація ускладнена.

Водночас проведене дослідження має обмеження, оскільки не визначалося погіршення звукопередачі в октавних смугах, що у майбутньому дозволило б більш раціонально підбирати товщину та щільність фільтрувальних шарів для виготовлення респіраторів, забезпечуючи не лише належний захист, але й мінімальний вплив на розбірливість мовлення.

Подальші дослідження будуть спрямовані саме на вивчення коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів, що застосовуються у фільтрувальних півмасках.

Таким чином, в конструкції лицевої частини універсального респіратора має бути передбачено використання засобів для спілкування між користувачем та персоналом, що знаходиться поруч.

2.7 Оцінювання впливу захисного капюшона на працездатність користувачів

Визначення взаємозв'язку між опору диханню працівників, які використовують фільтруючі респіратори, та його працездатністю становить значний інтерес. Дані залежності є дуже важливими для розробки, проектування та вдосконалення фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання. Тому виникає завдання у визначенні впливу конструктивних параметрів капюшонів респіраторів на працездатності людини.

Тестування проводилось у випробувальній лабораторії засобів індивідуального захисту ТОВ «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ» (м. Дніпро, Україна) в формі експлуатаційних випробувань. Випробувачі виконували наступні вправи:

- випробування у стані спокою, без виконання будь-якої роботи, випробувач знаходиться сидячи у зручному положенні протягом 5 хв. без респіратора;
- ходьба в капюшоні по горизонтальній поверхні у повний зріст із постійною швидкістю від 2 км/год. протягом 10 хв.;
- ходьба в капюшоні по горизонтальній поверхні у повний зріст із постійною швидкістю від 4 км/год. протягом 10 хв.;
- ходьба в капюшоні по горизонтальній поверхні у повний зріст із постійною швидкістю від 6 км/год. протягом 10 хв.;

Випробуваними зразками були дві моделі капюшонів фільтрувальних респіраторів, а саме «Пульс» виробництва ТОВ «КАЛІПСО 2015» (рис. 2.24) та експериментальна модель капюшону до моторового фільтрувального респіратора (рис. 2.14).

Для проведення тестування було залучено 5 випробувачів чоловічої статі віком від 18 до 45 років, які є працівниками та здобувачами НТУ «Дніпровська політехніка» та відношення до результатів випробувань не мали, щоб усунути вплив достовірності результатів. На етапі затвердження списку випробувачів, які брали участь у тестуванні, проводилося опитування щодо їхнього стану здоров'я, можливих нещодавніх медичних втручань чи перенесених захворювань. У разі позитивних результатів таких осіб допускали до участі. Перед початком випробувань учасників ознайомлювали з процедурою та навчали правилам користування респіраторами. Тестування було добровільним, а випробувачі підтверджували згоду підписанням відповідного документа, яким також засвідчували відсутність претензій до організаторів.

Випробування виконували на електричній біговій доріжці MaxxPro 502 (MaxxPro, Китай), що здатна підтримувати сталу швидкість руху випробувача з точністю до 0,1 км/год. (діапазон швидкості від 0,8 до 8,0 км/год.) та вимірювати пульс людини в режимі реального часу з точністю до ± 1 уд/хв. (рис. 2.29). Час проведення випробувань кожного етапу досліджень становив 10 хв., при цьому дані з дисплею реєструвались з періодичністю 1 хв. з похибкою до 10 секунд.



Рисунок 2.29 – Загальний вигляд дисплею бігової доріжки MaxxPro 502

Тестування на біговій доріжці виконувалось у випробувальній камері, в якій на рівні 2 метрів встановлені вентилятори для створення руху повітря в середині камери та зниження теплового навантаження на випробувача під час ходіння, при цьому не впливаючи на лицеву частину. Температура з точністю до $\pm 0,1$ °C (достовірність вимірювання $\pm 0,3$ °C) та відносна вологість повітря з точністю до ± 1 % (достовірність вимірювання ± 2 %) в камері реєструвались за допомогою електронного термогігрометра TFA модель № 35.1102.02 (TFA, Німеччина).

В подальшому після випробувань за допомогою електронного пікфлоуметра PF100 (Microlife, Швейцарія) реєструвались дані щодо дихальної активності випробувача зокрема пікова швидкість видиху PEF та об'єм форсованого видиху за першу секунду FEV1. Показник PEF є чутливим індикатором змін прохідності дихальних шляхів та ефективності роботи дихальних м'язів, що дозволяє оцінювати стан випробувача після фізичного навантаження. Вимірювання FEV1 після випробувань дозволяє оцінити ступінь відновлення функціонального стану дихальної системи, зокрема прохідність бронхів і ефективність роботи дихальних м'язів. Після закінчення вправ та зняття респіратора у випробувача проводили спірометричне обстеження. Вимірювання проводили в положенні стоячи. Кожен учасник після глибокого вдиху здійснював три максимальні різкі видихи, дані реєструвались приладом PF100 та виводились на його дисплей. Для подальшого аналізу використовувалось усереднене значення трьох спроб.

Усі результати випробувань реєструвались в паперовій формі та переносились у цифрову базу. Для обробки експериментальних даних використовувалась програма Microsoft Excel 365. Результати експериментальних даних осереднювались з оцінкою невизначеності вимірювань при $P < 0.05$ відповідно до Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. - JCGM 100:2008 [8]. Обробка

експериментальних даних та побудова апроксимаційних кривих здійснювалася в програмному продукті Microsoft Excel 365.

Після кожного випробування добровольцями заповнювався чек-лист з визначення комфортності (рис. 2.30), який дозволив оцінити суб'єктивне сприйняття капюшону за кількома критеріями: опір диханню, втомлюваність, вплив на увагу та зосередженість. Такий підхід забезпечує комплексність дослідження, оскільки поєднує об'єктивні вимірювані параметри (пульс) із суб'єктивним відчуттям користувача.

**ОПИТУВАЛЬНИК КОМФОРТНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
РЕСПІРАТОРА***

Дані респондента та умови випробування:

ПІБ: _____

Стать: ☐ Ч / ☐ Ж / ☐ Інша _____

Вік: _____ років

Довід використання ЗІЗОД: ☐ немає ☐ <1 року ☐ 1-5 років ☐ >5 років

Тип респіратора (марка, модель, клас захисту): _____

Температура середовища: _____ °C

Вологість середовища: _____ %

Пulс у стані спокою: _____ уд./хв.

* Оберіть один варіант відповіді у кожному пункті

1. Оцініть опір диханню під час роботи в респіраторі?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Дуже легко дихати							
☐ Легко дихати							
☐ Середній рівень зусиль							
☐ Важко дихати							
☐ Дуже важко дихати							

2. Оцініть температуру повітря під маскою?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Комфортна							
☐ Трохи підвищена, але не заважає							
☐ Відчутно тепліша, викликає дискомфорт							
☐ Дуже висока, важко дихати							
☐ Неприємна, використання неможливе							

3. Оцініть вологість повітря під маскою?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Комфортна, не відчувалась							
☐ Незначна, не заважала							
☐ Помітна, викликала дискомфорт							
☐ Висока, заважала роботі							
☐ Дуже висока, використання неможливе							

4. Чи обмежував респіратор ваші рухи або концентрацію?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Не обмежував							
☐ Мінімально							
☐ Помірно							
☐ Значно							
☐ Повністю заважає							

5. Загальне ставлення після носіння респіратора

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Комфортно, можу працювати довго							
☐ Легкий дискомфорт							
☐ Помірний дискомфорт							
☐ Сильний дискомфорт							
☐ Нестерпно, хочеться зняти							

Рисунок 2.30 – Форма опитувального чек-листа

Застосування п'ятибальної шкали дає змогу здійснити подальший кількісний аналіз, зокрема обчислення середніх значень та виявлення кореляцій між фізіологічними показниками та суб'єктивним відчуттям дискомфорту. Це підвищує достовірність отриманих результатів і створює основу для формування комплексної оцінки ефективності капюшону, яка враховує не лише рівень захисту, а й комфортність, що безпосередньо впливає на надійність та працездатність користувача. Критерії оцінювання за чек-листом наведено в таблиці 2.16.

Таблиця 2.16 – Критерії оцінки чек-листа щодо комфортності капюшону

Критерій оцінки	5 – добре	4 - незначно	3 – помірно	2 - погано	1 – критично
1. Опір диханню (ОД)	Дуже легко дихати	Легко дихати	Середній рівень зусиль	Важко дихати	Дуже важко дихати
2. Температура в капюшоні (ТП)	Комфортна	Трохи підвищена, але не заважає	Відчутно тепло, викликала дискомфорт	Дуже висока, дихати важко	Неприйнятно, використання неможливе
3. Вологість в середині капюшону (ВП)	Комфортна, не відчувалась	Незначна, не заважала	Помітна, викликала дискомфорт	Висока, заважала роботі	Дуже висока, використання неможливе
4. Обмеження рухів (ОР)	Не обмежував	Мінімально	Помірно	Значно	Повністю заважав
5. Загальне ставлення (ЗС)	Комфортно, може працювати тривалий час	Легкий дискомфорт	Помірний дискомфорт	Сильний дискомфорт	Нестерпно, хочеться зняти

Після заповнення чек-листа розраховувався середній бал по кожному критерію та робилась усереднена загальна оцінка комфортності капюшону (табл. 2.17 та 2.18). Оцінка комфортності дозволила проаналізувати ергономічність та зручність у використанні капюшонів, що характеризує навантаження на органи чуття та дихальну систему користувача.

Таблиця 2.17 – Оцінка комфортності капюшону «Пульс» випробувачами

Дії випробувача	Показник, що оцінювався					
	ОД	ТП	ВП	ОР	ЗС	Середнє за дією
сидячи	4,6	5,0	5,0	5,0	4,0	4,7 ± 0,44
2 км/год*	4,0	4,8	5,0	4,0	4,0	4,4 ± 0,50
4 км/год*	3,8	4,2	4,8	3,8	3,2	4,0 ± 0,59
6 км/год*	3,4	4,0	4,4	3,4	3,0	3,6 ± 0,55
Середнє за показником	4,0±0,50	4,5±0,48	4,8±0,28	4,1±0,68	3,6±0,53	

Таблиця 2.18 – Оцінка комфортності експериментального зразка капюшону випробувачами

Дії випробувача	Показник, що оцінювався					
	ОД	ТП	ВП	ОР	ЗС	Середнє за дією
сидячи	5,0	5,0	5,0	5,0	4,8	$5,0 \pm 0,09$
2 км/год*	5,0	5,0	5,0	5,0	4,2	$4,8 \pm 0,36$
4 км/год*	4,4	4,8	5,0	4,4	4,0	$4,5 \pm 0,39$
6 км/год*	4,0	4,0	4,4	4,0	4,0	$4,1 \pm 0,18$
Середнє за показником	$4,6 \pm 0,49$	$4,7 \pm 0,48$	$4,9 \pm 0,30$	$4,6 \pm 0,49$	$4,3 \pm 0,38$	

Результати зміни пульсу протягом часу випробування в капюшонах представлені на рисунках 2.31а та 2.31б.

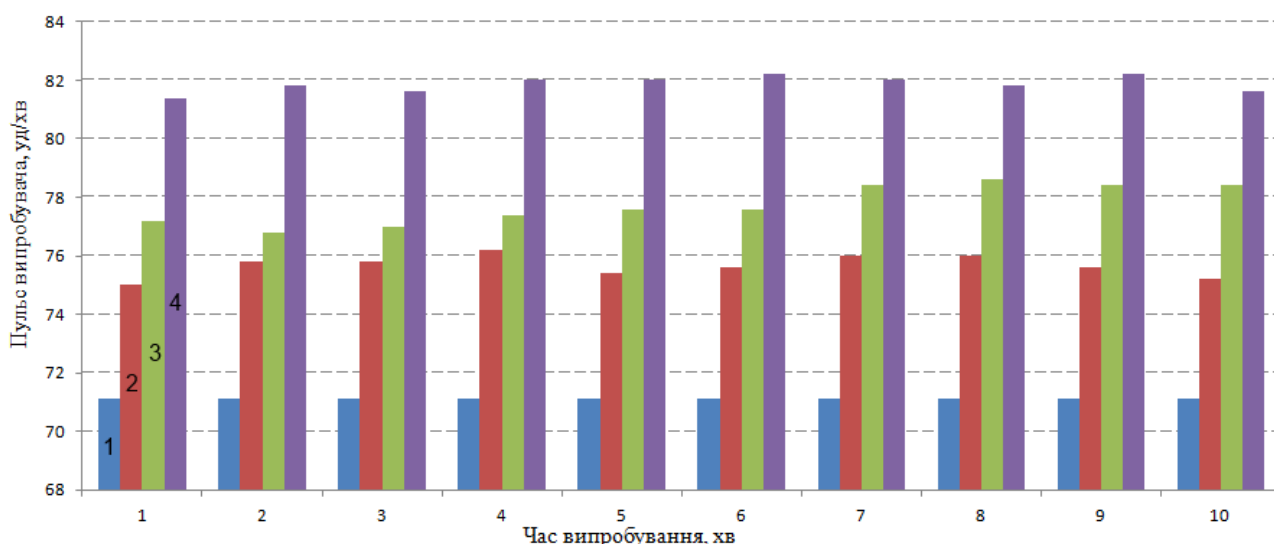


Рисунок 2.31а – Зміна пульсу випробувача в капюшоні «Пульс», уд./хв., протягом часу випробувань: 1 – у стані спокою; 2 – рух по біговій доріжці зі швидкістю 2 км/год.; 3 – рух по біговій доріжці зі швидкістю 4 км/год.; 4 – рух по біговій доріжці зі швидкістю 6 км/год.

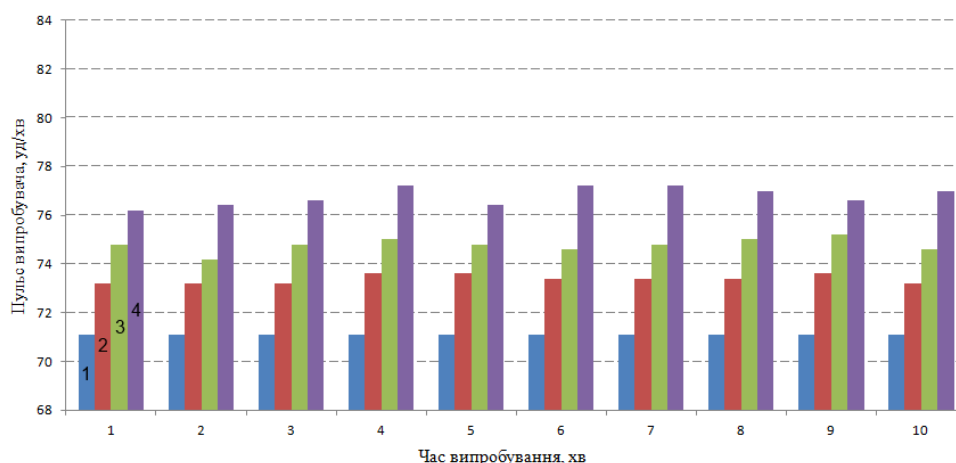


Рисунок 2.31б – Зміна пульсу випробувача в експериментальній моделі капюшону, уд./хв., протягом часу випробувань: 1 – у стані спокою; 2 – рух по біговій доріжці зі швидкістю 2 км/год.; 3 – рух по біговій доріжці зі швидкістю 4 км/год.; 4 – рух по біговій доріжці зі швидкістю 6 км/год.

За рисунками бачимо, що експериментальна модель капюшону менше навантажує органів людини, що відображається в незначному підвищенні рівня пульсу випробувачів зокрема в середньому до 6 уд./хв. за швидкості 6 км/год., на відміну від капюшону «Пульс», де таке збільшення частоти пульсу становить до 10-11 уд./хв. за швидкості 6 км/год.

Результати експлуатаційної оцінки капюшонів випробувачами за різної швидкості руху при виконанні дій показані на рисунку 2.32.

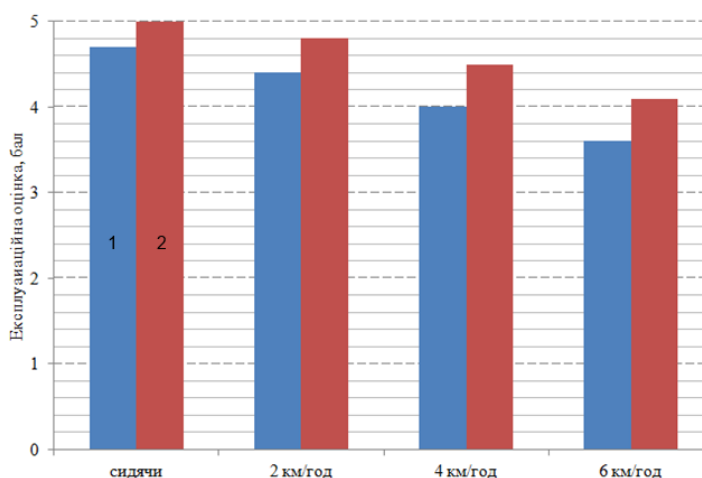


Рисунок 2.32 – Результати експлуатаційної оцінки капюшонів за різної швидкості виконання дій: 1 – капюшон «Пульс»; 2 – експериментальна модель капюшону

Результати експлуатаційної оцінки вказують, що експериментальна модель капюшону краще сприймається користувачами від звичайного капюшону, що зумовлено конструктивним особливостями, оскільки на стадії проєктування були враховані ергономічні та антропометричні параметри користувачів. Зауваження та зниження загального рівня оцінки стосувались через збільшення ваги та габаритних розмірів на відміну від капюшону «Пульс», проте високо були оцінені опір диханню, температура та відносні вологість повітря в підмасковому просторі.

Результати щодо відновлення випробувачів після тестування в капюшонах та оцінка впливу моделей капюшонів на працездатність випробувача показані на рисунках 2.33 та 2.34.

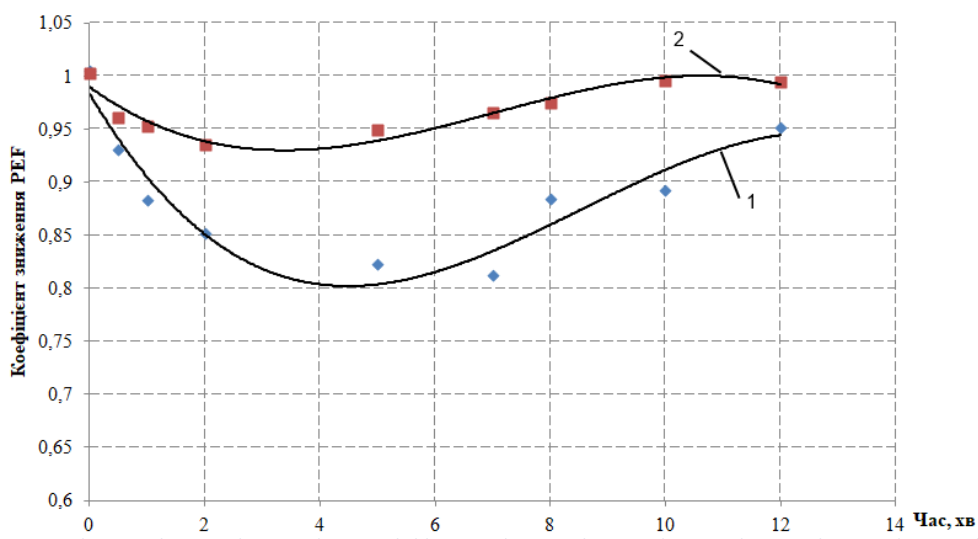


Рисунок 2.33 – Залежність коефіцієнту зниження РЕФ від часу релаксації після проведення випробувань в капюшонах за швидкості 6 км/год.: 1 – капюшон «Пульс»; 2 – експериментальна модель капюшону

Коефіцієнт зниження РЕФ визначався як співвідношення середнього значення РЕФ в певний час після випробувань до середнього значення РЕФ до початку випробувань, що був виміряний після навантаження без капюшону.

Результати дослідження показали, що на початковому етапі коефіцієнт зниження РЕФ для обох капюшонів становив близько 1,0, що відповідає відсутності зниження показника відносно вихідного рівня. Це може

пояснюватись інерційністю дихальної системи людини, яка була налаштована на опір диханню, що створювався елементами капюшону. У подальшому протягом перших 4-5 хв. спостерігалось зменшення коефіцієнта, яке мало різну інтенсивність залежно від умов експерименту. Для капюшону «Пульс» зниження було більш вираженим і досягало мінімального значення близько 0,8, тоді як у експериментального зразка воно не опускалося нижче рівня 0,93–0,94.

Після досягнення мінімуму в обох серіях відзначено поступове відновлення показників. Для капюшону «Пульс» відновлення відбувалося повільніше і на 12-й хвилині контролювання коефіцієнт зниження PEF сягав лише 0,9–0,92, що свідчить про неповне повернення до вихідного стану. У експериментального зразка капюшону відновлення було більш швидким та ефективним, до кінця часу контролювання (12 хв.) значення коефіцієнта практично повністю відновлювалося до вихідного рівня ($\approx 1,0$).

Тож, використання експериментального зразка капюшону виявилось менш обтяжливими для функції дихання, забезпечуючи менший ступінь зниження PEF та швидше відновлення показників у динаміці.

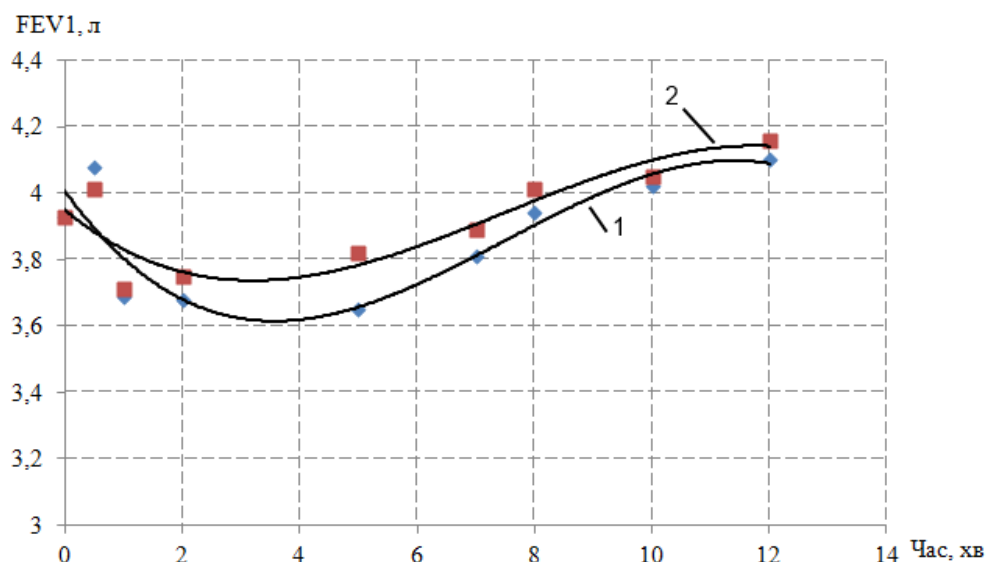


Рисунок 2.34 – Залежність об'єму видиху FEV1 від часу релаксації після проведення випробувань в капюшонах за швидкості 6 км/год.: 1 – капюшон «Пульс»; 2 – експериментальна модель капюшону

Аналіз динаміки об'єму форсованого видиху за 1 секунду (FEV1) показав, що у вихідному стані значення показника в обох капюшонів було близьким до 4,0 л. У перші 4 хв. релаксації спостерігалось зниження FEV1, причому у капюшоні «Пульс» воно було більш вираженим і досягало мінімуму близько 3,6 л. Для експериментального зразка капюшону падіння показника було менш глибоким, не нижче рівня 3,75 л.

Подальші вимірювання продемонстрували поступове відновлення функціональних параметрів дихання. У капюшоні «Пульс» відновлення відбувалося повільніше, тому на 12-й хвилині контролювання FEV1 становив близько 4,05 л, що свідчить про неповне повернення до початкового рівня. Натомість використання експериментального зразка капюшону забезпечило швидше і більш повне відновлення. Так, до кінця дослідження значення FEV1 зросло майже до 4,2 л, перевищивши вихідний рівень. Отже, експериментальний зразок капюшону продемонстрував менший негативний вплив на функцію зовнішнього дихання та сприяв швидшому відновленню показників FEV1 у порівнянні з капюшоном «Пульс».

Синусоподібний характер динаміки показників FEV1 та PEF можна пояснити особливостями фізіологічної адаптації дихальної системи до зміни умов зовнішнього дихання. На початковому етапі після зникнення додаткового опору, створюваного респіратором, відбувається короткочасне зниження функціональних параметрів. Це зумовлено тим, що дихальні м'язи, які працювали в умовах підвищеного навантаження, тимчасово втрачають оптимальний тонус, що призводить до падіння об'ємних показників. У цей період спостерігається своєрідна «розбалансованість» дихальної системи.

Подальша фаза відновлення пов'язана з релаксацією м'язів, нормалізацією нервово-м'язової регуляції та поступовим переходом організму на режим без додаткового опору диханню. У результаті показники FEV1 та PEF повертаються до вихідних значень або навіть перевищують їх, що може свідчити про активацію компенсаторних механізмів та ефект після навантаження.

Водночас використання капюшонів із моторовими системами зокрема PAPR (Powered Air-Purifying Respirator) знижує або повністю усуває додатковий опір диханню. Це може мінімізувати початкове падіння показників та сприятиме більш плавному переходу дихальної системи до стабільного функціонування, зменшуючи вираженість синусоподібних коливань і покращуючи адаптаційні можливості організму.

Отримані результати дослідження капюшонів узгоджуються з наявними даними щодо впливу засобів індивідуального захисту органів дихання на працездатність. Встановлено, що додатковий опір диханню призводить до зниження функціональних показників дихання та може обмежувати фізичну працездатність [55]. У випадку використання традиційних респіраторів це проявляється значним падінням FEV1 і PEF на початкових етапах роботи та уповільненим відновленням показників.

Наші результати показали, що застосування експериментальних капюшонів, зокрема з використанням систем PAPR, забезпечує менший негативний вплив на дихальну функцію. Порівняно з капюшоном «Пульс» у експериментальних зразках відзначалося менш виражене зниження показників та швидше їх відновлення до вихідного рівня. Це свідчить про зменшення енергозатрат, зниження фізіологічного навантаження та кращу адаптацію організму при виконанні робіт.

Таким чином, використання капюшонів із системами PAPR може розглядатися як більш ефективний варіант захисту органів дихання, оскільки вони зменшують опір диханню, мінімізують накопичення вуглекислого газу в підмасковому просторі та сприяють підтриманню працездатності під час тривалого фізичного навантаження [56].

Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що короткострокове використання респіраторів за відсутності додаткових негативних факторів не погіршує когнітивні показники користувачів. Більше того, завдяки посиленню збудження відзначено тенденцію до скорочення часу прийняття рішень, хоча одночасно зменшується поле зору користувача. Це свідчить про відсутність додаткових когнітивних ризиків при застосуванні респіраторів у виробничій діяльності.

2. Запропоновано методику дослідження розбірливості слів у респіраторах під час використання мобільного телефону, що може застосовуватися для порівняльної оцінки при зміні моделей респіраторів. Визначено, що вплив різних типів фільтрувальних респіраторів на якість мовлення є незначним (2–11 %), проте залежить від щільності матеріалу та ступеня прилягання півмаски до обличчя. Показано, що у порівнянні з базовим рівнем розбірливості (98,5 %), використання респіратора знижує цей показник до 87–94 % при розмові на гучномовці та до 92–96 % при розташуванні телефону біля вуха.

3. Доведено, що на чіткість мовлення найбільше впливають гучність і темп промови. Оптимальним для сприйняття є середній темп (100–110 слів/хв.). Зменшення темпу у два рази покращує розбірливість на 4–5 %, тоді як збільшення гучності понад 70 дБ не призводить до суттєвих змін. Використання респіраторів знижує розбірливість до 10 %, проте ефект можна компенсувати регулюванням темпу і гучності промови. Додатково встановлено вплив форми респіратора на чіткість вимови, що пов'язано з обмеженням рухливості м'язів.

4. Запропоновано застосування лицевої частини респіратора у формі капюшону як перспективний напрямок удосконалення конструкції. Такий підхід дозволяє мінімізувати проблеми, пов'язані з нерівномірним розподілом зусиль наголовного гарнітуру, зменшити ризик утворення щілин по лінії обтюрації та забезпечити більш стабільний захисний ефект при

тривалому використанні. Крім того, лицева частина респіратору у форма капюшону підвищує комфорт користувача, оскільки знижує локальні тиски на ділянки шкіри та усуває контактні подразнення, характерні для традиційних гумових тасъм.

5. Теоретично та експериментально обґрунтовано параметри повітропроводу для подачі чистого повітря від моторового блоку до капюшона. Встановлено, що використання шланга з діаметром менше 32 мм не забезпечує ефективної подачі повітря через значні втрати потоку, зумовлені аеродинамічним тертям і підвищеною турбулентністю. Крім того, матеріал повітропроводу також істотно впливає на характеристики руху повітряних мас: найкращим матеріалом є силікон, який відзначається низькою шорсткістю внутрішньої поверхні та, відповідно, зменшеним аеродинамічним опором.

Результати досліджень представлені в даному розділі опубліковані в [21], [25], [36], [49], [50].

Література до розділу 2

1. Saha A. K., Jahin M. A., Md. Rafiquzzaman, Mridha M. F. Ergonomic design of computer laboratory furniture: Mismatch analysis utilizing anthropometric data of university students. Heliyon. 2024. Vol. 10, Issue 14. e34063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34063> (дата звернення: 15.10.2025).
2. Birgersson E., Tang E. H., Lee W. L. J., Sak K. J. Reduction of Carbon Dioxide in Filtering Facepiece Respirators with an Active-Venting System: A Computational Study. PLOS ONE. 2015. Vol. 10(6). e0130306. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130306> (дата звернення: 15.10.2025).
3. Luo C., Jin J. Design Feature Analysis and Pilot Ergonomic Evaluation for Protective Fire Gear. Procedia Engineering. 2012. Vol. 43. P. 374–378. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.065> (дата звернення: 15.10.2025).

4. López-Rebollar B. M., Posadas-Bejarano A., García-Pulido D., Torres-Maya A., Díaz-Delgado C. Proposal of a Mask and Its Performance Analysis with CFD for an Enhanced Aerodynamic Geometry That Facilitates Filtering and Breathing against COVID-19. *Fluids*. 2021. Vol. 6. 408. URL: <https://doi.org/10.3390/fluids6110408> (дата звернення: 15.10.2025).

5. Bazaluk O., Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Lozynskyi V., Knysh I., Saik P., Naumov M. Development of a Dust Respirator by Improving the Half Mask Frame Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18(10). 5482. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482> (дата звернення: 15.10.2025).

6. Wakjira Y., Kurukkal N. S., Lemu H. G. Assessment of the accuracy of 3D printed medical models through reverse engineering. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(11). e31829. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31829> (дата звернення: 15.10.2025).

7. Caskey S., Ho C. K., Burnett L. C., Jouravel N., Branda C., Fruetel J. A. Computational Fluid Dynamics Simulations to Assess Spatial Variability and Optimal Ventilation Scenarios for Biological Laboratory Exposures. *Applied Biosafety*. 2023. Vol. 28(4). P. 256–264. URL: <https://doi.org/10.1089/apb.2023.0001> (дата звернення: 15.10.2025).

8. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology. France, 2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (дата звернення: 15.10.2025).

9. PVC vs. Polyurethane: A Tubing Comparison. URL: <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/21705-pvc-vs-polyurethane-a-tubing-comparison> (дата звернення: 15.10.2025).

10. Selection Of Medical Tubing Materials: Silicone Vs. PVC, PU, PE, Rubber. URL: <https://www.medicalsiliconetube.com/selection-of-medical-tubing-materials-silicone-vs-pvc-pu-pe-rubber.html> (дата звернення: 15.10.2025).

11. ІНТЕРГУМА 2019: каталог продукції. Київ : Інтергума, [б. р.]. 79 с.
12. Wong J. Y., Lim W. W., Cheung J. K., Murphy C., Shiu E. Y. C., Xiao J., Chen D., Xie Y., Li M., Xin H., Szeto M., Choi S., Cowling B. J. Non-pharmaceutical interventions to reduce influenza transmission in households: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Infectious Diseases*. 2025. Vol. 150. 107291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2024.107291> (дата звернення: 15.10.2025).
13. Sokolowski S. L., Zou Y., Searcy J. Workflow Analysis To Understand Ease of Preparation and Importation of 3D Exemplar Head Scan Data to 3D Modeling Software Programs for N95 Mask Sizing and Fit. *International Textile and Apparel Association Annual Conference Proceedings*. 2022. Vol. 78(1). URL: <https://doi.org/10.31274/itaa.13487> (дата звернення: 15.10.2025).
14. Liao Y. H., Bhattacharya A., Ayer H., Miller C. Determination of critical anthropometric parameters for design of respirators. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1982. Vol. 43(12). P. 897–899. URL: <https://doi.org/10.1080/15298668291410774> (дата звернення: 15.10.2025).
15. Cheberyachko S., Cheberyachko Y., Naumov M., Deryugin O. Development of an algorithm for effective design of respirator half-masks and encapsulated particle filters. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2022. Vol. 28(2). P. 1145–1159. URL: <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1869429> (дата звернення: 15.10.2025).
16. Yu M., Griffin L., Durfee W. K., Arnold S. Face anthropometry for filtering facepiece respirators: analysis of the association between facial dimensions and respirator fit. *Annals of Work Exposures and Health*. 2024. Vol. 68(3). P. 312–324. URL: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae005> (дата звернення: 15.10.2025).
17. Lee W., Lee B., Yang X., You H. A Method for Generation of a Sizing System and Representative Models for a Facial Mask Design. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(23). 12387. URL: <https://doi.org/10.3390/app122312387> (дата звернення: 15.10.2025).

18. Kim D.-H., Kim S., Lee J.-Y. An empirical investigation of firefighting personal protective equipment and burn injuries in Korea. *Industrial Health*. 2022. Vol. 60(1). P. 2–15. URL: <https://doi.org/10.2486/indhealth.2021-0068> (дата звернення: 15.10.2025).
19. McQuerry M., Schofield S. Structural firefighter personal protective clothing user needs in the US: a mobility perspective. *Emergency Management Science and Technology*. 2023. Vol. 3. 15. URL: <https://doi.org/10.48130/EMST-2023-0015> (дата звернення: 15.10.2025).
20. Akbar-Khanzadeh F., Bisesi M. S., Rivas R. D. Comfort of personal protective equipment. *Applied Ergonomics*. 1995. Vol. 26(3). P. 195–198. URL: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00017-7](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00017-7) (дата звернення: 15.10.2025).
21. Okrasa M., Cheberyachko S., Radchuk D., Deryugin O., Sharovatova O. Evaluation of properties of elastomeric head straps of filtering facepiece respirators. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2023. Vol. 29(4). P. 1294–1300. URL: <https://doi.org/10.1080/10803548.2023.2257066> (дата звернення: 15.10.2025).
22. Lu J., Jiang G. Guarding skin under PPE: Mechanistic insights and technological innovations. *Skin Research and Technology*. 2023. Vol. 29(11). e13520. URL: <https://doi.org/10.1111/srt.13520> (дата звернення: 15.10.2025).
23. Zhao Y., Su M., Meng X., Liu J., Wang F. Thermophysiological and Perceptual Responses of Amateur Healthcare Workers: Impacts of Ambient Condition, Inner-Garment Insulation and Personal Cooling Strategy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20(1). 612. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph20010612> (дата звернення: 15.10.2025).
24. Alqahtani J. S., AlAhmari M. D. Evidence based synthesis for prevention of noninvasive ventilation related facial pressure ulcers. *Saudi Medical Journal*. 2018. Vol. 39(5). P. 443–452. URL: <https://doi.org/10.15537/smj.2018.5.22058> (дата звернення: 15.10.2025).
25. Borodina N., Cheberiachko S., Cheberyachko Yu., Deryugin O., Radchuk D., Klimov D. Study of protective efficiency of respirator with forced air

supply. Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”. 2020. Vol. 10(6). P. 192–201. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.6.18> (дата звернення: 15.10.2025).

26. Lee W., Park J., Jeong J., Jeon E., Kim H.-E., Park S., You H. Analysis of the Facial Anthropometric Data of Korean Pilots for Oxygen Mask Design. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 2012. Vol. 56(1). P. 1927–1931. URL: <https://doi.org/10.1177/1071181312561282> (дата звернення: 15.10.2025).

27. Hobbs-Murphy K., Brazile W. J., Morris K., Rosecrance J. Demographic differences in facial anthropometric data from 3D scans and implications for respirator fit. Annals of Work Exposures and Health. 2025. Vol. 69(4). P. 442–452. URL: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaf012> (дата звернення: 15.10.2025).

28. Online test “Stroop Color Word”. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.00557/full> (дата звернення: 15.10.2025).

29. Malek A., Hekmati I., Amiri S., Pirzadeh J., Gholizadeh H. The standardization of Victoria Stroop Color-Word Test among Iranian bilingual adolescents. Archives of Iranian Medicine. 2013. Vol. 16(7). P. 380–384. Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23808773/> (дата звернення: 15.10.2025).

30. Online test “Trailmaking Halstead-Reitan”. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=81392> (дата звернення: 15.10.2025).

31. Tombaugh T. N. Trail Making Test A and B: Normative data stratified by age and education. Archives of Clinical Neuropsychology. 2004. Vol. 19(2). P. 203–214. URL: [https://doi.org/10.1016/S0887-6177\(03\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0887-6177(03)00039-8) (дата звернення: 15.10.2025).

32. Sefcek J. A., Miller G. F., Figueredo A. J. Development and Validation of an 18-Item Medium Form of the Ravens Advanced Progressive Matrices. SAGE

Open. 2016. URL: <https://doi.org/10.1177/2158244016651915> (дата звернення: 15.10.2025).

33. Berghorst L. H., Bogdan R., Frank M. J., Pizzagalli D. A. Acute stress selectively reduces reward sensitivity. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013. Vol. 7. 133. URL: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00133> (дата звернення: 15.10.2025).

34. Online resource “IDRlabs.com”. URL: <https://www.idrlabs.com/> (дата звернення: 15.10.2025).

35. Kumar P., Berghorst L. H., Nickerson L. D., Dutra S. J., Goer F. K., Greve D. N., Pizzagalli D. A. Differential effects of acute stress on anticipatory and consummatory phases of reward processing. *Neuroscience*. 2014. Vol. 266. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.01.058> (дата звернення: 15.10.2025).

36. Cheberiachko S., Radchuk D., Cheberiachko Yu., Deryugin O., Naumov M. Evaluation of the Impact of Wearing a Filtering Half Mask on the Cognitive Indicators of Users. *Advances in Science and Technology*. 2025. Vol. 162. P. 109–119. URL: <https://doi.org/10.4028/p-1jvLXW> (дата звернення: 15.10.2025).

37. Feng S., Shen C., Xia N., Song W., Fan M., Cowling B. J. Rational use of face masks in the COVID-19 pandemic. *The Lancet Respiratory Medicine*. 2020. Vol. 8(5). P. 434–436. URL: [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30134-X](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30134-X) (дата звернення: 15.10.2025).

38. Leung R., Cook M. M., Capra M. F., Johnstone K. R. The contribution of respiratory and hearing protection use to psychological distress in the workplace: a scoping review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01863-7> (дата звернення: 15.10.2025).

39. Lim E. C. H., Seet R. C. S., Lee K. H., Wilder-Smith E. P. V., Chuah B. Y. S., Ong B. K. C. Headaches and the N95 face-mask amongst healthcare providers. *Acta Neurologica Scandinavica*. 2006. Vol. 113(3). P. 199–202. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.2005.00560.x> (дата звернення: 15.10.2025).

40. Porcelli A. J., Delgado M. R. Stress and Decision Making: Effects on Valuation, Learning, and Risk-taking. *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2017. Vol. 14. P. 33–39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.11.015> (дата звернення: 15.10.2025).

41. Bogdan R., Pizzagalli D. A. Acute stress reduces reward responsiveness: implications for depression. *Biological Psychiatry*. 2006. Vol. 60(10). P. 1147–1154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.03.037> (дата звернення: 15.10.2025).

42. Hanson J. L., Albert D., Iselin A. M. R., Carré J. M., Dodge K. A., Hariri A. R. Cumulative stress in childhood is associated with blunted reward-related brain activity in adulthood. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. 2016. Vol. 11(3). P. 405–412. URL: <https://doi.org/10.1093/scan/nsv124> (дата звернення: 15.10.2025).

43. Lighthall N. R., Gorlick M. A., Schoeke A., Frank M. J., Mather M. Stress modulates reinforcement learning in younger and older adults. *Psychology and Aging*. 2013. Vol. 28(1). P. 35–46. URL: <https://doi.org/10.1037/a0029823> (дата звернення: 15.10.2025).

44. Robinson O. J., Overstreet C., Charney D. R., Vytal K., Grillon C. Stress increases aversive prediction error signal in the ventral striatum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. Vol. 110(10). P. 4129–4133. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1213923110> (дата звернення: 15.10.2025).

45. Smith D. V., Rigney A. E., Delgado M. R. Distinct Reward Properties are Encoded via Corticostriatal Interactions. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 20093. URL: <https://doi.org/10.1038/srep20093> (дата звернення: 15.10.2025).

46. Szlyk P., Caretti D., Sils I., Zubal O., Faughn J. A. Effect of protective clothing ensembles on artillery battery crew performance. *Environmental Science*. 1992. Corpus ID: 107045101. Retrieved from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Protective-Clothing-Ensembles->

[on-Battery-Szlyk-Caretti/78b720ccf71b54f9ba4bccd3f7c955b4a77f0c76](https://on-battery-szlyk-caretti/78b720ccf71b54f9ba4bccd3f7c955b4a77f0c76) (дата звернення: 15.10.2025).

47. Jonson A. T., Weiss R. A., Grove C. Respirator performance rating table for mask design. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1992. Vol. 53. P. 193–202.

48. Kelly T. L., Ryman D. H., Sucec A. A., Yeager J. E., Englund C. E., Smith D. A. The effects of the M17A2 gas mask on reaction times and accuracy in males and females under non-exercising condition. NHRC Report No. 88-5. Naval Health Research Center, San Diego, CA, 1988. 17 p. Retrieved from: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA192528.pdf> (дата звернення: 15.10.2025).

49. Чеберячко С. І., Столбченко О. В., Радчук Д. І., Зіборова М. О. До способу розробки ергономічних фільтрувальних півмасок. *Геотехнічна механіка*. 2017. Вип. 134. С. 67–75. URL: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0000887013> (дата звернення: 15.10.2025).

50. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Шароватова О. П., Луценко Т. О. Вплив фільтрувальних респіраторів на розбірливість мовлення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. Вип. 3(36). С. 219–232. URL: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-17> (дата звернення: 15.10.2025).

51. Saunders G. H., Jackson I. R., Visram A. S. Impacts of face coverings on communication: An indirect impact of COVID-19. *International Journal of Audiology*. 2020. Vol. 60(7). P. 495–506. URL: <https://doi.org/10.1080/14992027.2020.1851401> (дата звернення: 15.10.2025).

52. Waters A. M., LeBeau R. T., Craske M. G. Experimental psychopathology and clinical psychology: an integrative model to guide clinical science and practice. *Psychopathology Review*. 2017. Vol. 4(2). P. 112–128. URL: <https://doi.org/10.5127/pr.038015> (дата звернення: 15.10.2025).

53. Doutres O., Salissou Ya., Atalla N., Panneton R. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*. 2010. Vol. 71. P. 506–509.

Available online: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00508767> (дата звернення: 15.10.2025).

54. Chodosh J., Weinstein B. E., Blustein J. Face masks can be devastating for people with hearing loss. *British Medical Journal*. 2020. Vol. 370. m2683. URL: <https://doi.org/10.1136/bmj.m2683> (дата звернення: 15.10.2025).

55. Bharatendu C., Chandra S., Garg S., Ranjan P., Kumar A., Siddiqui S. H., Kaur D., Vijayakumar P., Bhattacharya A., Gupta A., Anand R., Singh P. K., Kumar R. Powered Air Purifying Respirator (PAPR) restores the N95 face mask induced cerebral hemodynamic alterations among Healthcare Workers during COVID-19 Outbreak. *Journal of the Neurological Sciences*. 2020. Vol. 417. 117078. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jns.2020.117078> (дата звернення: 15.10.2025).

56. Ofir D., Arieli Y., Eynan M., Aviner B., Yanir Y. A comparison of the ventilatory responses to wearing either a hood or a mask escape respirator with identical nose-cups. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2025. Vol. 22(6). P. 453–459. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2025.2473463> (дата звернення: 15.10.2025).

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МОТОРОВОГО ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА З КАПЮШОНОМ

3.1 Загальна концепція конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном

Враховуючи результати порівняльного аналізу існуючих моделей моторизованих засобів захисту органів дихання, сформовано концепцію нової конструкції, що відповідає сучасним вимогам безпеки та ергономіки. У сучасних умовах воєнного стану, техногенних катастроф та пандемій особливої актуальності набуває проблема ефективного захисту органів дихання персоналу критичної інфраструктури, військових, медичних працівників та аварійно-рятувальних служб. Високий рівень ризику у таких ситуаціях вимагає застосування ЗІЗОД, здатних забезпечити не лише надійний бар'єр від небезпечних агентів та речовин, але й комфорт при тривалому використанні. Моторовані ЗІЗОД, на відміну від самовсмоктувальних респіраторів, забезпечують активну подачу очищеного повітря, що суттєво знижує фізіологічне навантаження на користувача та підвищує ефективність роботи в екстремальних умовах [1]. Це обумовлює необхідність розробки інноваційних конструкцій, які поєднують високий рівень захисту, ергономічність [2] та адаптивність до різних сценаріїв експлуатації.

Моторовані фільтрувальні респіратори з капюшоном (МФР) призначені для роботи в умовах, де концентрація небезпечних речовин у повітрі може перевищувати допустимі рівні, а традиційні фільтрувальні респіратори не забезпечують достатнього рівня захисту або створюють надмірне фізіологічне навантаження. Найбільш ефективними такі засоби є в таких умовах:

- за наявності токсичних промислових речовин (TPV), аерозолів, органічних розчинників;
- підвищених концентраціях пилу та диму, включно з продуктами горіння;
- середовище з радіоактивними частинками, де важливо забезпечити фільтрацію та надлишковий тиск у зоні дихання;
- присутні біологічні загрози, у тому числі вірусні та бактеріальні контамінації;
- середовище зі зниженою видимістю, високою температурою або ризиком опіків, коли додатковий захист голови є критично важливим;
- присутній ризик різких пікових забруднень через вибухи, руйнування будівель, викиди на підприємствах.

На відміну від масок із жорстким лицьовим ущільненням, конструкція лицевої частини в формі капюшону забезпечує:

- захист не лише органів дихання, а й голови, шиї та частини верхнього плечового пояса;
- відсутність впливу форми обличчя, наявності бороди та носіння окулярів на захисні властивості;
- зменшену чутливість до неправильного надягання або припасування;
- комфортну тривалу роботу без надмірного тиску на обличчя.

Вище зазначені вказують, що МФР з капюшоном є найбільш ефективним в умовах, коли засіб захисту необхідно надягати швидко, без додаткового навчання та коли є необхідним розширений захист голови.

Застосування даної конструкції рятувальниками ДСНС та представниками спеціалізованих аварійно-рятувальних підрозділів не передбачається, оскільки працівники таких організацій при виконанні рятувальних робіт регламентуються принципом максимального захисту з урахуванням потенційних ризиків [3]. Тому професійні рятувальники не застосовують МФР з капюшоном, надаючи перевагу маскам з балонами з кисневим сумішами, які створюють надлишковий тиск в підмасковому

просторі та мінімальні ризиками для користувача щодо потрапляння не фільтрованого повітря.

Розроблювана конструкція МФР передбачає її застосування цивільними особами, які є волонтерами, що працюють при рятувальних роботах на добровільних засадах [4, 5] або можуть опинитися в осередках небезпечних факторів унаслідок:

- техногенних аварій на промислових об'єктах;
- пожеж у житлових та громадських будівлях;
- аварій із викидом хімічних речовин (аміак, хлор, феноли тощо);
- ситуацій воєнного характеру (удари по критичній інфраструктурі, руйнування складів, задимлення після пожеж);
- евакуаційних робіт у зонах руйнувань.

На відміну від професійних респіраторів для рятувальників, конструкція орієнтована на осіб без спеціальної підготовки, а це означає:

- наявність спрощеного механізму надягання (запас герметичності за рахунок капюшона);
- автоматичні режими подачі повітря без ручного налаштування;
- мінімальна кількість елементів управління та регулювання;
- не значні вимоги до технічного обслуговування;
- можливість застосування в цивільних умовах або при евакуації.

Таким чином, конструкція спрямована на підвищення стійкості цивільного населення до небезпечних факторів під час НС, коли швидкість реагування та надійність ЗІЗОД відіграють ключову роль. Забезпечення можливості роботи у горизонтальному та напівлежачому положенні

Однією з вимог до конструкції є забезпечення ефективності МФР не лише під час ходьби чи стояння, але й у положеннях, що часто виникають під час виконання дій при рятувальних роботах чи самоевакуації.

Узагальнено дані щодо вимог та обмежень у застосуванні ЗІЗОД в аварійних ситуаціях наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані щодо вимог та обмежень у застосуванні ЗІЗОД в аварійних ситуаціях

Критерій оцінки	Рятувальники (ДСНС, професіонали)	Цивільні / волонтери, що залучені до рятувальних робіт
1. Типи респіраторів, що застосовуються	Апарати на стисненому повітрі з надлишковим тиском у підмасковому просторі з масками.	МФР з капюшоном або фільтрувальні ЗІЗОД із автоматичною подачею повітря, без потреби перевірки прилягання.
2. Обмеження у використанні	Вимоги до герметичності (правильне надягання, відсутність волосяного покриву) Використання лише спеціально підготовленими навченими особами.	Не призначені для середовищ, де потрібен максимальний рівень захисту (високі концентрації, критично небезпечні умови). Не використовуються професійними рятувальними підгоздами ДСНС.
3. Рекомендації щодо застосування	Використовуються у будь-яких умовах, де передбачено роботу в сильно забрудненому або непридатному для дихання середовищі	Застосовуються у техногенних аваріях, пожежах, руйнуваннях, під час евакуації. Рекомендовані там, де треба швидко надягти, працювати без навчання, є необхідність захисту голови, шиї та органів дихання.
4. Особливості конструкції	Жорстка маска, підмасковий позитивний тиск, герметизація, складні системи подачі повітря.	Капюшон, що не потребує точного припасування або автоматична подача повітря, мінімум елементів керування.
5. Фізіологічне навантаження	Високе, бо спорядження важче, вимагає хорошого фізичного стану.	Низьке: моторована подача повітря зменшує навантаження, капюшон не тисне на обличчя.
6. Положення тіла під час роботи	Можуть працювати у різних положеннях, але обладнання важке.	Конструкція МФР з капюшоном оптимізована для роботи у різних положеннях, але можуть бути обмеження.
7. Потреба у навчанні	Необхідне спеціальне навчання, регулярні тренування.	Мінімальна, підходить для людей без спеціальної підготовки.
8. Технічне обслуговування	Складне, регламентоване, виконується техспеціалістами.	Мінімальне, фільтри замінні, система проста у догляді.

Для цього конструкція МФР може передбачати такі технічні рішення:

1. Система подачі повітря, оптимізована для будь-якої орієнтації тіла. Вентилятор і блок фільтрації розташовані так, щоб уникати перекриття

вхідних отворів. Повітрозабірники мають захист від випадкового закриття та від попадання великих частинок.

2. Гнучкість повітропроводу. Конструкція повітропроводу дозволяє корпусу користувача торкатися поверхні без його перегинання. Жорсткі ділянки мінімізовані, щоб уникнути переломів каналу подачі повітря.

3. Стабільний надлишковий тиск незалежно від положення. Автоматичний контроль потоку компенсує зміну опору під час руху або зміни положення тіла. Додаткова камера вирівнювання тиску у верхній частині капюшона запобігає його прилипанню до обличчя у разі зміни пози.

4. Захист оглядового вікна. Кутова геометрія лицевої частини забезпечує огляд навіть у лежачому положенні. Протизапотівальні канали спрямовують тепле повітря таким чином, щоб уникати утворення конденсату.

Таким чином, МФР з капюшоном залишається ефективним у сценаріях, коли користувач змушений пересуватись низько, прокладати шлях крізь завали, виконувати роботи у лежачому положенні або перебувати в обмежених просторах.

Запропонована конструкція МФР з капюшоном розроблялась на основі принципів комплексного захисту, ергономічності, надійності [6] та адаптивності до умов надзвичайних ситуацій. При проектуванні враховано антропометричну відповідність шляхом застосування кількох типорозмірів для забезпечення герметичності та комфорту користувача. Захисні елементи буде інтегровано в єдину систему: капюшон поєднано з каскою, що зменшує вагу та скорочує час надягання. Система подачі повітря буде реалізована з автоматичним регулюванням потоку залежно від стану фільтра та дихальної активності, що підвищує стабільність роботи та енергоефективність. Для оперативного реагування на небезпеки передбачено моніторинг середовища в реальному часі за допомогою сенсорів радіаційного контролю. Конструкція оптимізована для роботи в умовах ХБРЯ-загроз, а ергономічні рішення, такі як зниження ваги, шумозахист і рівномірний розподіл навантаження через

плечову систему з поясним ременем, забезпечують комфорт тривалої експлуатації.

Експериментальна модель МФР розроблялась з урахуванням принципів конструювання сучасних ЗІЗОД, а саме:

- функціональність, що передбачає активну фільтрацію та стабільний потік повітря в зону дихання людини;
- модульність, яка забезпечує використання змінних фільтрів та уніфікованих компонентів, що можуть бути швидко замінені без втрати ефективності виробу та часу використання;
- ергономіка, що включає зручність носіння та мінімізацію шуму; а також
- надійність, яка гарантує стійкість конструкції до механічних впливів, пилу та вологи з повітря [7, 8].

Для підвищення ефективності та функціональності буде впроваджено низку інноваційних рішень зокрема:

- встановлення сенсорів якості повітря для моніторингу небезпек у реальному часі;
- інтеграцію з системами зв'язку для координації дій у критичних умовах;
- сумісність з іншими засобами індивідуального захисту, та
- аварійне оповіщення при виявленні небезпечних концентрацій або відмові системи.

3.2 Оцінка ризиків експериментальної конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном

Для забезпечення високої надійності та безпеки використання моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном необхідним є системний аналіз можливих відмов їхніх елементів і оцінка наслідків для користувача [9, 10]. Одним із найбільш поширених та ефективних

інструментів для цього це метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) «Аналіз видів і наслідків відмов» [11].

Застосування методу FMEA до моторового фільтрувального респіратора з капюшоном дозволяє системно оцінити ризики, що виникають унаслідок потенційних відмов компонентів [12]. Найбільший рівень небезпеки становлять відмови, пов'язані з припиненням подачі повітря (зупинка вентилятора, несправність акумулятора, від'єднання шланга). Водночас інтеграція захисної каски за EN 397 у конструкцію лицевої частини підвищує рівень комплексного захисту користувача від фізичних ушкоджень. Результати FMEA є основою для розробки заходів підвищення надійності та безпечності, а також для формування вимог до удосконалення конструкції та організації експлуатаційного контролю.

Тож, головною метою застосування даного методу у виявленні потенційних режимів відмов компонентів респіратора, визначенні їхніх можливих наслідків для користувача та ранжуванні ризиків за пріоритетністю. Результатом є формування рекомендацій щодо усунення або мінімізації найбільш критичних ризиків, що безпосередньо впливає на підвищення рівня безпеки і довговічності виробу.

Першим етапом було визначення обсягу робіт та створення групи експертів. Об'єктом дослідження був моторовий фільтрувальний респіратор із капюшоном, конструкція якого включає наступні основні елементи:

- моторовий блок із вентилятором;
- акумуляторна батарея;
- блок очищення повітря;
- шланг для подачі повітря та з'єднувальні елементи;
- капюшон із оглядовим склом;
- інтегрована в конструкцію капюшону захисна каска (EN 397); а також
- система управління та індикації роботи з мережею датчиків.

Для виконання FMEA формувалась група, до складу якої входили експерти з ТОВ НВП «СТАНДАРТ» (м. Дніпро), яке спеціалізується на

розробці та виготовленні засобів індивідуального захисту. До групи експертів увійшли інженер-конструктор, фахівець з електроніки, інженер з охорони праці, а також випробувачі, що були залучені до випробувань експериментального зразка капюшону. Це дозволило охопити всі можливі аспекти експлуатації даного засобу індивідуального захисту.

На наступному етапі виконувалась деталізація основних елементів системи шляхом її розбиття на функціональні підсистеми зокрема:

- моторовий блок (вентилятор, електродвигун);
- акумуляторна батарея та зарядний пристрій;
- фільтри та з'єднувачі до них;
- шланг для подачі повітря, з'єднання з моторовим блоком та капюшоном;
- лицева частина з капюшоном та оглядовим склом;
- інтегрована в конструкцію капюшону каска згідно EN 397;
- електронна система управління, контролю якості повітря та індикації.

Таке розбиття дозволяє для кожного елемента окремо ідентифікувати можливі види відмов та їхні наслідки.

На третьому етапі виконувалась ідентифікація можливих режимів відмов, де для кожної елементу функціональної підсистеми визначались характерні відмови (табл. 3.2) та визначались потенційні наслідки.

На четвертому етапі виконувалась оцінка ризиків. Метод FMEA передбачає використання трьох критеріїв оцінки:

Severity (S) – серйозність наслідків для користувача;

Occurrence (O) – частота виникнення відмови;

Detectability (D) – ймовірність виявлення проблеми до того, як вона призведе до небезпечних наслідків.

Кожен критерій оцінюється за шкалою від 1 до 10 балів. Шкали значимості фактору серйозності, частоти, ймовірності наведені в таблиці 3.3. Добуток цих показників утворює число пріоритету ризику (RPN):

$$RPN=S \times O \times D, \quad (3.1)$$

Таблиця 3.2 – Перелік характерних відмов елементів підсистем моторового фільтрувального респіратора з капюшоном

Елемент підсистеми	Характерні відмови	Можливі наслідки
Моторовий блок (вентилятор, електродвигун)	Знос підшипників, перегрів/замикання двигуна, зниження продуктивності, заклинювання через пил/вологу	Недостатня подача повітря, підвищений шум і вібрації, повна відмова системи
Акумуляторна батарея та зарядний пристрій	Втрата ємності, перегрів/роздування, несправність BMS, вихід з ладу роз'ємів, відмова зарядного пристрою	Скорочення часу роботи, неможливість зарядки, небезпека займання або вибуху
Фільтри та з'єднувачі до них	Забивання пилом/аерозолями, тріщини корпусу, неправильне встановлення, старіння сорбенту, поломка різьби/фіксаторів	Зростання опору диханню, потрапляння шкідливих речовин, негерметичність
Шланг для подачі повітря, з'єднання з моторовим блоком та капюшоном	Розрив, прокол, тріщини, перегин або сплюснення, розгерметизація стиків, відрив фіксаторів	Витік або блокування потоку повітря, втрата захисту
Лицева частина з капюшоном та оглядовим склом	Прорив тканини, розшивання швів, знос ущільнень, подряпини/помутніння скла, запотівання, негерметичність прилягання	Зниження герметичності, погіршення видимості, підвищений ризик проникнення шкідливих речовин
Інтегрована в конструкцію капюшону каска згідно EN 397	Тріщини, вм'ятини, старіння матеріалу, знос ремінців, поломка регуляторів	Втрата захисту голови від ударів, зниження надійності кріплення капюшона
Електронна система управління, контролю якості повітря та індикації	Відмова сенсорів, збої ПЗ, поломка індикаторів, корозія плат, несправність роз'ємів, помилкові сигнали	Невірний контроль параметрів повітря, відсутність сигналізації небезпеки, відмова управління

Надійність МФР визначається стабільністю роботи кожного з його ключових елементів. Відмова будь-якої підсистеми може безпосередньо вплинути на подачу повітря, герметичність, комфорт та безпеку користувача.

Наприклад, моторовий блок, що включає вентилятор та електродвигун, є критичним для забезпечення постійного та достатнього потоку очищеного

повітря. Акумуляторна батарея та зарядний пристрій визначають автономність системи. Фільтрувальні елементи та їх з'єднувачі з часом забиваються пилом та аерозолями, можуть мати механічні пошкодження або старіння сорбенту, а також страждати від неправильного монтування.

Електронна система управління та контролю якості повітря відповідає за автоматичне регулювання потоку, сигналізацію небезпечних концентрацій і загальний моніторинг стану пристрою. Відмова сенсорів, помилки програмного забезпечення, корозія плат або несправність індикаторів можуть призвести до некоректних показань, відсутності попереджувальних сигналів або повної втрати керованості системи. Це створює особливо небезпечні умови, оскільки користувач може не усвідомлювати реальних ризиків.

Таблиця 3.3 – Шкали значимості фактору тяжкості, частоти та ймовірності

Серйозність відмови, «S»	Частота появи, «O»	Ймовірність виявлення, «D»
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10
де «1» - неважлива «10» - катастрофічна	де «1» - дуже рідко «10» - постійно	де «1» - виявлення 100%; «10» - неможливо виявити

На п'ятому етапі визначались пріоритети ризиків в залежності від їх критичності. Усі відмови впорядковувались за величиною RPN. Значення понад 150 вважались критичними, від 75 до 150 потребують плану коригувальних заходів, нижче 75 контролюються звичайними методами.

Результати ідентифікації відмов були занесені до класифікатора, після чого проводилась оцінку поточного рівня ризику та робили висновки щодо прийнятності ризику згідно таблиці 3.4. Для найбільш небезпечних режимів відмов розробляються заходи зниження ризиків.

Таблиця 3.4 – Критерії оцінки рівня ризику

Рівень пріоритетності ризику	Якість	Відповідність вимогам	Частота появи	Ймовірність виявлення
	Тяжкість наслідків			
Неприйнятний більше 150 балів	Ймовірно, завдасть шкоди споживачеві	Приведе до відкликання продукції	Понад один раз протягом трьох місяців	Навряд чи може бути виявлений у більшості випадків
Прийнятний з перевіркою від 75 до 150 балів	Ймовірно, не завдають шкоди споживачеві	Приведе до одержання попереджувального листа	Один раз кожні три-дванадцять місяців	Може бути виявлений у деяких випадках
Прийнятний менше 75 балів	Не завдають шкоди споживачеві	Приведе до виявлення невідповідності під час аудиту	Один раз кожні один-три роки	Ймовірно, буде виявлено

Результати оцінювання ризиків згідно даних з таблиць 3.2-3.4 наведені в таблиці 3.5. За результати оцінювання було запропоновано коригувальні дії, після яких здійснювалась повторна оцінка ризиків (верифікація коригувальних дій), що представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Результати оцінки величини ризиків для потенційних відмов

№	Елемент / відмова	S	O	D	RPN	Рівень ризику
1	Підшипники вентилятора (знос)	6	6	4	144	Середній
2	Перегорання / коротке замикання двигуна	9	3	3	81	Середній
3	Часткове зниження продуктивності вентилятора	7	5	4	140	Середній
4	Втрата ємності батареї з часом	7	6	5	210	Високий
5	Термічний пробій батареї	10	2	4	80	Середній
6	Відмова зарядного пристрою	7	3	5	105	Середній
7	Забивання фільтра	8	7	4	224	Високий
8	Утворення негерметичності корпусу фільтра	9	3	6	162	Високий
9	Розрив / прокол шланга	9	2	3	54	Низький
10	Розгерметизація на стиках шланга	8	5	5	200	Високий
11	Прорив / пошкодження капюшона (тканина, шви)	7	3	4	84	Середній
12	Подряпини / помутніння оглядового скла	3	6	2	36	Низький
13	Запотівання оглядового скла	4	5	3	60	Низький
14	Тріщини / деформації каски	10	1	2	20	Низький
15	Відмова сенсорів (тиску/радіації)	9	4	7	252	Високий
16	Помилкові тривоги / хибна індикація	5	6	5	150	Середній
17	Вихід з ладу індикаторів / дисплею	6	3	6	108	Середній
18	Корозія плат / контактів	7	4	6	168	Високий

Таблиця 3.6 – Результати оцінки величини ризиків для потенційних відмов з урахуванням коригувальних дій

№	Елемент / відмова	S	O	D	RPN	Рівень	Коригувальна дія
1	Підшипники вентилатора (знос)	6	4	3	72	Низький	Регулярна заміна/мастило підшипників; віброконтроль; балансування крильчатки; захист від пилу.
2	Перегорання / коротке замикання двигуна	9	2	2	36	Низький	Захист по струму/термозахист; контроль струму і температур; регулярна інспекція обмоток.
3	Часткове зниження продуктивності вентилатора	7	3	2	42	Низький	Калібрування витрати повітря; очищення вентилатора; регламент ТО; візуальний моніторинг потоку.
4	Втрата ємності батареї з часом	7	3	3	63	Низький	Встановити BMS, графік заміни батарей, трекінг циклів; зберігання за рекомендованих умов.
5	Термічний пробій батареї	10	1	2	20	Низький	Термічний захист, вентиляція батарейного відсіку, контроль температури, використання сертифікованих акумуляторів.
6	Відмова зарядного пристрою	7	2	2	28	Низький	Тест зарядного, резервний зарядний пристрій, перевірка напруги/струму при ТО.
7	Забивання фільтра	8	3	2	48	Низький	Введення індикатора забруднення фільтра (датчик диференц. тиску), графік заміни і запасні фільтри.
8	Утворення негерметичності корпусу фільтра	9	2	3	54	Низький	Покращити ущільнення; контроль герметичності при ТО; використання якісних з'єднань.
9	Розрив / прокол шланга	9	1	1	9	Низький	Захисні рукави на шланг, періодичний огляд і заміна за графіком; інструкція по запобіганню проколам.

Продовження таблиці 3.6

10	Розгерметизація на стиках шланга	8	3	2	48	Низький	Переглянути конструкцію стиків; застосувати надійні фіксатори і ущільнювачі; регулярний контроль і тестування.
11	Прорив/пошкодження капошона (тканина, шви)	7	2	2	28	Низький	Інспекція капошона перед зміною; запасні капошони; ремонт швів; рекомендації по зберіганню.
12	Подряпини / помутніння оглядового скла	3	4	1	12	Низький	Заміна скла при пошкодженні; використання антиблікового/антиподдряпного покриття; журнал огляду.
13	Запотівання оглядового скла	4	3	1	12	Низький	Антизапотівальне покриття, вентиляція і/або підігрів скла, інструктаж користувача.
14	Тріщини / деформації каски	10	1	1	10	Низький	Візуальний контроль після удару; негайна заміна каски при ознаках пошкодження; журнал інцидентів.
15	Відмова сенсорів (тиску/радіації)	9	2	2	36	Низький	Калібрування датчиків; дублювання критичних сенсорів; автоматичні самоперевірки; регулярне техобслуговування.
16	Помилкові тривоги / хибна індикація	5	4	3	60	Низький	Налаштування алгоритмів фільтрації тривоги, періодичні тести, навчання операторів для інтерпретації сигналів.
17	Вихід з ладу індикаторів / дисплея	6	1	2	12	Низький	Резервні індикатори; тестування дисплея при ТО; захист від вологи/корозії.
18	Корозія плат / контактів	7	2	2	28	Низький	Покриття/корозійний захист плат; герметизація електроніки; контроль вологості; періодична перевірка контактів.

Шляхом проведення оцінки потенційних відмов конструкції МФР та впровадження коригувальних дій величину ризиків знижено до низького рівня. З урахуванням отриманих результатів конструкцію можна прийняти як базову для подальшого впровадження, проте необхідно виконати математичну оцінку її надійності та залишкових ризиків для підтвердження відповідності нормативним вимогам.

3.3 Розробка конструкції моторового респіратора з капюшоном

3.3.1 Конструкція капюшону до моторового респіратора

В попередньому розділі дисертаційної роботи було проведено детальний аналіз антропометричних параметрів голів представників цільової групи користувачів, на основі якого було спроектовано створено капюшон типорозміри L. Використання капюшону забезпечує більш щільне прилягання та підвищену герметичність, а також комфорт при тривалому носінні. Конструкція капюшона інтегрована з ударозахисною каскою, що гарантує додатковий захист голови користувача від механічних пошкоджень під час виконання робіт у небезпечних зонах, виключаючи необхідність носіння окремих захисних елементів і тим самим зменшуючи загальну вагу комплекту засобів захисту (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд моделі капюшону

Таким чином, у загальній конструкції експериментального зразка моторного фільтрувального респіратору передбачається використання розробленої моделі капюшона, інтегрованої з ударозахисною каскою, що забезпечує необхідний рівень герметичності, захисту та ергономічності.

3.3.2 Конструкція моторового блоку

Моторовий блок складається з наступних елементів: самого корпусу моторового блоку, вентилятора та системи для подачі повітря в зону дихання капюшону, системи управління та комплекту датчиків контролю повітря зокрема тиску та рівня радіаційного забруднення, а також елементу живлення.

Моторовий блок розміщено у корпусі з жорсткою рамною конструкцією, що забезпечує захист внутрішніх компонентів від механічних впливів і пилу. Елементи корпусу моторового блоку попередньо проектувались в програмному середовищі SolidWorks, в подальшому на стадії збірки усі розроблені компоненти перевірялись на сумісність. Усі елементи корпусу моторового блоку виготовлені з полімерного матеріалу ABS+ (Plexiwire, Україна), який має підвищену стійкість до механічного впливу, та друкувались на 3-D принтері Ender-3 V3 KE (CREALITY, Китай). Місця з'єднання компонентів корпусу спочатку стягувались нікельованими гвинтами M2.5x14 та гайками до них, а в подальшому герметизовано за допомогою ущільнювача на силіконовій основі Ceresit CS 25 (Ceresit, Німеччина), що витримує термічний вплив, та клею марки B6000 (Suxun, Китай) з синтетичного каучуку.

Усередині блоку розташовано відцентровий вентилятор у закритому корпусі, який закріплено на внутрішній монтажній плиті (рис. 3.2).

Загальна конструкція вентилятора спроектовано на базі відцентрованого вентилятора модель 9733 (Pengda Technology, Китай), проте він не забезпечував достатньої подачі повітря за умови навантаження на

нього, як це відбувається при приєднанні скомбінованих фільтрів. Крильчатку вентилятора було вдосконалено з урахуванням аеродинаміки та низького рівня шуму за високих обертів (до 12000 обертів).

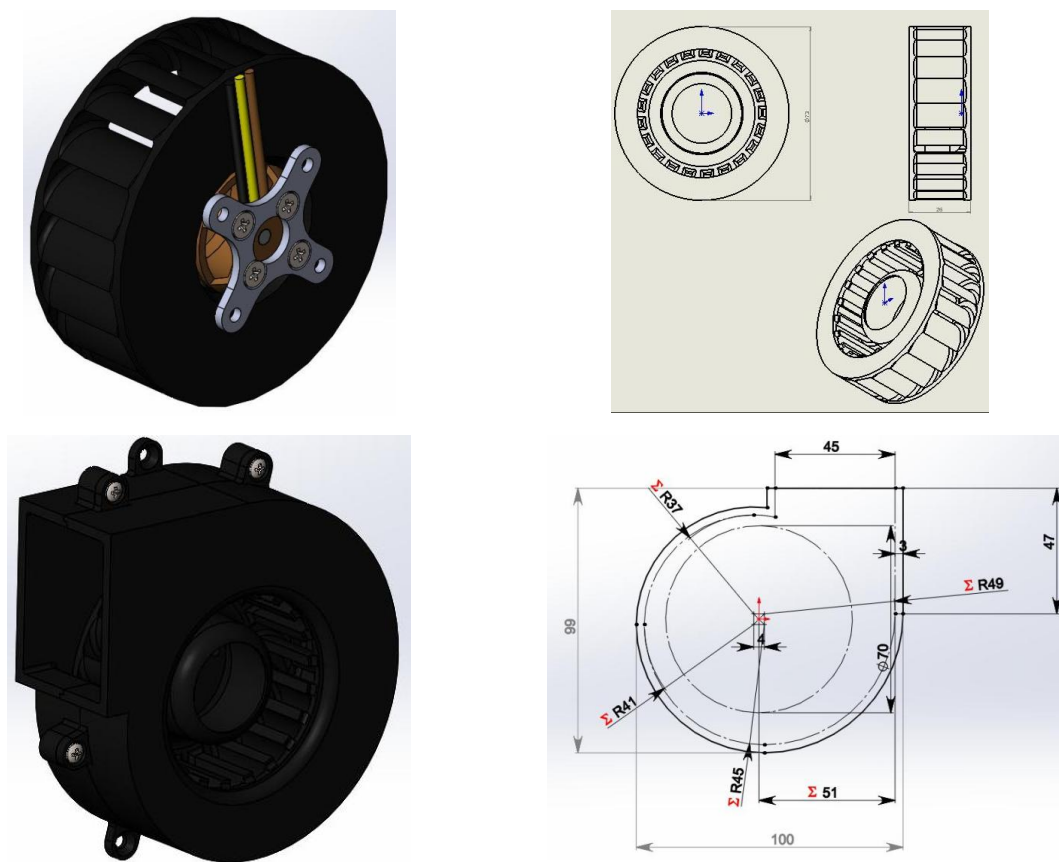


Рисунок 3.2 – Схема відцентрованого вентилятора в закритому корпусі

Обертання крильчатки забезпечувалось безколекторним двигуном A2212/13T-1000KV (Ningbo Zucuo Tools Co., Ltd, Китай) (табл. 3.7). Оцінка та підбір параметрів крильчатки для вентилятора виконувались в програмному середовищі SolidWorks з використанням модулю Flow Simulation. Крильчатка вентилятора також була виготовлена з полімерного матеріалу ABS+ (Plexiwire, Україна) на 3-D принтері Ender-3 V3 KE (CREALITY, Китай). Крильчатка кріпилась на корпусі безколекторного двигуна за допомогою клею з синтетичного каучука марки B6000 (Suxun, Китай).

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики безколекторного двигуна A2212/13T-1000KV [13]

Параметр двигуна	Технічні характеристики
Константа швидкості двигуна, KV	1000 об/вольт (RPM)
Живлення, В	7,4-11,1 (2-3S LiPo)
Струм холостого ходу при 10 В	0,6 А

Радіальні вентилятори ефективні на високих обертах, тому здатні створювати значний тиск та потоку повітря. Безколекторні двигуни мають високий коефіцієнт корисної дії, що дозволяє отримувати максимальну потужність при мінімальних витратах енергії (імпульсне живлення), що є важливим для моделей, які працюють від акумуляторів. Відсутність колектора і щіток в двигуні забезпечує тривалий термін служби та надійну роботу без технічного обслуговування. Завдяки своїй невеликій вазі (48 г) двигун не обтяжує конструкцію вентилятора. Порівняльні характеристики вентиляторів представлено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Порівняльні характеристики вентиляторів

Параметр	Модель 9733 [14]	Розроблена модель
Висота корпусу, мм	97х97	100х99
Ширина корпусу, мм	33	38
Діаметр вентилятора, мм	64	70
Максимальна швидкість обертання, об/хв.	4600	12000
Напруга живлення та струм, В/А	12/1,12	12/регульований
Максимальна споживана потужність, Вт	13,5	12,8
Максимальна робоча температура, °С	60	80
Матеріал корпусу	Високоміцний пластик	ABS+

Вивід повітряного потоку від вентилятора спроектовано таким чином, щоб рівень турбулентності потоку був мінімальним та з'єднувався з повітропроводом, що формує направлений потік у капюшон (рис. 3.3). проєктування виконувалось в програмному середовищі SolidWorks з використанням модулю Flow Simulation.

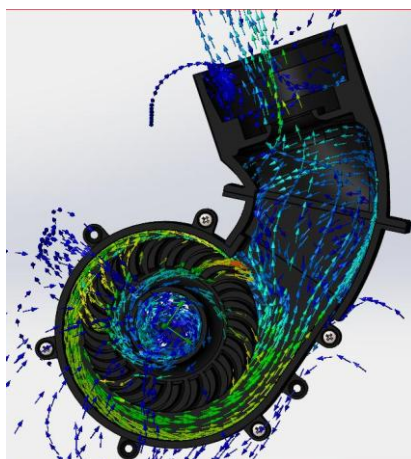


Рисунок 3.3 – Система виводу повітря з моторового блоку

Вихідний патрубок розробленого моторового блоку виконано з урахуванням вимог до зниження аеродинамічного опору та забезпечення надійного з'єднання з елементами системи подачі повітря. Конструкцією передбачено паз для встановлення силіконового ущільнювача товщиною 2 мм, що гарантує герметичність стику та виключає витікання повітря. Додатково, на поверхні патрубка сформовано бортик для заціпки типу DJ67-00008A, який забезпечує швидке та зручне приєднання роз'єму від шлангу.

Форма патрубків спроектована в програмному середовищі SolidWorks з використанням модулю Flow Simulation таким чином, щоб мінімізувати опір повітряному потоку шляхом уникнення різких поворотів та звужень у вихідному каналі. Це дозволяє зменшити втрати тиску та забезпечити ефективну подачу повітря до капюшону. Запропонована конструкція патрубків наведена на рисунку 3.4.

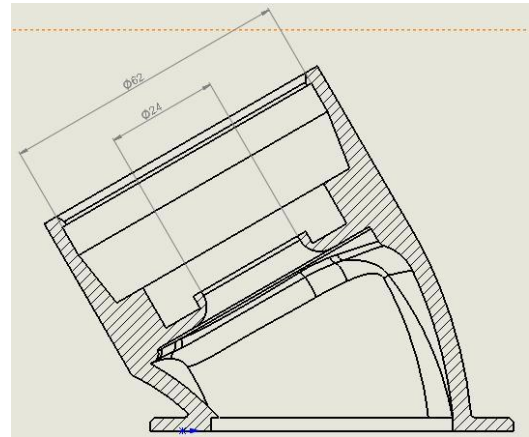
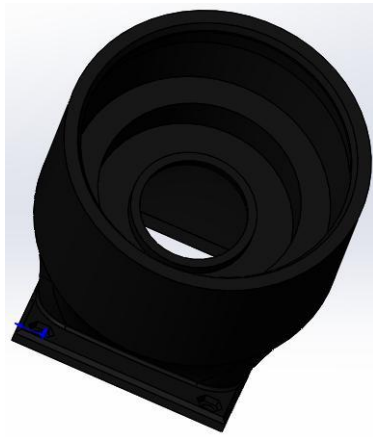


Рисунок 3.4 – Конструкція вихідного патрубка

Поруч з вентилятором розташований відсік для акумуляторної батареї з номінальною напругою 12 В, яка є оптимальною для ефективної роботи двигуна A2212/13T-1000kv, дозволяючи йому досягати високих обертів (близько 12000 об/хв.), необхідних для радіального вентилятора. Для довговічності та безпеки в батарею інтегровано плату захисту та балансування (BMS), яка контролює подачу напруги від елементів живлення GB1-GB9. Ця система виконує кілька важливих функцій: вона захищає акумулятор від перезаряду, перерозряду та короткого замикання, а також забезпечує рівномірний заряд і розряд усіх елементів. Завдяки цим особливостям, батарея є надійним і безпечним джерелом живлення, повністю відповідаючи вимогам проєкту. Схема акумуляторної батареї наведена на рисунку 3.5.

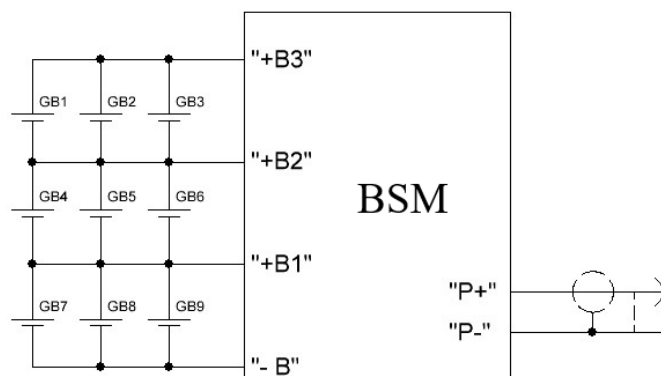


Рисунок 3.5 – Схема спроектованої акумуляторної батареї

В нижній частині корпусу моторового блоку передбачено два стандартні нарізеві з'єднувача R 40x1/7 для приєднання фільтрів. Запропоноване рішення з розташуванням фільтрів у нижній частині корпусу моторового блоку є практичним, поєднуючи в собі кілька ключових переваг. По-перше, такий підхід забезпечує надійний захист від пошкоджень. Фільтри, будучи закритими корпусом знизу, захищені від випадкових ударів та зачеплень під час роботи, що запобігає витокам і гарантує безперебійну роботу системи. По-друге, це значно спрощує обслуговування. Доступ до фільтрів з нижньої частини блоку дозволяє замінювати їх швидко та зручно, без необхідності розбирання всієї конструкції. Стандартне різьблення R 40x1/7 ще більше спрощує цей процес, дозволяючи легко підібрати та встановити нові фільтри. По-третє, таке розташування сприяє ефективному використанню простору, уникаючи «конфлікту» фільтрів з іншими внутрішніми компонентами блоку, що особливо важливо для компактних пристроїв. Нарешті, вага фільтрів у нижній частині корпусу забезпечує рівномірний розподіл ваги та знижує центр мас, роблячи моторовий блок більш стійким і менш схильним до перекидання. Таким чином, це рішення демонструє високу функціональність, безпеку та зручність обслуговування, що є важливими критеріями для будь-якого інженерного проєкту (рис. 3.6).

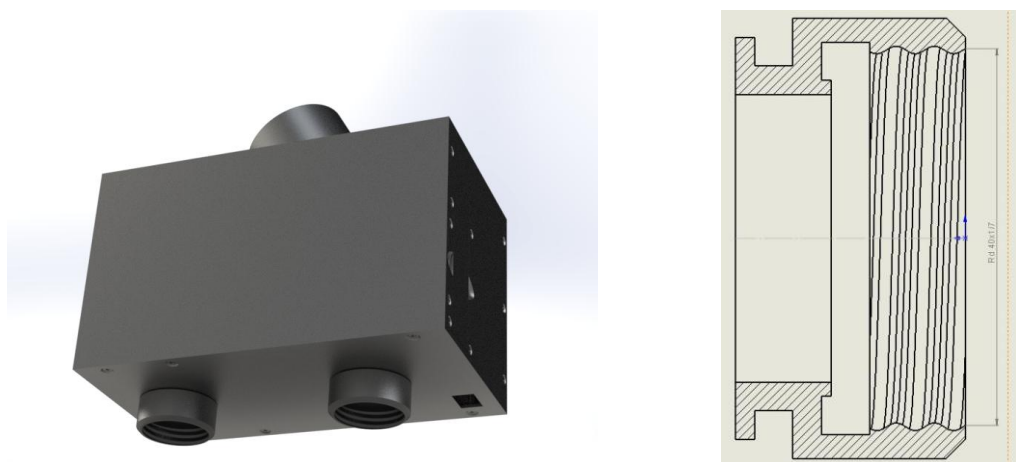


Рисунок 3.6 – Схема з'єднувача для фільтрів з різьбленням

Конструкція моторового блоку дозволяє реалізувати автоматичне регулювання продуктивності вентилятора в залежності від зміни тиску в капюшоні та опору фільтрів. В корпусі моторового блоку встановлено датчик тиску MPXV7002DP (NXP Semiconductors, Нідерланди), який у поєднанні з мікроконтролером Arduino UNO R4 (Arduino, Італія) реалізує автоматичне регулювання швидкості вентилятора залежно від зміни тиску у внутрішньому об'ємі капюшона та при засміченні фільтрів. Це дозволяє підтримувати стабільний повітряний потік навіть при частковому забиванні фільтра або зміні інтенсивності дихання користувача, що підвищує енергоефективність і комфорт роботи. Датчик тиску MPXV7002DPT1 є диференціальним сенсором, що перетворює зміну тиску в пропорційний аналоговий сигнал у вигляді напруги, яка варіюється в діапазоні від 0,5 В до 4,5 В [15]. Це дозволяє точно вимірювати тиск за допомогою мікроконтролера. Один штуцер датчик постійно реєструє дані в середині герметичного корпусу моторового блоку, а другий через гнучкий шланг діаметром 1,5 мм виведено до корпусу, де з'єднано з навколишнім середовищем. Датчик розрахований на диференціальний тиск від мінус 2000 Па до +2000 Па, де мінімальному тиску відповідає напруга 0,5 В, нульовому тиску 2,5 В, а максимальному 4,5 В. В процесі підключення та налагодження датчика значення мінімального та максимального тиску було відкалібровано за допомогою електронного мікроманометра Testo 512 (Testo AG, Німеччина) з діапазоном вимірювання від мінус 2000 Па до +2000 Па. Один штуцер мікроманометра був приєднаний через гнучкий силіконовий шланг діаметром 3 мм до навколишнього середовища, а інший вимірював тиск в середині герметичного корпусу моторового блоку.

З урахуванням калібрування датчика в лабораторних умовах перепад тиску ΔP розраховується контролером Arduino за наступним рівнянням:

$$\Delta P = k_V \cdot V_{\text{напр}} + b_s - P_0$$

де, k_V - коефіцієнт нахилу калібрувальної лінії, Па/В; $V_{напр}$ – електрична напруга, що подається на датчик (0-5В), В; b_s – зсув калібрувальної лінії відносно нуля, Па; P_0 – початкове значення тиску, що визначається при запуску приладу, Па.

Додатково, у пристрій інтегровано датчик радіації модель GGreg 20 rev.3 (IOT-device, Україна) [16], який у режимі реального часу інформує користувача про рівень радіаційного забруднення повітря. Така функція є критично важливою для ліквідації наслідків аварій на об'єктах з джерелами іонізуючого випромінювання. Рівень випромінювання відображається звуковими сигналами. Детектор включає в себе вихід підрахунку імпульсів на головний контролер Arduino, та рівень радіації H вимірюється наступним чином:

$$H = N_{pulse} \cdot 0.0092 \text{ ,мкЗв}$$

де, N_{pulse} – кількість імпульсів, що надходить на контролер Arduino; 0,0092 – коефіцієнт приладу, що надано виробником.

Контролер Arduino Uno R4 WiFi ABX00087 [17] у складі системи забезпечує автоматичне регулювання роботи вентилятора, моніторинг параметрів навколишнього середовища та вивід даних на дисплей. Контролер, обробляючи дані датчика, автоматично регулює швидкість обертання вентилятора через ШІМ-сигнал на електронний регулятор швидкості (ESC) з метою підтримання стабільного повітряного потоку при зміні інтенсивності дихання користувача або частковому засміченні фільтрів, що підвищує енергоефективність і комфорт роботи. Уся інформація про тиск, стан фільтрів, рівень радіації та режим роботи вентилятора виводиться на LCD-дисплей 2004 з чотирма рядками по 20 символів, що забезпечує зручне відображення даних і контроль за станом системи. Кодування роботи контролера наведено в Додатку В, схема підключення показана на рисунку 3.7.

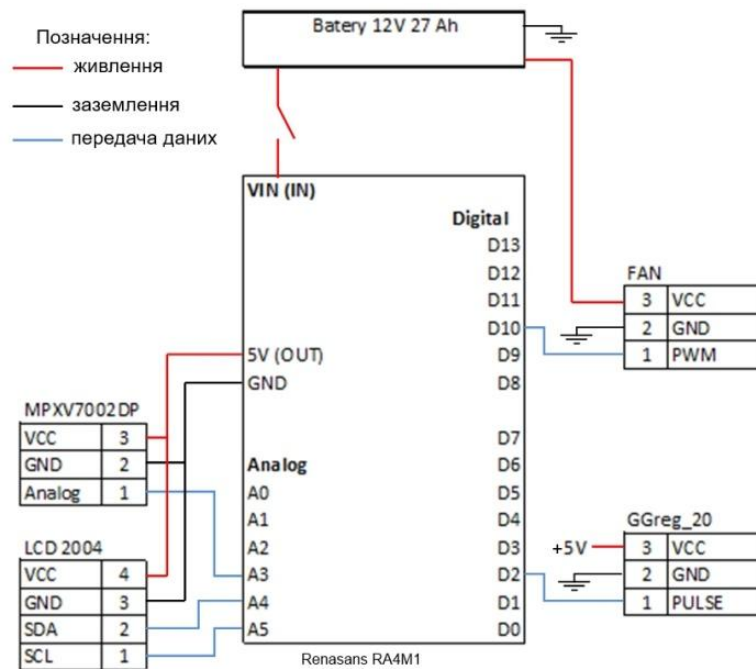


Рисунок 3.7 – Схема підключення до контролера Arduino

Компонування моторового блоку було виконано з урахуванням раціонального розміщення всіх складових елементів у середині корпусу габаритними розмірами 220×120×120 мм. Основним принципом при проектуванні стало забезпечення оптимальної траєкторії руху повітряного потоку.

Повітря, яке надходить через вхідний отвір, спрямовується безпосередньо до вентилятора, після чого подається у капюшон. При цьому траєкторія руху повітря спроектована так, щоб воно проходило через датчики тиску та радіації, що дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів середовища у реальному часі.

Внутрішній простір моторового блоку розраховано таким чином, що частка вільного об'єму становить близько 35 %. Цей простір виконує функцію каналу для руху повітря, забезпечуючи зниження гідродинамічного опору та стабільну роботу вентиляційної системи. Загальна конструкція моторового блоку показана на рисунку 3.8.

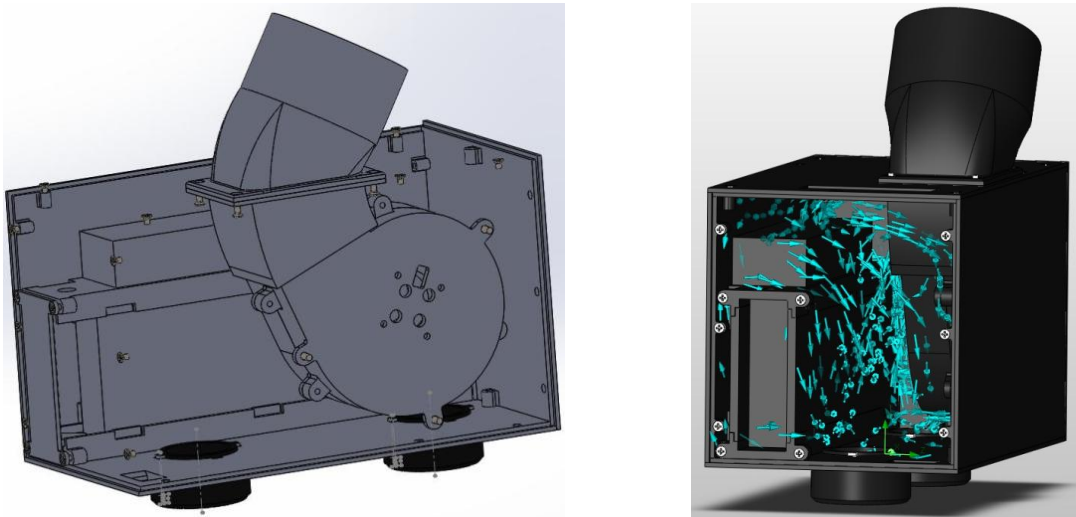


Рисунок 3.8 – Загальна конструкція моторового блоку

3.4 Оцінка відповідності експериментального зразка моторового фільтрувального респіратору з капюшоном нормативним вимогам

Для забезпечення надійного захисту працівників та підтвердження відповідності МФР встановленим вимогам безпеки, проводиться комплекс випробувань згідно зі стандартом ДСТУ EN 12941 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом або капюшоном. Вимоги, випробування, маркування» [18]. Цей стандарт визначає мінімальні вимоги до конструкції, експлуатаційних характеристик та методів випробувань МФР з лицевими частинами у вигляді капюшона. До програми випробувань увійшли такі критичні параметри:

- визначення загального коефіцієнта проникання респіратору;
- перевірка відповідності заявленому класу захисту згідно з вимогами EN 12941;
- оцінка ергономічних характеристик за результатами експлуатаційних випробувань з участю користувачів;
- вимірювання опору диханню в різних режимах роботи респіратору;

- визначення маси лицевої частини зі шлангом як показника зручності використання;
- визначення концентрації діоксиду вуглецю в зоні дихання всередині капюшона за увімкненого МФР для оцінки якості повітрообміну.

Для оцінювання загальної захисної ефективності МФР застосовувався метод згідно EN 13274-1:2001 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнта проникання» [19] з використанням тест-аерозолі хлориду натрію. Згідно вимог методу застосовувалась герметична випробувальна камера, в яку запрошені для тестування випробувачі заходили повністю та виконували певні вправи (Додаток Г).

Тест-аерозоль хлориду натрію створювався генератором ежекційного типу, що надає можливість формувати частинки від 0,02 мкм до 2 мкм. Визначення концентрації часток хлориду натрію проводилось атомно-абсорбційним спектрофотометром C-115M1E, який налаштований на довжину хвилі натрію 590 нм. Схема установки з визначення загального коефіцієнту проникнення МФР за тест-аерозолем наведена на рис. 3.9.

У випробувальну камеру невеликими порціями подавався тест-аерозоль хлориду натрію до досягнення концентрації (8 ± 4) мг/м³, при цьому для створення рівномірної концентрації вмикались вентилятори в середині камери. По досягненні необхідної концентрації подача тест-аерозолі хлориду натрію зупинялась. Вважалось, що за час проведення випробування, яке становило близько 15 хв., значення концентрацій у випробувальній камері значно не зміниться.

Для участі у тестуванні було запрошено 5 кваліфікованих випробувачів, які мають досвід у проведенні оцінювання респіраторів [20]. Додатково на стадії затвердження переліку випробувачів, що будуть залучені до тестування, проводилось їх опитування щодо стану здоров'я, нещодавніх медичних втручань або перенесених захворювань. У разі позитивного рішення, таких випробувачів рекомендували.

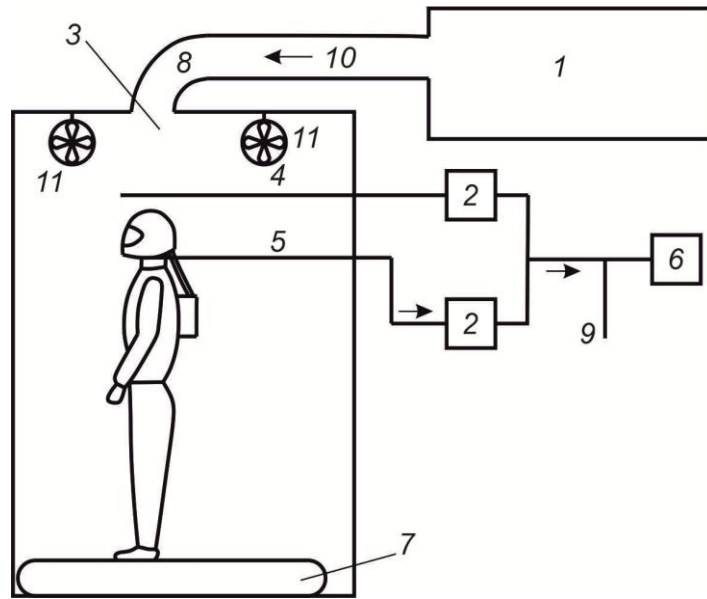


Рисунок 3.9 – Схема установки з визначення загального коефіцієнту проникнення МФР за тест-аерозолем хлориду натрію [19]:

1 – генератор аерозолю з компресором; 2 – аспіратор; 3 – випробувальна камера; 4 – шланг для відбирання проби тест-аерозолю з камери; 5 – шланг для відбирання проби тест-аерозолю з підмаскового простору; 6 – спектрофотометр з виводом даних на ПК; 7 – бігова доріжка; 8 – повітропровід і розподільувач повітря; 9 – скид повітря; 10 – тест-аерозоль; 11 – вентилятори в камері

За результатами опитування та аналізу стану здоров'я з урахуванням ризиків було залучено 5 випробувачів чоловічої статі віком від 20 до 45 років та не мали медичних протипоказань. Перед проведенням тестування усі випробувачі проходили навчання з правил користування даними респіраторами та були ознайомлені з інструкцією з експлуатації МФР. Перед початком безпосередніх випробувань вони проходили практичні навчання з носіння МФР, щоб зменшити вірогідність настання позаштатних ситуацій. Для укомплектування МФР було приєднано скомбінований фільтр AVEC NBC-3/SL (клас захисту A2B2E2K2HgSX P3 D R) зі стандартним різьбленням за EN 148-1, а інший вхідний отвір було закрито герметичною заглушкою.

Методика проведення тестування включала в себе виконання випробувачами ряду вправ:

- ходіння по біговій доріжці, що розташована в горизонтальній площині, протягом 2 хв. зі швидкістю 6 км/год. без поворотів голови та промовляння;
- ходіння по біговій доріжці, що розташована в горизонтальній площині, протягом 2 хв. зі швидкістю 6 км/год. з поворотами голови «вправо-вліво» без промовляння;
- ходіння по біговій доріжці, що розташована в горизонтальній площині, протягом 2 хв. зі швидкістю 6 км/год. з поворотами голови «вправо-вліво» без промовляння;
- ходіння по біговій доріжці, що розташована в горизонтальній площині, протягом 2 хв. зі швидкістю 6 км/год. з читанням тексту та мімікою обличчя.

Постійність швидкості руху випробувачів забезпечувалась використанням електричної бігової доріжки МаххPro X502 (МаххPro, Китай), яка дозволяє встановлювати потрібне значення руху з точністю 0,1 км/год. (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Загальний вигляд випробувача в випробувальній камері з увімкненим МФР з капюшоном

Після кожного випробування капюшон, що входить до складу МФР, провітрювався та проходив процедуру чищення та дезінфекції, випробувальна камера також провітрювалась. Це дозволяло повністю оновити випробувальну атмосферу до попередньо встановлених вимог, а МФР підготувати до використання іншою людиною, а також прибрати частинки, що могли осісти на внутрішній поверхні МФР та створювати похибку в результатах.

Весь час при виконанні випробувань з підмаскового простору аспіратором відбиралась проба об'ємом $0,2 \text{ дм}^3/\text{хв}$. Дані визначались спектрофотометром C-115M1E та передавались до програмного продукту AAS-2009, що створено виробником спектрофотометру, де вони реєструвались та осереднювались. Результати випробувань наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати визначення загального коефіцієнту проникання МФР

Номер випробувача	Ходіння	Рухи головою ліво/право	Рухи головою вгору/вниз	Промовляння	Ходіння мовчки	Середнє значення
1	0,567	0,491	0,217	0,684	0,631	0,518
2	0,316	0,587	0,792	0,732	0,818	0,649
3	0,546	0,730	0,645	0,819	0,643	0,677
4	0,417	0,328	0,446	0,398	0,435	0,405
5	0,678	0,594	0,832	0,916	0,840	0,772
Середнє значення	0,505	0,546	0,586	0,710	0,673	
Максимальне значення	0,678	0,730	0,832	0,916	0,840	

За результатами випробувань встановлено, що максимальний отриманий загальний коефіцієнт проникання становить 0,916 %, тож даний пристрій відповідає класу ТН2

Опір диханню МФР визначався за стандартизованою методикою EN 13274-3:2001 [21] з використанням динамічного повітряного потоку. Схема установки з визначення опору диханню показана на рисунку 3.11.

Капюшон МФР встановлювався на муляжі голови, при цьому наголовний гарнітур регулювався для міцного та надійного закріплення. Заслінки фланцю, що регулює подачу повітря з капюшону, були закриті оскільки на капюшоні передбачена власна система ущільнення. Для здійснення моніторингу величини тиску в середині капюшону використовували електронний мікроманометр Testo 512 (Testo AG, Німеччина) з діапазоном від мінус 2000 Па до 2000 Па, з точністю 1 Па та частотою оновлення даних 1 с.

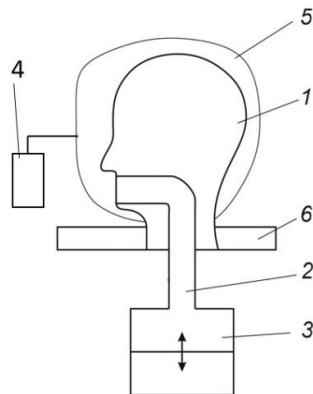


Рисунок 3.11 – Загальна схема установки з визначення опору диханню МФР

1 – муляж голови; 2 – канали руху повітря «вдих-видих»; 3 – дихальна машина; 4 – електронний мікроманометр Testo 512; 5 – випробуваний зразок МФР; 6 – фланець, що регулює потік повітря з капюшону

Один штуцер для шлангів мікроманометра знаходився в навколишньому середовищі та був відкритий. А інший штуцер для шлангів мікроманометра через гнучкий шланг із зовнішнім діаметром 3 мм заводився до капюшону.

За допомогою дихальної машини, яка була відрегульована на 25 циклів/хв. та $2 \text{ дм}^3/\text{хід}$, повітря подавалось в підмасковий простір капюшону за вимкненого моторового блоку при цьому мікроманометром реєструвались дані на фазі видиху, коли в капюшоні створювався надлишковий тиск. Потім за працюючої дихальної машини вмикали моторовий блок МФР і також мікроманометром реєструвались дані на фазі видиху. Результати випробувань наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати визначення опору диханню МФР

Серія випробувань	Опір диханню за вимкненого МФР, Па	Опір диханню за вимкненого МФР, Па
1	2	28
2	2	23
3	1	24
Максимальне значення	2	28

Для моделювання використання МФР у виробничих умовах були проведені експлуатаційні випробування згідно EN 13274-2:2001 [22]. Випробувачі виконували наступні вправи:

- випробування у стані спокою, без виконання будь-якої роботи, випробувач знаходиться сидячи у зручному положенні;
- ходьба по горизонтальній поверхні у повний зріст із постійною швидкістю 6 км/год. протягом 10 хв.;
- ходіння протягом 5 хв. по горизонтальній площині в приміщенні з габаритною висотою $(1,3 \pm 0,2) \text{ м}$;
- пересування протягом 5 хв. по горизонтальній площині в приміщенні з габаритною висотою $(0,7 \pm 0,05) \text{ м}$;
- заповнення невеликої корзини (об'ємом 8 дм^3) гумовою стружкою або іншим придатним матеріалом з бункера висотою 1,5 м., дії виконувалися 19 разів протягом 10 хв. (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Загальний вигляд випробувача при проведенні експлуатаційних випробувань з увімкненим МФР з капюшоном

Для оцінювання було залучено 5 випробувачів чоловічої статі віком від 20 до 45 років. Додатково, на стадії затвердження переліку випробувачів, що брали участь у тестуванні, проводилось їх опитування щодо стану здоров'я, нещодавнього медичного втручання або перенесених захворювань. У разі позитивного рішення, таких випробувачів рекомендували. Перед тестуванням випробувачів ознайомлювали з процедурою випробувань та навчали правилам користування МФР з капюшоном. Участь випробувачів в тестуванні була добровільною, про що вони підписали відповідний документ (погодження) на участь, за яким не мають претензій до організаторів.

По закінченні випробувань проводилось письмове опитування користувачів, щодо комфорту застосування МФР, де вони на запитання суб'єктивно виставляли бали від 1 до 5, де 1 – дуже погано, а 5 – дуже добре. Кожен випробувач отримував індивідуальну анкету з переліком показників та за власними відчуттями суб'єктивно виставляв бали. Під час заповнення анкет випробувачем інші люди, що залучені до експлуатаційних випробувань, були відсутні в приміщенні, щоб уникнути впливу. Під час опитування випробувачі оцінювали наступні показники:

- зручність головного гарнітура (ЗГГ);
- зручність підвісної системи (ЗПС);
- легкість знімання та надягання (ЛЗН);
- надійність кріплень (НК);
- доступність засобів контролювання (ДЗК);
- чіткість і поле зору, охоплюючи запотівання (ЧПЗ);
- легкість та чіткість спілкування (ЛЧС);
- зберігання рівноваги під час використання апарата (РВА);
- розсіювання повітря та швидкість повітряного потоку (РШП);
- свобода рухів головою (СРГ).

Отримані дані переносились з паперових анкет в електронний документ, для обробки експериментальних даних використовувалась програма Microsoft Excel 365. Результати опитування наведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати експлуатаційних випробувань МФР з капюшоном

Показник, що оцінювався	Номер випробувача та отримані бали					Середнє за показником
	1	2	3	4	5	
ЗГГ	5	5	5	4	5	$4,8 \pm 0,45$
ЗПС	4	4	5	4	4	$4,2 \pm 0,45$
ЛНЗ	3	4	4	4	3	$3,6 \pm 0,55$
НК	5	5	5	5	4	$4,8 \pm 0,45$
ДЗК	4	4	5	4	4	$4,2 \pm 0,45$
ЧПЗ	5	5	5	4	5	$4,8 \pm 0,45$
ЛЧС	5	5	5	5	4	$4,8 \pm 0,45$
РВА	4	5	5	4	5	$4,6 \pm 0,55$
РШП	4	5	5	5	4	$4,6 \pm 0,55$
СРГ	4	4	4	5	5	$4,4 \pm 0,55$
Середнє за показником	$4,0 \pm 0,67$	$4,4 \pm 0,52$	$4,6 \pm 0,42$	$4,4 \pm 0,52$	$4,4 \pm 0,67$	

Визначення вмісту діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі виконувалось за стандартизованою методикою EN 13274-6:2001 [23]. Схема випробувального стенду наведена на рисунку 3.13.

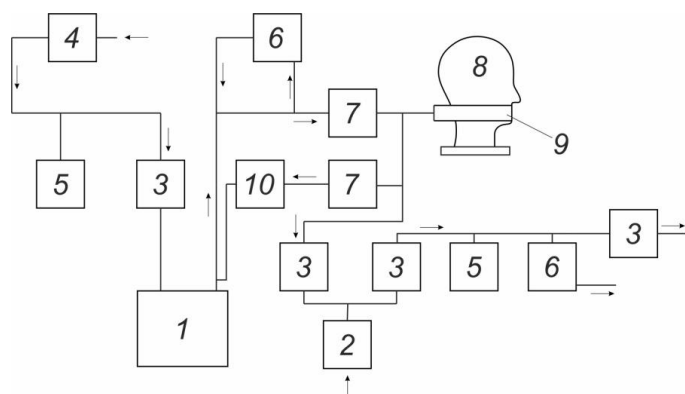


Рисунок 3.13 – Схема з визначення вмісту діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі [21]: 1 – дихальна машина; 2 – допоміжна легеня; 3 – односторонній клапан; 4 – витратомір; 5 – компенсатор; 6 – газоаналізатор CO_2 ; 7 – соленоїдні клапани; 8 – муляж голови; 9 – трубка для відбирання проб; 10 – поглинач діоксиду вуглецю

Концентрація діоксиду вуглецю визначалась за допомогою газоаналізатора «ДОЗОР-С- CO_2 » (НВП «ОРІОН», Україна), який в своєму складі має два блоки контролю – один на лінії видиху (0-5 об %) та другий на лінії вдиху (0-1 об %) з точністю до 0,001 об % (невизначеність за результатами калібрування 0,004 об %). Перед початком випробувань блоком контролю лінії вдиху визначалась лабораторна фоновіа концентрація діоксиду вуглецю, за якої в подальшому коригувалась концентрація в підмасковому просторі.

Вмикалась дихальна машина без встановленого капюшону МФР на муляж. Діоксид вуглецю з балону через систему регулювальних вентилів подавався до дихальної машини і в подальшому постачався до муляжу голови через лінії видиху на фазі видиху. На фазі вдиху повітря, що містить залишки CO_2 по лінії вдиху подавалось до дихальної машини, при цьому невелика частина (до 100 см^3) даної газоповітряної суміші відбиралась на газоаналізатор. Очікували стабілізації показників концентрацій, надягали капюшон МФР та вмикали моторовий блок МФР. Після стабілізації

показників з дисплею газоаналізатора знімалися та реєстрували дані. Знімали капюшон та вимикали МФР, потім знову надягали капюшон на муляж, вмикали моторовий блок МФР та реєстрували дані. Результати випробувань наведені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Результати визначення діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі за увімкненого МФР

Серія випробувань	Фонова концентрація діоксиду вуглецю, об %	Концентрація діоксиду вуглецю в підмасковому просторі, об %
1	0,00	0,683
2	0,00	0,716
3	0,00	0,690
Середнє значення	0,00	$0,696 \pm 0,004$ об %

Визначення маси МФР з повітропроводом виконували на електронних вагах ВР-02МСУ (ОРИЗОН-УНІВЕРСАЛ, Україна) з діапазоном вимірювання до 3 кг точністю 0,2 г (невизначеність за результатами калібрування становить 0,87 г.). Зважування виконувалось тричі для уточнення результату, а дані усереднювались. За результатами випробувань маса лицевої частини з повітропроводом становить 1208 г. Для оцінки правильності проведених замірів повторно виконували зваження окремо лицевої частини (капюшону, 990 г) та повітропроводу (218 г). В результаті додавання визначених окремих мас загальна вага елемента не змінилась, що підтверджує правильність виконаних дій.

Величина рівня шуму, що створюється робочим моторовим блоком становить 48-51 дБ (А) за максимального допустимого значення 75 дБ (А), яке вимірювалось в приміщенні аналізатор спектра шуму WALCOM SL-5868F точністю до 1 дБ. Зведені дані щодо результатів випробувань представлені в протоколі випробувань (Додаток Д) та таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Узагальнююча таблиця результатів лабораторних випробувань МФР з капюшоном

Параметр	Фактичні значення	Вимоги згідно ДСТУ EN 12941
Опір повітряному потоку у підмасковому просторі (в середині капюшону), Па	28 Па	Не більше 350 Па
Маса лицевої частини зі шлангом, кг	1,208	Не більше 1,5 кг
Проектний час роботи за максимальної витрати повітря, хв.	600	Не менше 240 хв.
Рівень шуму моторового блоку, дБ (А)	48-51	Не більше 75 дБ (А)
Загальний коефіцієнт проникання, %	0,916	ТН1 – не більше 10 %
Відповідність класу захисту	ТН2	ТН2 – не більше 2 % ТН3 – не більше 0,2 %
Оцінка за результатами експлуатаційних випробувань, бали	4,4 бали з 5	Суб'єктивна оцінка
Концентрація діоксиду вуглецю в зоні дихання в капюшоні за увімкненого МФР, об. %	$0,696 \pm 0,004$ об %	Не більше 1,0 %

У результаті проведених лабораторних та експлуатаційних випробувань моторового фільтрувального респіратора з капюшоном були отримані дані, що підтверджують відповідність зразка вимогам стандарту ДСТУ EN 12941.

Загальний коефіцієнт проникання аерозолі підтвердив відповідність МФР класу ТН2. Це означає, що проникання шкідливих частинок через систему не перевищує 2 %, що відповідає нормативним вимогам для респіраторів цього класу. Отриманий результат пояснюється конструктивними особливостями системи, зокрема наявністю виходів повітря з підмаскового простору через манжету. Запланована конструкція з нещільним приляганням манжети до шиї може спричиняти ситуативне підсмоктування невеликої кількості нефільтрованого повітря в зону дихання.

Для підвищення класу захисту до ТНЗ доцільно розглянути варіант конструкції з щільним приляганням манжети до шиї користувача. Додатковою потенційною причиною появи підсосів є сам процес виготовлення експериментального зразка, оскільки при ручному монтажі могли виникати неточності у встановленні елементів або їх герметизації.

Оцінка експлуатаційних характеристик, отримана шляхом суб'єктивного опитування випробувачів, становила 4,4 бали з 5 можливих, що свідчить про високий рівень зручності та прийнятності при використанні. Незначне зниження від максимальної оцінки може бути пов'язане з такими факторами, як вага системи або акустичне навантаження [24], однак критичних зауважень не зафіксовано [25, 26].

Показник опору диханню склав лише 28 Па при нормативному обмеженні не більше 350 Па. Це значно нижче за гранично допустиме значення, що пояснюється роботою моторового блоку, який створює надлишковий тиск і забезпечує подачу повітря в зону дихання користувача, а також конструкцією манжети, що дозволяє не накопичувати надлишкове повітря в підмасковому просторі. Таким чином, процес дихання відбувається практично без додаткового навантаження, що позитивно впливає на комфорт праці.

Маса лицевої частини разом із повітропроводом становила 1,208 кг, що не перевищує допустимих 1,5 кг. Цей показник є важливим з огляду на ергономічність та можливість тривалого використання респіратора без значної втоми м'язів шиї та плечового пояса. Слід зазначити, що в конструкцію лицевої частини інтегровано захисну каску за EN 397, яка додатково забезпечує захист голови користувача від механічних впливів та фізичних пошкоджень. Наявність каски збільшує загальну масу вузла, однак при цьому забезпечується комплексна дія засобу захисту, а саме одночасний захист органів дихання та голови, що підвищує рівень безпеки працівника у виробничих умовах.

Акустичний вплив від роботи моторного блока знаходився в межах 48-51 дБ(А), що суттєво нижче граничного значення 75 дБ(А). Такий рівень шуму відповідає фоновим умовам звичайного виробничого середовища та не створює надмірного навантаження на органи слуху, що також підвищує комфортність експлуатації.

Концентрація діоксиду вуглецю у дихальній зоні при увімкненому моторному блоці становила $0,696 \pm 0,004$ %, що нижче допустимого рівня 1,0 %. Це свідчить про ефективне видалення видихуваного повітря і відсутність тенденції до накопичення CO_2 в зоні дихання користувача.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що досліджений зразок моторового респіратора з капюшоном повністю відповідає вимогам ДСТУ EN 12941 для класу TH2. Всі перевірені показники знаходяться в межах нормативних значень, при цьому низький опір диханню, помірний рівень шуму та прийнятна маса конструкції забезпечують високий рівень ергономічності й комфортності використання. Обмеження щодо підвищення класу захисту до TH3 зумовлене саме значенням коефіцієнта проникання, яке не відповідає більш суворим критеріям.

На світовому ринку вже представлені моторизовані фільтрувальні респіратори з капюшонами (зокрема виробництва 3M, Honeywell, Dräger), однак більшість з них орієнтовані на специфічні умови застосування, а саме медичні, промислові чи лабораторні. Запропонована модель відрізняється від існуючих аналогів комплексним підходом до вирішення ключових проблем захисту органів дихання.

По-перше, у конструкції реалізовано універсальність захисту, що передбачає ефективне фільтрування від багатокомпонентних сумішей (пил, газу, аерозолі біологічного походження), тоді як більшість сучасних систем спеціалізуються на окремих видах загроз [27, 28].

По-друге, використано CAD-моделювання та експериментальну перевірку аеродинаміки капюшона, мережі, що подає повітря та фільтрувальних коробок, що дозволило знизити опір руху повітря та

забезпечити його рівномірний розподіл, чого не враховано у більшості серійних виробів [29].

По-третє, інтегровано систему інтелектуального моніторингу ресурсу респіратора, яка у режимі реального часу відстежує рівень забруднення фільтра та прогнозує час ефективної роботи. Це забезпечує підвищений рівень безпеки та знижує експлуатаційні витрати, тоді як у наявних промислових моделях користувач змінює фільтри переважно за графіком [30].

Додатковою перевагою запропонованої моделі є її орієнтація на роботу в умовах надзвичайних ситуацій, включаючи ХБРЯ-загрози. Це досягається завдяки інтеграції системи моніторингу небезпек у реальному часі та можливості швидкої адаптації конструкції до різних сценаріїв застосування [31]. Передбачено сумісність із іншими засобами індивідуального захисту, що дозволяє використовувати респіратор у комплексі з захисними костюмами та комунікаційними системами. Такий підхід забезпечує не лише високий рівень захисту [32], але й функціональну гнучкість, що робить модель придатною для використання як у виробничих, так і в аварійно-рятувальних умовах.

Нарешті, конструкція респіратора вдосконалена з точки зору ергономіки та комфорту: знижено шум вентилятора, оптимізовано ваговий баланс та створено умови для тривалого безпечного використання без втоми. Завдяки поєднанню цих рішень нова модель моторизованого респіратора з капюшоном може розглядатися як більш ефективний та універсальний засіб індивідуального захисту, здатний забезпечити надійне функціонування як у виробничих умовах, так і в медичних та надзвичайних ситуаціях. Порівняння представлено в таблиці 3.14.

В процесі конструювання було враховано експлуатаційні ризики, пов'язані з відмовами підсистем, що характерні для МФР у реальних умовах застосування. Завдяки цьому зменшується ймовірність критичних відмов, зокрема зменшення продуктивності вентилятора, втрату герметичності

системи або раптове блокування повітряного каналу, що безпосередньо впливають на безпеку користувача. Поєднання конструктивних заходів і системи інтелектуального моніторингу забезпечує збереження функціональності навіть у стресових сценаріях рятувальних робіт, де будь-яка несправність може мати небезпечні наслідки.

Таблиця 3.14 – Порівняльна характеристика існуючих моделей та експериментального зразка за функціональними критеріями

Критерій	Існуючі моделі (3M, Honeywell, Dräger)	Запропонована модель
Призначення	Орієнтовані на окремі сфери: медична, лабораторна чи промислова	Універсальне використання: промисловість, медицина, цивільний захист
Тип загроз	Захист здебільшого від одного класу (аерозолі або газу, рідше комбіновано)	Одночасний захист від пилу, газів, аерозолів, біологічних агентів
Аеродинаміка	Стандартні фільтрувальні коробки, без оптимізації потоку	CAD-моделювання потоків, знижений опір, рівномірний розподіл повітря
Моніторинг фільтра	Заміна за графіком або візуальним контролем	Інтелектуальна система прогнозування ресурсу в реальному часі
Ергономіка	Можливі проблеми з вагою, шумом вентилятора, дискомфорт при довготривалому носінні	Оптимізована вага, знижений шум, капюшон із комфортною посадкою
Комунікація	Часто ускладнене спілкування через матеріал капюшона	Враховано акустичні характеристики для кращої чутності
Універсальність фільтрів	Використання стандартних змінних фільтрів для окремих умов	Скомбіновані фільтри з можливістю прогнозування ресурсу
Сфера застосування	Переважно вузькоспеціалізоване використання	Багатофункціональність: промислові об'єкти, медицина, аварійні служби

3.5 Оцінка впливу процесу дихання людини на робочі параметри МФР

Для визначення реального впливу дихальної активності користувача на процеси масообміну у внутрішньому об'ємі капюшона було проведено серію лабораторних досліджень із використанням дихальної машини за стандартної методики та замірів за різних частот дихання. Метою експерименту було отримання емпіричних даних, необхідних для кількісної валідації моделі очищення та насичення газової суміші, а також для встановлення коригувального коефіцієнта $f(W_{роб})$, що враховує інтенсивність виконуваних робіт та присутність людського чинника.

На першому етапі дослідження застосовувався стенд з визначення вмісту діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі [20], для якого дихальна машина налаштована на параметри, що імітують дихальну активність людини при граничному значенні середнього фізичного навантаження. Задано такі режими роботи:

об'єм одного дихального циклу - $2 \text{ дм}^3/\text{хід}$;

частота дихання - 25 циклів/хв ;

хвилинна вентиляція (VE) – $50 \text{ дм}^3/\text{хв}$;

концентрація CO_2 у штучному видиху - 5% .

Робочий об'єм капюшона становив $3,4 \text{ л}$, що відповідає реальним умовам експлуатації.

Дослідження проводилися у двох режимах:

- без подачі повітря від моторизованого блоку ($Q_0 = 0$), щоб оцінити інтенсивність накопичення CO_2 ;

- з увімкненим моторизованим блоком подачі повітря ($Q_0 \approx 95 \text{ дм}^3/\text{хв}$).

За відсутності примусової подачі повітря концентрація CO_2 усередині капюшона зростала виключно внаслідок надходження штучного видиху від дихальної машини. Емпірично встановлено, що концентрація CO_2 швидко

досягає значення 5 % протягом 3–4 секунд після початку подачі газової суміші.

Такий час відповідає характерному періоду насичення повітряного об'єму капюшона за умов відсутності вентиляції та підтверджує високу динамічність процесу накопичення CO_2 при активному диханні користувача.

За увімкненого моторизованого блоку з подачею чистого повітря (витрата близько $95 \text{ дм}^3/\text{хв.}$) динаміка зміни концентрації CO_2 набула характеру експоненційного спадання. Встановлено, що за 4–5 секунд концентрація CO_2 зменшувалася з 5 % до 0,7 %, тобто приблизно до 14 % від початкового значення (рис. 3.14).

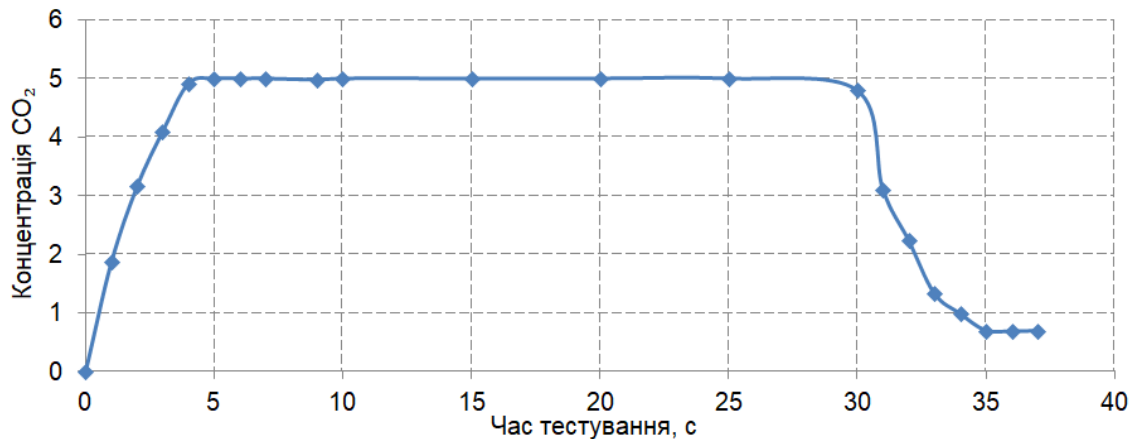


Рисунок 3.14 – Діаграма зміни діоксиду вуглецю в капюшоні за режиму роботи дихальної машини 25циклів/хв та увімкненого моторового блоку

Для визначення експериментальної часу оновлення використано вираз:

$$C(t) = C_{\text{co}_2} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_c}}$$

звідки:

$$\tau_{c \text{ експ}} = \frac{t}{-\ln\left(\frac{C(t)}{C_{\text{co}_2}}\right)}$$

Підставляючи отримані дані ($t = 4,5 \text{ с}$, $C(t)/C_{\text{co}_2} = 0,1392$), було визначено:

$$\tau_{c \text{ експ}} = 2,3 \text{ с.}$$

Теоретичне значення часу оновлення, розраховане за формулою об'ємної зміни повітря в середині капюшону,

$$\tau_{\text{с теор}} = V_{\text{роб}}/Q_0$$

для робочого об'єму $V_{\text{роб}} = 3,4$ л та витрати повітря $Q = 95$ дм³/хв. становить:

$$\tau_{\text{с теор}} = 2,147 \text{ с}$$

Порівняння показує високу відповідність теоретичних (2,147 с) і експериментальних даних (2,3 с), різниця між даними не перевищує 7 %, що підтверджує коректність застосованої моделі.

Другий етап випробовувань вимагав зміни частоти циклів на дихальній машині, що виконувалось шляхом коригування через частотний перетворювач Mitsubishi модель S500. Він дозволяє шляхом зміни вихідної напруги та частоти на двигун дихальної машини через ШІМ-регулятор виставляти необхідні значення обертів двигуна, який передає рух на «штучну легеню» через систему редукторів.

Нами було виставлено різні частоти циклів на дихальній машині, а саме 12, 15, 20 та 30. Менші та вищі значення частот обмежувались запобіганням ризику виходу з ладу обладнання. Це забезпечувало діапазон хвилинної вентиляції легень $VE = 2 \cdot f_{\text{ц/хв}} \cdot V_{\text{роб}} = 24, 30, 40, 50, 60$ дм³/хв., що відповідає рівням фізичного навантаження від легкої ходи до інтенсивного руху.

Так, 12-15 циклів/хв. відповідають спокійному темпу, 20 циклів/хв. – легке фізичне навантаження, 25 циклів/хв. – роботи середньої важкості, 30 циклів/хв. і більше – стресові умови для організму за інтенсивного фізичного навантаження.

У всі режими в дихальну машину подавалася газова суміш із концентрацією CO₂ 5 %, що моделює реальний видих людини. Дослідження проводилися у два етапи:

1. Накопичення CO₂ у внутрішньому об'ємі капюшона до квазістаціонарного рівня (~5 %), що відповідає умовам роботи без примусової подачі повітря.

2. Очищення капюшона після ввімкнення моторованого блоку подачі повітря (початок фази очищення приблизно на 30-й секунді реєстрації результатів).

Концентрація CO_2 реєструвалася стаціонарним газоаналізатором «ДОЗОР-С- CO_2 » (НВП «ОРІОН», Україна) із безперервним відбором проби з точністю до 0,001 об %, що має два датчики – один встановлено в лінію видиху повітря, а інший на лінії вдоху. Така конструкція системи відслідковує зміни в режимі реального часу з інерційністю приладів не більше 1 с.

Крім того, в приміщенні, де проводились випробування контролювався стан атмосфери побутовим датчиком для запобігання накопичення концентрації діоксиду вуглецю, що б вплинуло на достовірність результату. Паралельно працювала припливно-витяжна вентиляція, що забезпечувала загальний повітрообмін в приміщенні та запобігала місцевому накопиченню тестового газу.

Для аналізу фази очищення використовувалася експоненційна модель із ненульовою асимптотою:

$$C(t) = C_{\infty} + (C_{\text{д.в.0}} - C_{\infty}) \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau_{\text{експ}}}}$$

де, $C_{\text{д.в.0}}$ – значення діоксиду вуглецю на момент увімкнення подачі повітря, %; C_{∞} - асимптотичний рівень концентрації, %; t_0 – час початку режиму очищення, с (30 с).

Даною залежністю можна описати процес зміни концентрації діоксиду вуглецю в капюшоні за режимів роботи моторового блоку. Вважаємо, що рух повітряного потоку в капюшоні охоплює увесь об'єм, тому очищення відбувається рівномірно без присутності «мертвих зон». Параметр час оновлення τ_i відображає характер процесу зміни концентрації діоксиду вуглецю в капюшоні від змінної величини об'єму повітря, що подається з моторового блоку через зміну автоматичних налаштувань, та інтенсивності дихання випробувального обладнання (машини).

Результати випробувань в таблиці 3.15. Вплив режиму роботи моторового блоку, що нагнітає повітря в капюшон наведено на рисунках 3.15 та 3.16.

Таблиця 3.15 – Експериментальні результати визначення вмісту діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі за різної інтенсивності дихання

Час тестування, с	Кількість циклів дихання на хвилину за 2 дм ³ /хід				
	12	15	20	25	30
	Виміряна концентрація CO ₂ за різних режимів, %				
0	0	0	0	0	0
1	0,611	0,67	0,937	1,867	1,94
2	1,08	1,115	2,652	3,159	3,467
3	1,862	1,992	3,418	4,103	4,672
4	2,515	2,68	4,23	4,92	5
5	3,01	3,211	4,95	5	5
6	3,744	3,983	5	5	5
7	4,118	4,462	5	5	5
9	4,765	5	5	4,98	5
10	5	5	5	5	5
...	...	...	...	...	...
25	5	5	5	5	5
30	5	4,9	4,8	4,8	4,9
31	4,367	4,285	4,112	3,112	2,916
32	3,819	3,517	3,218	2,24	1,208
33	3,241	2,947	2,317	1,33	0,798
34	2,613	2,034	1,311	0,985	0,624
35	1,941	1,442	0,862	0,696	0,62
36	1,361	0,982	0,768	0,682	0,611
37	1,034	0,763	0,724	0,689	0,616

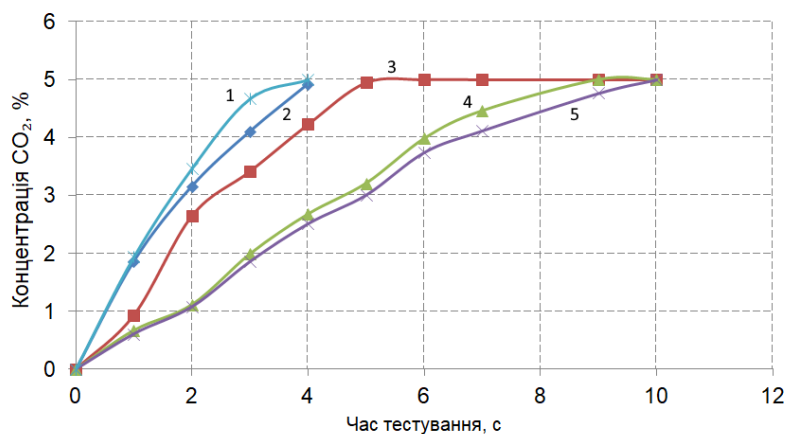


Рисунок 3.15 – Зміна інтенсивності накопичення діоксиду вуглецю в підмасковому просторі в часі за вимкненого моторового блоку:
1 – 30 циклів/хв., 2 – 25 циклів/хв., 3 – 20 циклів/хв., 4 – 15 циклів/хв.,
5 – 12 циклів/хв.

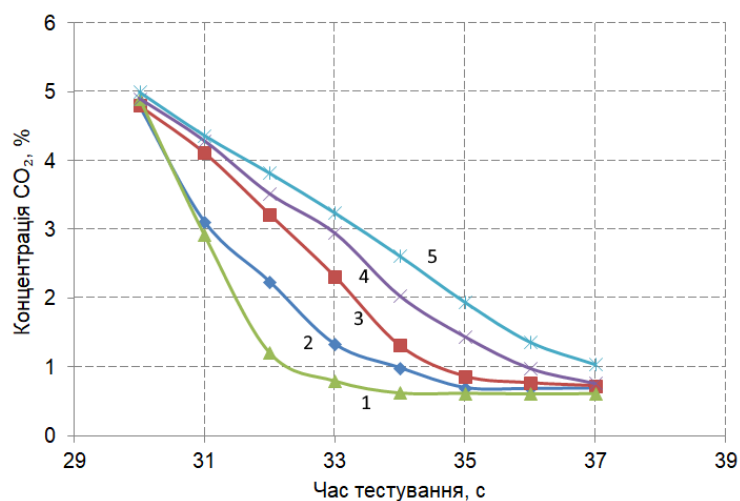


Рисунок 3.16 – Зміна інтенсивності накопичення діоксиду вуглецю в підмасковому просторі в часі за увімкненого моторового блоку:
1 – 30 циклів/хв., 2 – 25 циклів/хв., 3 – 20 циклів/хв., 4 – 15 циклів/хв.,
5 – 12 циклів/хв.

Усі серії даних продемонстрували якісне експоненційне спадання концентрації CO_2 після моменту активації подачі повітря. Параметри очищення отримано з високими коефіцієнтами детермінації ($R^2=0.89\text{--}0.98$), що підтверджує адекватність моделі.

Результати розрахунків часу оновлення наведено в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Результати розрахунків часу оновлення повітря в капюшоні розміру L

Частота дихання, циклів, хв.	VE, дм ³ /хв.	$\tau_{\text{експ}}$, с	C_{∞} , %
12	24	2,717	1,445
15	30	2,269	1,062
20	40	2,066	0,785
25	50	1,517	0,689
30	60	1,011	0,616

Бачимо, що зі зростанням інтенсивності дихання (VE) час оновлення повітря в капюшоні монотонно зменшується. Тобто збільшення інтенсивності дихання пришвидшує оновлення повітря капюшона завдяки пульсаційним потокам та збільшенню рівня турбулентності.

Отримаємо значення коригувального коефіцієнта $f(W_{\text{роб}})$

$$f(W_{\text{роб}}) = \frac{\tau_{\text{експ}}}{\tau_{\text{с теор}}}$$

Розраховані значення коригувального коефіцієнту наведено в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Результати розрахунків коригувального коефіцієнта $f(W_{\text{роб}})$ для капюшону розміру L

Частота дихання, циклів, хв.	VE, дм ³ /хв.	$\tau_{\text{експ}}$, с	$f(W_{\text{роб}})$
12	24	2,717	1,265
15	30	2,269	1,057
20	40	2,066	0,962
25	50	1,517	0,706
30	60	1,011	0,471

За результатами розрахунків бачимо, що є два діапазони:

- $f(W_{\text{роб}}) > 1$, який є характерним для низьких об'ємних швидкостей до $30 \text{ дм}^3/\text{хв}$. Вони характеризуються повільним очищенням підмаскового простору від діоксиду вуглецю;

$f(W_{\text{роб}}) < 1$, який є характерним для об'ємних швидкостей більше $30 \text{ дм}^3/\text{хв}$. Очищення під маскового простору відбувається інтенсивніше, створюються турбулентні потоки та присутній ефект перемішування повітря, що сприяє більш швидкому виведенню діоксиду вуглецю з внутрішнього об'єму капюшону.

Зростання інтенсивності дихальних циклів спочатку уповільнює процес очищення (через додаткове надходження CO_2), але після досягнення певного рівня вентиляції (близько $40 \text{ дм}^3/\text{хв}$.) система починає очищуватися швидше завдяки посиленому перемішуванню та турбулізації повітря. Ця закономірність повністю узгоджується з фізичними процесами масообміну та поведінкою пульсаційних потоків у замкнених об'ємах.

Отже, даний коригувальний коефіцієнт $f(W_{\text{роб}})$ може бути описаний рівнянням

$$f(W_{\text{роб}}) = 1,749 - 0,021VE$$

Проведені експериментальні дослідження підтвердили справедливність використання моделі об'ємного очищення для оцінки динаміки зміни концентрації CO_2 у респіраторному капюшоні. Разом із тим, встановлено, що інтенсивність дихальної діяльності користувача помітно впливає на повітрообмін у капюшоні, що потребує введення коригувального коефіцієнта $f(W_{\text{роб}})$. Отримане значення $f(W_{\text{роб}})$ є кількісною мірою впливу дихання при різних режимах вентиляції, і надалі може бути використане для побудови узагальненої функції залежності ефективного часу очищення від інтенсивності роботи людини.

3.6 Математична модель моторового фільтрувального респіратора з капюшоном

Принципова схема моторового респіратора з капюшоном показана на рис. 3.17.

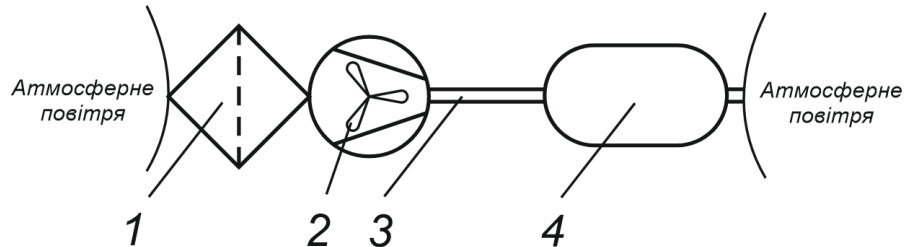


Рисунок 3.17 – Принципова схема моторового респіратора з капюшоном:

1 – фільтр; 2 – вентилятор моторового блоку; 3 – шланг подачі повітря до капюшону; 4 - капюшон

Згідно рисунку 3.17 в моторовому респіраторі атмосферне забруднене повітря проходить через фільтр 1 завдяки різниці тисків, що створюється за допомогою вентилятора 2 та рухаючись повітропроводом 3 потрапляє до капюшона 4 (представлена у вигляді резервуару) та, змішуючись з повітрям при видиху, виходить назовні через нещільне прилягання манжети в області шиї. Тиск повітря в капюшоні змінюється за рахунок зміни витрати повітря при регулюванні швидкості обертання лопатей вентилятора.

Математична модель моторового респіратора з маскою отримана в роботі [33] на основі рівнянь масообміну, балансу тиску та рівнянь руху повітря в системі «вентилятор-фільтр-повітропровід-маска». Після проведення аналітичних перетворень було одержано передавальну функцію, яка описує залежність між зміною швидкості обертання вентилятора та зміною тиску повітря у масці респіратора. Ця передавальна функція має вигляд

$$W_{\Delta p \rightarrow \Delta p_m}(p) = \frac{\Delta p_m(p)}{\Delta n(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

де $\Delta p_m(p)$ – зміна тиску повітря у масці, $\Delta n(p)$ – зміна швидкості обертання вентилятора.

Коефіцієнти $a_3, a_2, a_1, a_0, b_1, b_0$ характеризують фізичні процеси, що відбуваються під час руху та регулювання потоку повітря у респіраторі. Їх числові значення, визначені аналітичним шляхом з урахуванням конструктивних та експлуатаційних характеристик елементів системи,

Коефіцієнти a_3, a_2, a_1, a_0 утворюють знаменник передавальної функції і визначають динамічні властивості системи, зокрема інерційність, демпфування та загальну швидкодію процесу зміни тиску в повітряному тракті. Коефіцієнти b_1 та b_0 утворюють чисельник передавальної функції і описують вплив вентилятора на зміну тиску в системі.

Існуюча модель моторового респіратора була виведена для системи з маскою за EN 136, де вихід повітря відбувається через клапан видиху, а підмасковий простір має постійний об'єм, тому змінюється робочий тиск.

В умовах капюшону спостерігається інша гранична умова виходу повітря, витік відбувається через манжету в області шиї, а також капюшон має більший внутрішній об'єм і нижчий середній тиск у підмасковому просторі. Для адекватного опису динаміки такої системи необхідно модифікувати модель у трьох основних напрямках:

- 1) змінити опис вихідного опору (манжета замість клапана),
- 2) врахувати зміну акумулюючого об'єму та пов'язаного з ним часу заповнення (стала часу), та
- 3) скоригувати вплив густини й режиму течії на втрати в повітропроводі та фільтрі.

Через дуже малу зміну підмаскового тиску (0...+28 Па) модель на основі залежності зміни тиску від величини обертів дає слабку інформативність. Тому будуюмо розглядаємо динамічну модель першого порядку, де вхідними параметрами є швидкість вентилятора n (об/хв.), а вихідними параметрами є об'ємна витрата Q (м³/с). Модель набуває вигляду:

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta n(s)} = \frac{K}{\tau_Q s + 1},$$

де K – стаціонарна чутливість системи, τ_Q – ефективна стала часу.

Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Вхідні дані для моделювання

Назва параметру	Фактичне значення
Довжина шланга подачі повітря $L_{шл}$ та його внутрішній діаметр $d_{шл}$, м	0,75; 0,032
Матеріал шланга	PU, товщина 0,6 мм
Використовуваний фільтр та його опір диханню за витрати 95 дм ³ /хв., Па	AVEC A2B2E2K2HgSX P3 D R, 500
Діаметр манжети $d_{ман}$, м	0,7
Зазор між тканиною та шиєю користувача $\delta_{заз}$, м	0,002 м
Загальний об'єм капюшону $V_{заг.к}$, м ³	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Об'єм голови користувача (приблизно) $V_{гол}$, м ³	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Робоча витрата повітря, дм ³ /хв.	95

Основні припущення:

- процес є ізотермічним, густина повітря розрахована для $T = 20$ °C;
- витоки через шланг, манжету та фільтр в робочому діапазоні описуються квадратичними законами через турбулентні втрати;
- манжету розглянуто як вузьку щілину.

Стаціонарну залежність об'ємної витрати Q від швидкості вентилятора n знаходимо з балансу тисків:

$$p_f(n, Q) = \Delta p_{\text{фільтра}}(Q) + \Delta p_{\text{шланг}}(Q) + \Delta p_{\text{манж}}(Q)$$

Визнаємо робочий повітряний об'єм капюшону

$$V_{нов} = V_{заг} - V_{гол}$$

Розраховуємо ефективну площу витоку через манжету

$$S_{ман} = \pi d_{ман} \delta_{заз}$$

Визначимо коефіцієнт витоку манжети $C_{ман}$

$$C_{ман} \approx \frac{\varepsilon_{ман} \rho_0}{2 S_{ман}^2}$$

$\varepsilon_{ман}$ – місцевий коефіцієнт опору манжети (1,2).

Лінеаризована похідна манжети

$$A_{вих\ ман} = \left. \frac{d\Delta p_{ман}}{dQ} \right| Q_0 = 2C_{ман} Q_0$$

Коефіцієнт втрат шланга

$$C_{шл} = \frac{\rho_0}{2S_{шл}^2} \left(\lambda_{шл} \frac{L_{шл}}{d_{шл}} + \sum \xi_{місц} \right)$$

$\sum \xi_{місц}$ - сумарні місцеві коефіцієнту втрат через опір (0,5).

$\lambda_{шл}$ - коефіцієнт тертя для шланга

Коефіцієнт опору фільтра

$$C_{фільтр} \approx \frac{\Delta p_{фільтр}(Q_i)}{Q_i^2}$$

Q_i – витрата повітря i -ої точки, дм³/хв.

Сумарний квадратичний коефіцієнт системи

$$C_{сист} = C_{фільтр} + C_{шл} + C_{ман}$$

Лінеаризована похідна сумарних втрат

$$A_{сист} = \left. \frac{d\Delta p_{сист}}{dQ} \right| Q_0 = 2C_{сист} Q_0$$

Тиск вентилятора в робочій точці

$$p_f(Q_0, n_0) = \Delta p_{сист}(Q_0)^2$$

Похідні вентилятора P_n та P_Q

$$P_n = \left. \frac{dp_f}{dn} \right| (n_0, Q_0), P_Q = \left. \frac{dp_f}{dQ} \right| (n_0, Q_0)$$

Час об'ємного оновлення повітря в капюшоні τ_c

$$\tau_c = \frac{\rho_0 V_{нов}}{m_0} = \frac{V_{нов}}{Q_0}$$

m_0 – масова витрата повітря в капюшоні

З урахуванням інтенсивності виконуваних робіт, тому відповідно насичення повітря видихуваною концентрацією діоксиду вуглецю, пропонуємо встановити вираз:

$$\tau_c = \frac{V_{ног}}{Q_0} f(W_{роб})$$

де $f(W_{роб})$ – коригувальна функція витрат людини, що враховує інтенсивність виконуваних робіт.

Статична чутливість системи $K_{стат}$

$$(A_{сист} - P_Q) \Delta Q = P_n \Delta n, K_{стат} = \frac{\Delta Q}{\Delta n} = \frac{P_n}{A_{сист} - P_Q}$$

Ефективна динамічна стала часу τ_Q

$$\tau_Q \approx \frac{\tau_c A_{сист}}{A_{сист} - P_Q}$$

Передавальна функція першого порядку

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta n(s)} = \frac{K_{стат}}{\tau_Q s + 1}$$

s – змінна Лапласа

У разі ступінчастої зміни обертів функція набуває форми

$$\Delta Q(t) = K_{сист} \Delta n(t) \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_Q}} \right)$$

Результати розрахунків наведені нижче:

$$V_{пов} = 0.006 - 0.0026 = 0.003400 \text{ м}^3$$

$$S_{ман} = 3.14 \cdot 0.7 \cdot 0.002 = 0.004398 \text{ м}^2$$

$$C_{ман} = \frac{1,2 \cdot 1,205}{2 \cdot 1,936 \cdot 10^{-5}} = 3,73 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$$

$$A_{вих ман} = 2 \cdot 3,73 \cdot 10^4 \cdot 0,0015 = 112 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$$

$$C_{шл} = \frac{1,205}{2 \cdot 6,47 \cdot 10^{-7}} \left(0,04 \frac{0,75}{0,032} + 0,5 \right) = 1,34 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$$

$$C_{фільтр} = \frac{500}{2,506 \cdot 10^{-6}} = 1,996 \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$$

$$C_{сист} = 1,996 \cdot 10^8 + 1,34 \cdot 10^6 + 3,73 \cdot 10^4 = 2,009 \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$$

$$A_{сист} = 2 \cdot 2,009 \cdot 10^8 \cdot 0,0015 = 6,027 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$$

$$p_f(Q_0, 8000) = 2,009 \cdot 10^8 \cdot (0,0015)^2 = 452 \text{ Па}$$

$$P_n = 2 \frac{p_f}{n_0} = \frac{2 \cdot 452}{133.3} = 6.78 \text{ Па/с} = , P_Q = -4,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$$

$$\tau_c = \frac{0,0034}{0,0015} = 2,27 \text{ с}$$

$$K_{stat} = \frac{6,78}{6,027 \cdot 10^5 - (-4,0 \cdot 10^5)} = 6,76 \cdot 10^{-6}$$

$$\tau_Q = \frac{2,27 \cdot 6,027 \cdot 10^5}{1,003 \cdot 10^6} = 1,36 \text{ с}$$

Передавальна функція першого порядку (об/с) має наступний вигляд:

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta n(s)} = \frac{6,76 \cdot 10^{-6}}{1,36s + 1}$$

При перерахунку для характеристик вентилятора (об/хв.) вираз матиме вигляд:

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta n(s)} = \frac{1,13 \cdot 10^{-7}}{1,36s + 1}$$

Залежність об'ємної витрати в капюшоні Q від швидкості вентилятора n представлено на рисунку 3.18.

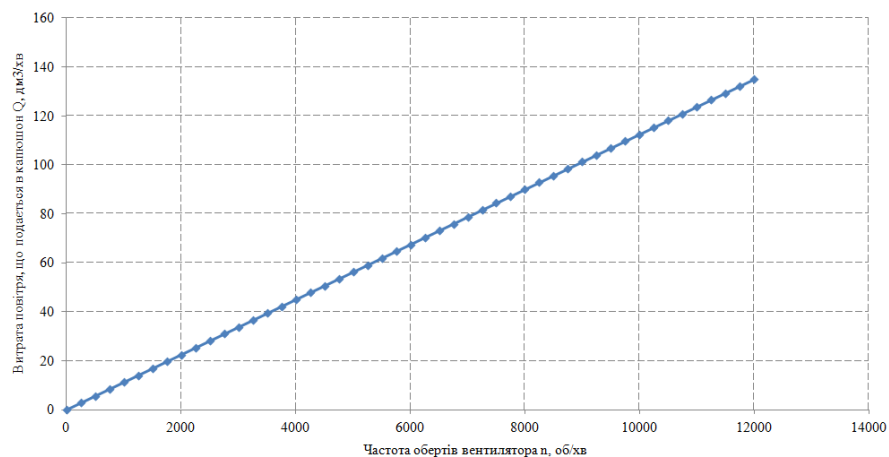


Рисунок 3.18 – Залежність об'ємної витрати в капюшоні Q від швидкості вентилятора n

Отримані результати свідчать про працездатність запропонованої конструкції та її готовність до подальшого етапу, а саме процесу конструювання експериментального зразка та перевірки його характеристик у лабораторних умовах.

Висновки до розділу 3

1. Проведено оцінку ризиків функціонування системи методом FMEA. Визначено потенційні відмови елементів конструкції, проаналізовано їх наслідки та пріоритети. Впровадження коригувальних заходів дозволило знизити всі ризики до прийнятного (низького) рівня, що свідчить про високу надійність і безпечність запропонованої конструкції.

2. Запропоновано концепцію конструкції МФР, яка забезпечує високу ефективність захисту, ергономічність, адаптивність до умов експлуатації та надійність. Передбачено автоматичне регулювання подачі повітря залежно від стану фільтрувальних елементів і дихальної активності користувача, а також моніторинг навколишнього середовища за допомогою сенсорів, зокрема радіаційного контролю.

3. Обґрунтовано конструкцію основних елементів респіратора:

- капюшон інтегровано з ударозахисною каскою, що забезпечує додатковий захист та зменшення маси виробу;
- моторовий блок спроектовано з використанням сучасних матеріалів (ABS+), безколекторного електродвигуна та сенсорної системи на базі мікроконтролера Arduino;
- за результатами експериментальних досліджень рекомендовано використовувати повітропровід діаметром 32 мм для забезпечення оптимальної подачі повітря.

4. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність запропонованої конструкції та її відповідність технічним вимогам. Створений експериментальний зразок МФР може бути використаний як базова модель для подальшої сертифікації та впровадження у виробництво, з можливістю застосування в умовах хімічних, біологічних, радіаційних та ядерних загроз, а також техногенних катастроф.

6. Запропоновано модель об'ємного очищення для оцінки динаміки зміни концентрації CO₂ у капюшоні. Сстановлено, що інтенсивність дихальної діяльності користувача помітно впливає на повітрообмін у

капюшоні, через що було запропоновано коригувальний коефіцієнт $f(W_{\text{роб}})$. Отримане значення $f(W_{\text{роб}})$ є кількісною мірою впливу дихання при різних режимах вентиляції, що може дозволяє побудувати узагальнену функцію залежності ефективного часу очищення від інтенсивності роботи людини.

5. Розроблено математичну модель роботи МФР, яка описує зміну тиску та витрати повітря в системі «вентилятор – фільтр – повітропровід – капюшон». Отримана передавальна функція підтверджує стабільність та ефективність роботи системи за різних режимів вентиляції.

Результати досліджень представлені в даному розділі опубліковані в [2], [3], [6], [7], [17], [21], [22], [23], [28], [29].

Література до розділу 3

1. Powell J. B., Kim J. H., Roberge R. J. Powered air-purifying respirator use in healthcare: Effects on thermal sensations and comfort. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2017. Vol. 14, No. 12. P. 947–954. URL: <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1358817> (дата звернення: 15.10.2025).

2. Bazaluk O., Tsopa V., Cheberiachko S., Deryugin O., Radchuk D., Borovytskyi O., Lozynskyi V. Ergonomic risk management process for safety and health at work. *Frontiers in Public Health*. 2023. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1253141> (дата звернення: 15.10.2025).

3. Костенко Т.В. Особливості травматизму особового складу рятувальних підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану. Актуальні питання охорони праці, цивільної та техногенної безпеки. – 2025. - №1(1). – С. 35-44. URL: [https://doi.org/10.36910/3083-6255/1\(1\).2025](https://doi.org/10.36910/3083-6255/1(1).2025) (дата звернення: 15.10.2025).

4. Глива В. А., Кашперський В. Є., Панова О. В., Бірук Я. І., Зозуля С. В. Методологічний підхід до оцінювання ризиків впливу фізичних факторів техногенного походження в умовах невизначеності. *Системи управління,*

навігації і зв'язку. – 2021. – Вип. 1(63). – С. 123-125. – URL:: 10.26906/SUNZ.2021.1.123 (дата звернення: 15.10.2025).

5. Bochkovskiy A., Sapozhnikova N. Models for optimal management of psychosocial risks in the workplace // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2025. – Vol. 128, no. 2. – P. 72–85. – URL: 10.5604/01.3001.0055.1118 (дата звернення: 15.10.2025).

6. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М. Оцінка надійності протипилових респіраторів. Геотехнічна механіка. 2013. Вип. 112. С. 72–82. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/87389> (дата звернення: 15.10.2025).

7. Sanchez Gonzalez L., Ranjan Kumar A., Arnold B. Powered Air Purifying Respirators (PAPRs) for Protection from Respirable Dust in Underground Mines. Mining, Metallurgy & Exploration. 2025. Vol. 42(5). P. 2743–2759. URL: <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01356-4> (дата звернення: 15.10.2025).

8. Slavinskyi D., Bilko T., Cheberyachko Yu., Vambol S., Yavorska O. Research of the influence of filter element resistance on the powered air-purifying respirator service life. Machinery & Energetics. 2024. Vol. 15(4). P. 34–46. URL: <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.34> (дата звернення: 15.10.2025).

9. Чеберячко С. І., Столбченко О. В., Радчук Д. І., Зіборова М. О. До способу розробки ергономічних фільтрувальних півмасок. Геотехнічна механіка. 2017. Вип. 134. С. 67–75. URL: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0000887013> (дата звернення: 15.10.2025).

10. Голінько В., Радчук Д., Чеберячко С., Наумов М., Кравченко Б., Дерюгін О. Оцінювання експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2024. Т. 8, № 2. С. 27–43. URL: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/203/194> (дата звернення: 15.10.2025).

11. ДСТУ ІЕС 60812:2015. Методи аналізування надійності систем. Аналіз наслідків видів відмов (FMEA). Київ : Мінекономрозвитку України,

2015. 51 с.

12. Signoret J.-P., Leroy A. Failure Mode, Effects (and Criticality) Analysis, FME(C)A. In: Reliability Assessment of Safety and Production Systems. Springer, Cham, 2021. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64708-7_10 (дата звернення: 15.10.2025).

13. Двигун безколекторний A2212/13T-1000kv. URL: https://hobbymania.com.ua/tovar.php?id_tovar=2890 (дата звернення: 15.10.2025).

14. Вентилятор радіальний 9733. URL: <https://izmeritel.in.ua/ua/p2422554839-ventilyator-radialnyj-9733.html> (дата звернення: 15.10.2025).

15. Датчик тиску MPXV7002DP. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/mpxv7002dp_42529.html (дата звернення: 15.10.2025).

16. Детектор радіоактивних частинок, лічильник Гейгера GGreg20_V3. URL: https://iot-devices.com.ua/product-uk/ggreg20_v3-ionizing-radiation-detector-with-geiger-tube-sbm-20/ (дата звернення: 15.10.2025).

17. Мікроконтролер Arduino Uno R4 WiFi ABX00087. URL: <https://arduino.ua/ru/prod6428-arduino-uno-r4-wifi> (дата звернення: 15.10.2025).

18. ДСТУ EN 12941:2004. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом або капюшоном. Вимоги, випробування, маркування. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 44 с.

19. ДСТУ EN 13274-1:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнта проникання. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 16 с.

20. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І. Методика підбору випробувачів дослідження фільтрувальних респіраторів. Метрологія та прилади. 2016. № 2. С. 36–40.

21. ДСТУ EN 13274-3:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 3. Визначення опору диханню. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 14 с.

22. ДСТУ EN 13274-2:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 2. Експлуатаційні випробування. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 11 с.

23. ДСТУ EN 13274-6:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 6. Визначення вмісту діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 14 с.

24. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Шароватова О. П., Луценко Т. О. Вплив фільтрувальних респіраторів на розбірливість мовлення. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. Вип. 3(36). С. 219–232. URL: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-17> (дата звернення: 15.10.2025).

25. Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Столбченко О. В., Радчук Д. І. Експериментальні дослідження впливу параметрів мікроклімату на працездатність людини під час використання фільтрувальних респіраторів. Український журнал з проблем медицини праці. 2017. № 4(53). С. 54–58. URL: <https://doi.org/10.33573/ujoh2017.04.054> (дата звернення: 15.10.2025).

26. Cheberiachko S., Radchuk D., Cheberiachko Yu., Deryugin O., Naumov M. Evaluation of the Impact of Wearing a Filtering Half Mask on the Cognitive Indicators of Users. Advances in Science and Technology. 2025. Vol. 162. P. 109–119. URL: <https://doi.org/10.4028/p-1jvLXW> (дата звернення: 15.10.2025).

27. Nazarious M. I., Mathanlal T., Zorzano M.-P., Martin-Torres J. Pressure Optimized PowEred Respirator (PROPER): A miniaturized wearable cleanroom and biosafety system for aerially transmitted viral infections such as COVID-19. HardwareX. 2020. Vol. 8. e00144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00144> (дата звернення: 15.10.2025).

28. Xu S. S., Lei Z., Zhuang Z., Bergman M. Computational Fluid Dynamics Simulation of Flow of Exhaled Particles from Powered-Air Purifying Respirators. Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference. 2019. Vol. 1(V001T02A048). URL: <https://doi.org/10.1115/detc2019-97826> (дата звернення: 15.10.2025).

29. Teng G., Shi G., Zhu J., et al. Research on the air supply adjustment technology of breath-following powered air-purifying respirators. Scientific Reports. 2023. Vol. 13. 12219. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39411-z> (дата звернення: 15.10.2025).

30. Aqueveque P., Díaz M., Gomez B., Osorio R., Pastene F., Radrigan L., Morales A. Embedded Electronic Sensor for Monitoring of Breathing Activity, Fitting and Filter Clogging in Reusable Industrial Respirators. Biosensors. 2022. Vol. 12(11). 991. URL: <https://doi.org/10.3390/bios12110991> (дата звернення: 15.10.2025).

31. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Клімов Д. Г., Шароватова О. П., Грідяєв В. В. Засоби індивідуального захисту органів дихання: інновації щодо зниження ризику професійних захворювань. Комунальне господарство міст. 2023. Т. 1, Вип. 175. С. 221–228. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-221-228> (дата звернення: 15.10.2025).

32. Borodina N., Cheberiyachko S., Cheberyachko Yu., Deryugin O., Radchuk D., Klimov D. Study of protective efficiency of respirator with forced air supply. Social Development and Security. 2020. Vol. 10, No. 6. P. 192–201. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.6.18> (дата звернення: 15.10.2025).

33. Славінський Д. В. Автоматизація процесу керування моторизованим респіратором на основі регулювання циклічних потоків : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Кривий Ріг, 2024. 151 с. URL: https://www.knu.edu.ua/storage/files/.../dis_slavinskyi.pdf (дата звернення: 15.10.2025).

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СКОМБІНОВАНИХ ФІЛЬТРІВ ДО УНІВЕРСАЛЬНИХ РЕСПІРАТОРІВ

4.1 Аналіз впливу робочих умов на використання скомбінованих фільтрів

Оцінки впливу виробничих умов на ефективність використання скомбінованих фільтрів проводилась шляхом моделювання шахтного середовища. Аналіз отриманих результатів свідчить, що коефіцієнт проникнення змінюється як у процесі експлуатації через поступове зниження адсорбційної здатності поглинача в фільтрі, так і внаслідок збільшення фізичних навантажень, що призводить до зростання об'єму вдихуваного повітря, а тому й загальної витрати повітря, що пройде через фільтр. Це зумовлює необхідність автоматизованого контролю часу ефективної дії фільтра, наприклад, за допомогою сенсорів, особливо дана проблема є актуальною при підвищенні фізичної активності користувача (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Усереднені значення коефіцієнтів проникання через фільтр на випробувачах

Показник	Час експерименту, хв.	Зміна концентрації шкідливої речовини (%) у під масковому просторі при різному навантаженні, Вт		
		150	200	250
Коефіцієнт проникнення хлориду натрію, %	1	2,04	2,17	2,37
	5	2,17	2,36	2,85
	10	2,18	2,57	3,33
	15	2,36	2,69	3,84
Коефіцієнт проникнення H ₂ S	1	0,382	0,458	0,496
	5	0,432	0,502	0,574
	10	0,414	0,532	0,656
	15	0,478	0,564	0,744

На рисунках 4.1 та 4.2 представлено графіки залежностей середньої розрахованої концентрації хлориду натрію та сірководню в підмасковому просторі від загальної концентрації речовини у випробувальній камері в залежності від фізичного навантаження випробувача.

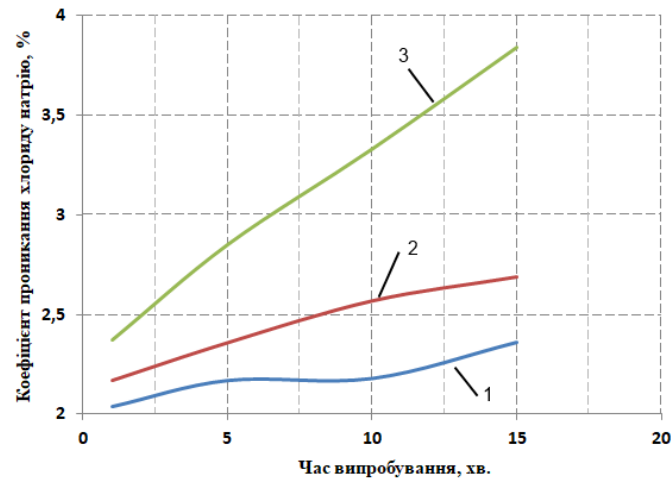


Рисунок 4.1 – Залежність коефіцієнту проникання хлориду натрію в часі від енерговитрат людини в респіраторі зі скомбінованим фільтрами:

1 – енерговитрати 130 – 150 Вт; 2 – енерговитрати 180 – 220 Вт;

3 – енерговитрати 220 – 250 Вт.

Встановлено, що зі зростанням фізичного навантаження опір диханню фільтрів зростає лінійно [1, 2], що обумовлено підвищенням об'єму повітря, яке вдихається, а також зміною ритму та частоти дихання. Водночас для точного розрахунку тривалості захисної дії скомбінованих фільтрів у шахтному середовищі необхідно враховувати наявну залежність, що відповідає зміні умов експлуатації.

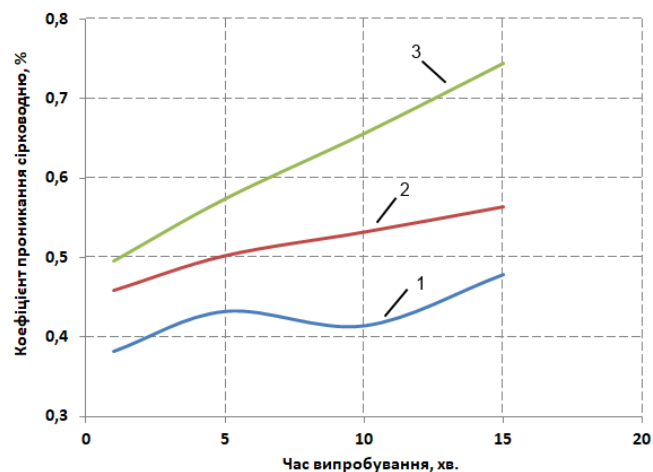


Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнту проникання сірководню в часі від енерговитрат людини в респіраторі: 1 – енерговитрати 130 – 150 Вт; 2 –

енерговитрати 180 – 220 Вт; 3 – енерговитрати 220 – 250 Вт.

Проведені дослідження показали, що динаміка зміни опору диханню при різних рівнях фізичної активності має нелінійний характер, що пов'язано зі змінами режиму повітряного потоку всередині самого фільтра (рис. 4.3 і табл. 4.2).

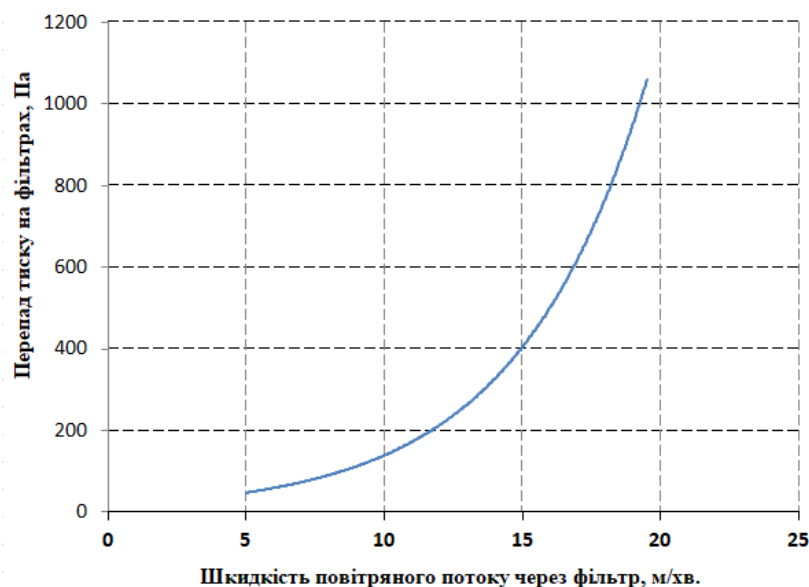


Рисунок 4.3 – Зміна опору диханню скомбінованих фільтрів при різних витраті повітря в залежності від фізичного навантаження.

Таблиця 4.2 – Зміна опору диханню скомбінованих фільтрів при різних фізичних навантаженнях.

Лнійна швидкість повітряного потоку через фільтр, м/хв.	Середнє значення опору диханню, Па, для комбінованого фільтра типу A1B1E1K1 P2 при енерговитратах.		
	130 – 150 Вт	180 – 200 Вт	220 – 250 Вт
5	51	—	—
8.9	100	—	—
10.1	143	143	—
11.4	—	190	—
12.7	—	232	232
13.6	—	—	312
14.3	—	—	390
15.1	—	—	410
16.0	—	—	467

Таким чином, можна розглядати, що на нелінійність зміни повітряного потоку додатково впливає конструкція встановленого протиаерозольного фільтра – плоска або складчаста форма. Наступним кроком було з'ясування

терміну служби фільтрів при різних концентраціях шкідливої речовини та тривалості активності користувача. Вважалось, що дотримується наступна умова для визначення часу роботи скомбінованого фільтра [3]:

$$\begin{cases} R_{\phi} \leq R_{\phi k} \\ t_{\phi} \leq T_{\phi k} \end{cases}$$

де R_{ϕ} – аеродинамічний опір фільтра, Па•с/м; $R_{\phi k}$ – максимально допустиме значення аеродинамічного опору фільтра, Па•с/м, Па; T_{ϕ} – час захисної дії скомбінованого фільтра, хв.; $T_{\phi k}$ – максимальний розрахований час захисної дії скомбінованого фільтра, хв.

Аеродинамічний опір фільтра за постійної концентрації шкідливих речовин в повітрі безпосередньо залежить від об'ємної витрати повітря, що проходить через фільтр, а тому відповідно й навантаження, та може бути розраховано за формулою:

$$\Delta P = \mu \cdot v \cdot k_{\phi}$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, $(18 \cdot 10^{-6})$ Па•с; v – швидкість потоку повітря, що проходить через фільтр, м/хв. (0-20 м/хв); k_{ϕ} – коефіцієнт опору фільтра, $m^{-1} (50 - 1000) \cdot 10^6$.

Зі збільшенням кількості осадженого пилу на волокнах фільтру відбувається й зростання аеродинамічного опору, тоді як коливання або збільшення концентрації газопароподібних шкідливих речовин у повітрі, що проходить через фільтр, не призводить до значних змін цього параметру. При цьому відзначаємо, що швидкість повітряного потоку, який проходить через фільтр, зростає зі збільшенням фізичної активності працівників. Таким чином можна змодельовати зміну опору диханню респіратору та динаміку коефіцієнта захисту в часі з урахуванням рівня активності персоналу (рис. 4.4). Для наших розрахунків встановлюємо, що рівень запиленості повітря становить приблизно 80 мг/м³.

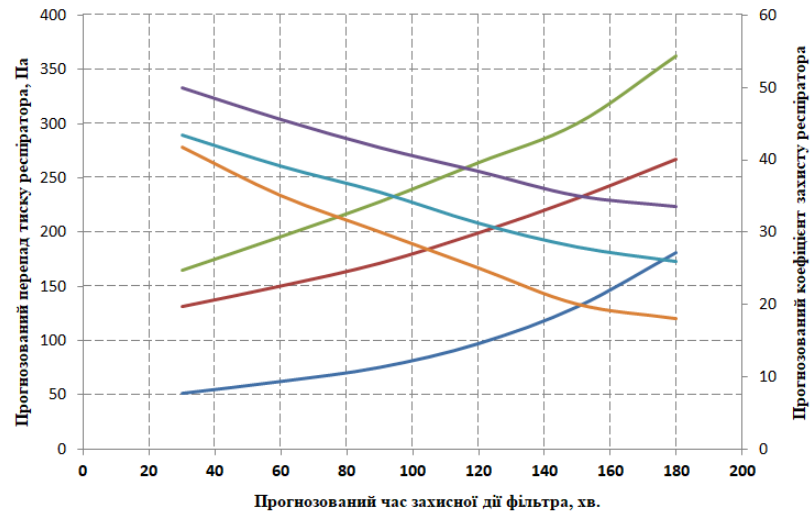


Рисунок 4.4 – Прогнозована зміна опору диханню та коефіцієнта захисту респіраторів зі скомбінованими фільтрами від фізичної активності людини з часом: 1 – опір диханню при фізичному навантаженні 130 – 150 Вт; 2 – опір диханню при фізичному навантаженні 180 – 200 Вт; 3 – опір диханню при фізичному навантаженні 220 – 250 Вт; 4 – коефіцієнт захисту при фізичному навантаженні 130 – 150 Вт; 5 – коефіцієнт захисту при фізичному навантаженні 180 – 200 Вт; 6 – коефіцієнт захисту при фізичному навантаженні 220 – 250 Вт.

Для розрахунку часу захисної дії використовувалась загально відома формула Віллера-Джонаса [4]:

$$t_{\phi} = C_0^{-1} V_i^{-1} W_e \rho_c \left(H_f - \frac{V_l}{k_v} \ln \left(\frac{C_0 - C_p}{C_p} \right) \right), \quad (4.1)$$

де W_e – адсорбційна здатність активованого вугілля, г/г, C_0 – концентрація шкідливої речовини поза респіратором, г/см³, V_i – витрата повітря, що проходить через активоване вугілля, см³/хв, ρ_c – щільність упаковки гранул активованого вугілля, г/см³, H_f – маса активованого вугілля у фільтрі, г; k_v – коефіцієнт швидкості адсорбції, хв⁻¹, C_p – концентрація проникнення, визначена для певної речовини, г/см³.

За формулою (4.1) було проведено розрахунок часу захисної дії скомбінованих фільтрів в залежності від фізичного навантаження користувача (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Результати визначення мінімального часу захисної дії скомбінованих фільтрів, хв, при різних фізичних навантаженнях.

Тип та марка фільтра	Мінімальний час захисної дії скомбінованих фільтрів, хв, при різних фізичних навантаженнях, Вт, і концентрації шкідливої речовини (сірководень), мг/м ³											
	150 Вт				200 Вт				250 Вт			
	10	20	30	50	10	20	30	50	10	20	30	50
A1B1E1K1 P2	5574	2786	1867	1120	3328	1641	1103	674	1862	933	622	373

Проникнення сірководню не є прямо пропорційним проникненню твердих аерозольних частинок, оскільки значною мірою залежить від наявності нещільностей у зоні обтірації. При енерговитратах у межах 130–150 Вт спостерігається поступове зростання коефіцієнта проникнення вже з першої хвилини, яке триває до п'ятої хвилини. Після цього відзначається незначне зниження рівня проникнення, а згодом – повторне його зростання [5]. Ці зміни можна пояснити фізіологічними реакціями організму: зі зростанням навантаження на дихальну систему та зниженням рівня кисню у вдихуваному повітрі через накопичення CO₂ в підмасковому просторі, дихання стає глибшим і частішим [6]. Приблизно через 10 хвилин організм адаптується до навантаження, однак із подовженням періоду активності з'являється втома, яка знову викликає збільшення частоти та глибини дихання.

В роботах [7, 8] дослідники встановили, що використання респіраторів призводить до зростання інтенсивності дихання, а під час розмови легенева вентиляція суттєво підвищується. Автори дослідження [9] також зазначають, що вік та стать випробувачів мають помітний вплив на результати. Молоді та здорові користувачі респіраторів демонстрували максимальні значення швидкості повітряного потоку, хвилинної вентиляції та миттєвої швидкості потоку, які стабільно перевищували стандартні показники [10].

Навіть за сталої концентрації хлориду натрію (80±10) мг/м³ у п'яти випробувачів було зафіксовано відмінності в результатах, попри використання респіраторів однієї моделі. Це може бути пов'язано з

індивідуальними антропометричними особливостями обличчя, що впливають на щільність прилягання лицевої частини. Розрахована концентрація хлориду натрію в підмасковому просторі свідчить про ефективність фільтрів класу P2 за такого рівня забруднення, що забезпечує належний захист користувача.

Використання протигазового компонента в конструкції фільтра демонструє високу ефективність у випадках забруднення повітря газоподібними речовинами [11]. Потрапляння шкідливих домішок у підмасковий простір зазвичай зумовлене підсмоктуванням нефільтрованого повітря через нещільності в зоні обтюрації або через клапан видиху, навіть за умов справної роботи протигазового фільтра [12].

Згідно з результатами моделювання на рис. 3.4, опір диханню фільтрів протягом робочої зміни не досягає граничних значень, встановлених стандартами для відповідного засобу індивідуального захисту. Також спостерігається уповільнення темпів зростання опору, що може бути пов'язано з процесами часткової саморегенерації фільтрувального матеріалу. Подібним чином коефіцієнт захисту стабілізується з часом, імовірно внаслідок досягнення динамічної рівноваги в системі "користувач–дихання", коли зони потенційного підсмоктування перекриваються, а фільтрація відбувається стабільно через сформовані канали потоку.

Водночас слід враховувати, що існують критичні точки, де перетинаються криві опору диханню та коефіцієнта захисту, що свідчить про зниження ефективності респіратора. Недоліком скомбінованих фільтрів є їх вищий опір диханню порівняно з протиаерозольними фільтрами, що може призводити до більш імовірного проникнення нефільтрованого повітря через щілини за лінією прилягання, тоді як повітря має проходити через фільтр [13]. Крім того, високий дихальний опір підвищує навантаження на дихальну систему, викликаючи швидшу втому користувача, потребу в частіших перервах або зниженні темпу роботи [14]. З іншого боку, у дослідженні [15] було показано, що підвищений опір вдиху не чинить негативного впливу на когнітивні функції чи емоційний стан користувача.

З метою зниження навантаження на організм користувача, спричиненого підвищеним опором диханню фільтрів, необхідно визначити типи робіт і сформувавши перелік робочих місць, де обов'язковим є застосування саме скомбінованих фільтрів.

Слід звернути увагу, що у більшості скомбінованих фільтрів конструктивно використовуються протиаерозольні фільтри пласкої форми класу P1, які значною мірою спричиняють різке підвищення опору диханню. Натомість в конструкції протиаерозольних фільтрів класів P2 та P3 застосовуються елементи складчастої форми, які мають менший опір. Отже, заміна пласких фільтрів P1 на складчасті може суттєво знизити опір диханню, що підтверджується результатами дослідження [16]. За можливості рекомендується також використовувати моторизовані універсальні респіратори з примусовою подачею повітря, що дозволяє зменшити навантаження на дихальну систему працівника [17].

Для мінімізації ризиків, пов'язаних із неправильним застосуванням респіраторів, слід розробити й впровадити на підприємстві цілісну систему щодо захисту органів дихання. Водночас варто зазначити, що в межах даного дослідження був використаний лише один бренд та тип респіратора зі скомбінованими фільтрами, тому у майбутніх дослідженнях доцільно розширити спектр моделей і типів фільтрів для більш об'єктивного порівняння та аналізу ефективності.

4.2 Дослідження впливу геометричних параметрів протигазової частини фільтрувальних коробок на захисні властивості

У рамках даного дослідження були використані дві основні форми конструкцій фільтрів для протигазів із аналогічним об'ємом адсорбенту (близько 100 см³) – циліндричної та трапецеподібної форми. Як показують статистика проведених випробувань та результати досліджень ринку засобів

індивідуального захисту даного об'єму адсорбенту достатньо для першого класу захисту. Досліджувані фільтри були призначені для захисту від органічних хімічних речовин, тобто мали позначку тип А. Пористість активованого вугілля, що заповнює корпус, становила 0,26. На рисунку 4.5 зображено зразки фільтрів обох форм.



Рисунок 4.5 – Загальний вигляд фільтрів трапецевидної (а) та циліндричної (б) форм

Геометричні параметри корпусів протигазових фільтрів визначали за допомогою електронного штангенциркуля (Syntek, Китай) із діапазоном вимірювань 0–150 мм та точністю 0,1 мм. Для більшої точності та подібності при вимірюваннях обирались контрольні поверхні такі, як менша та більша сторони, висота елементу, серединна лінія корпусу фільтра, діаметр тощо. Дані спочатку записували на паперових носіях, а згодом переносили до електронного документу Microsoft Excel 365 для математичної обробки.

Повітряні потоки в корпусах протигазових фільтрів моделювали за допомогою програми SolidWorks. Конструкції фільтрів (рис. 4.5) були оцифровані (рис. 4.6), що дозволило створити 3D-моделі, які найбільш точно відтворюють їх реальні розміри. Основні характеристики та параметри корпусів фільтрів представлено в таблицях 4.4 та 4.5.

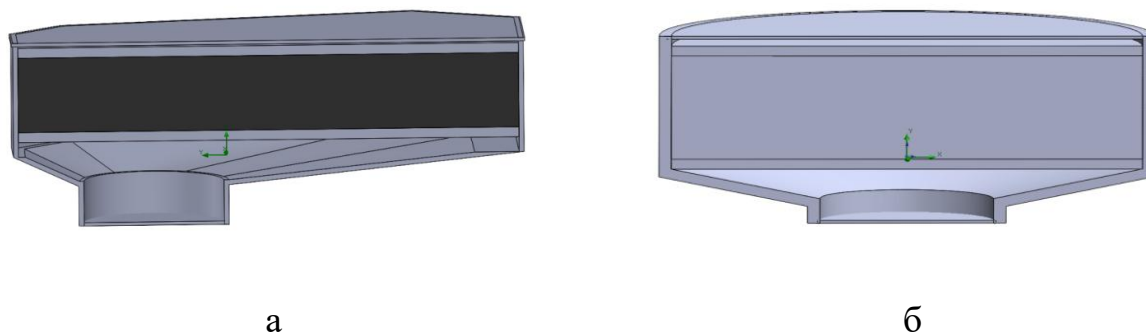


Рисунок 4.6 – 3D моделі протигазових коробок трапецевидної (а) та циліндричної форми (б)

Таблиця 4.4 – Характеристики фільтрувальних коробок циліндричної форми

Параметри циліндричної фільтрувальної коробки	Значення
Радіус коробки R_k , мм	38-45
Площа фільтра S , см^2	45-64
Радіус вихідного отвору r_k , мм	12-16
Висота коробки H , мм	32-38
Зазор між адсорбентом і задньою кришкою фільтрувальної коробки h , мм	4-6
Зміщення вихідного отвору від центра коробки, мм	0
Опір повітряному потоку, Па, за витрати $15 \text{ дм}^3/\text{хв.}$	84-100
Кількість направляючих повітряного потоку	6-8

Таблиця 4.5 – Характеристики фільтрувальних коробок трапецевидної форми

Параметри трапецевидної фільтрувальної коробки	Значення
Ширина коробки B_k , мм	80-86
Довжина коробки L_k , мм	92-110
Площа фільтра S , см^2	60-72
Радіус вихідного отвору r_k , мм	12-16
Висота коробки H , мм	24-30
Зазор між адсорбентом і задньою кришкою фільтрувальної коробки h , мм	4-6
Зміщення вихідного отвору від центра коробки, мм	15-25
Опір повітряному потоку, Па, за витрати $15 \text{ дм}^3/\text{хв.}$	31-49
Кількість направляючих повітряного потоку	10-12

У програмному середовищі SolidWorks задавали рух повітря з витратою, що змінювалася в межах від 15 до $50 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ Також задавалася

кількості ітерацій (до 283) з урахуванням достатнього рівня достовірності розрахунку. Ітераційний процес завершувався, коли величина кроку варіювання ставала меншою за допустиму похибку, що становила не більше 5 %.

У процесі розрахунків були побудовані епюри розподілу швидкостей повітряного потоку через корпуси протигазових фільтрів. Для оцінки рівномірності осідання частинок на поверхні фільтра використовували співвідношення $V_{\max}/V_{\min}$, яке знижували під час розрахунків. Найбільш рівномірний розподіл швидкостей спостерігався в зонах із найменшим значенням цього показника, що сприяло усуненню застійних зон і вирівнюванню швидкостей у досліджуваній області. Результати порівнянь співвідношень $V_{\max}/V_{\min}$ представлені у вигляді залежностей.

При моделюванні враховували такі конструктивні особливості:

1. У циліндричних корпусах протигазових фільтрів вхідний та вихідний отвори були симетрично розташовані відносно осі. Вони мали форму дифузора, при цьому вхідний отвір був ширшим за вихідний, який сполучався із лицевою частиною респіратора.

2. У фільтрувальних протигазових коробках плоскої форми вихідний отвір був зміщений відносно центральної осі виробу. Це рішення покращує поле зору користувача завдяки оптимальному розподілу маси фільтра та відведення частини корпусу по за поле зору користувача.

3. Висота корпусів фільтрів трапецевидної форми зазвичай не перевищувала 30 мм, що також сприяло розширенню поля зору користувача, тоді як циліндричні корпуси мали висоту не менше 30 мм.

За результатами визначення опору повітряному потоку було встановлено, що форма корпусу фільтра впливає значення останнього. За однакових площі фільтрувальної поверхні, висоти шару адсорбенту та щільності його упакування саме форма корпусу фільтра призводить до різної нелінійної залежності між величиною перепаду тиску і витратою повітря (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Характеристики коробок протигазових фільтрів

Тип фільтра	Площа фільтрувальної поверхні, см ²	Вимірний робочий об'єм протигазового фільтра, см ³	Середнє значення перепаду тиску, Па, за витрати	
			15 дм ³ /хв.	47,5 дм ³ /хв.
Трапецевидної форми	64,2	96	37	124
Циліндричної форми	45,3	86	90	320

Дослідження показали, що різниця в опорі повітряному потоку серед фільтрувальних коробок різних форм обумовлена їх конструктивними особливостями, які значно збільшують шлях проходження повітря через адсорбент, оскільки вихідний отвір може бути зміщено відносно центру коробки (рис. 4.6). Ймовірно, розробники впровадили такий дизайн для подовження часу захисної дії фільтрувальних коробок трапецевидної форми. Крім того, трапецевидна форма забезпечує нижчу швидкість фільтрації за інших рівних умов (табл. 4.7), що також позитивно впливає на тривалість їх захисної функції.

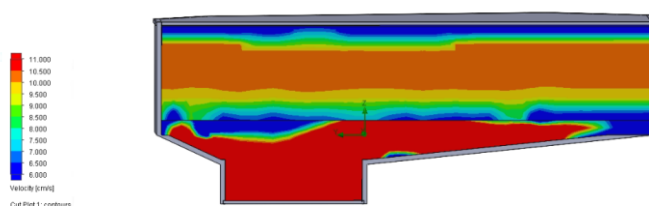
Таблиця 4.7 – Дослідження швидкості руху повітря за об'ємом фільтрувальної коробки

Конструктивні параметри	Величина середньої швидкості руху повітряного потоку крізь фільтри, м/с	
	Трапецевидної форми	Циліндричної форми
Площа фільтрувальної поверхні		
110 см ²	0,21	0,28
80 см ²	0,42	0,44
50 см ²	0,62	0,65
Діаметр вихідного отвору		
24 мм	12,3	17,1
28 мм	10,3	14,2
32 мм	8,1	11,2
Зміщення діаметру вихідного отвору від центру коробки на		
5 мм	16,2	17,8
10 мм	14,1	18,6
15 мм	12,3	21,2

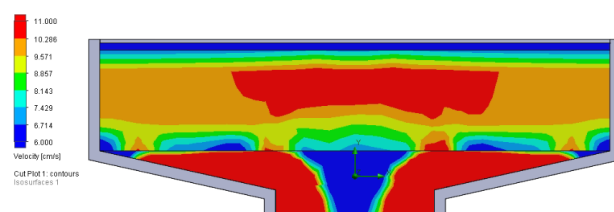
Продовження таблиці 4.7

Зазор між адсорбентом і нижньої стінкою фільтра		
4 мм	36,1	32,1
5 мм	21,2	24,2
6 мм	12,3	17,1
Висота фільтрувальної коробки		
24 мм	12,3	17,1
28 мм	10,3	15,1
32 мм	8,3	12,1

Так, при дослідженні впливу діаметру фільтрувальної поверхні на величину швидкості фільтрування (рис. 4.7) в кожному із зазначених типах фільтрувальних коробок видно, що швидкість фільтрування в середньому на 15 % менша саме у коробки трапецевидної форми.



а



б

Рисунок 4.7 – Моделі розподілу швидкості фільтрування в фільтрувальних коробках трапецевидної (а) та циліндричної (б) форм з однаковою площею поверхні, висотою, вихідним отвором та щільністю сорбенту

Схожі результати спостерігалися й у випадку зміни діаметра вихідного отвору з коробки фільтра. Зміна розміру вихідного отвору впливала не тільки на рівномірність розподілу швидкості потоку повітря, що фільтрується через адсорбент, в коробці, але й на величину перепаду тиску (рис. 4.8).

Збільшення діаметра вихідного отвору сприяло покращенню отримуваних результатів за рахунок зменшення швидкості фільтрування, що виникало через впріювання вихідного отвору.

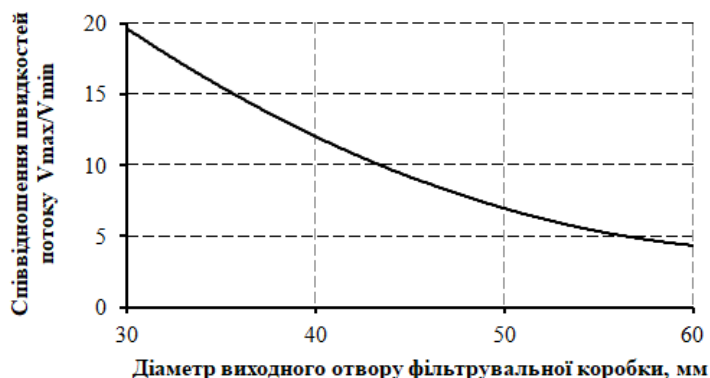


Рисунок 4.8 – Крива залежності розподілу відносної швидкості повітряного потоку від розміру діаметру вихідного отвору

Треба зауважити, що параметри вихідного отвору фільтра встановлюються виробником та залежать від конструктивних особливостей лицевої частини респіратора, до якої даней фільтр буде приєднуватись, а також враховуються вимоги до мінімізації з обмеження поля зору.

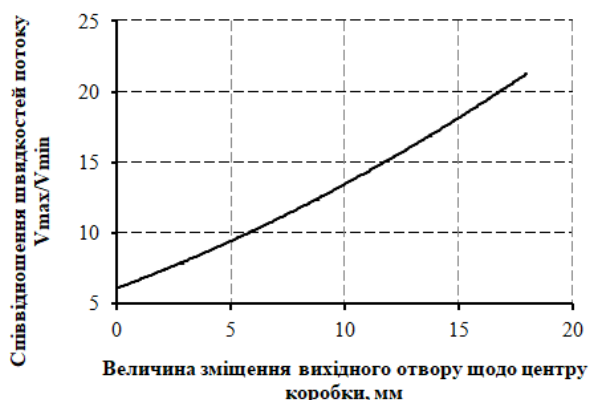


Рисунок 4.9 – Крива залежності розподілу відносної швидкості повітряного потоку від величини зміщення вихідного отвору діаметром 30 мм від центру фільтрувальної коробки при витраті повітря 30 дм³/хв.

На рисунку 4.9 представлено залежність зміщення діаметру вихідного отвору від центру коробки фільтра, що виникає через перерозподіл

повітряного потоку в середні корпусу фільтра та утворення вихрових потоків (рис. 4.10), які негативно впливають на час захисної дії фільтрів, зменшуючи її тривалість до 30 %.

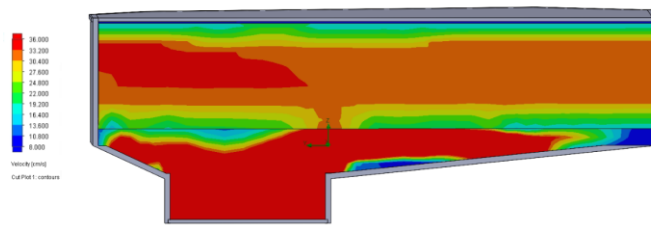


Рисунок 4.10 – Вигляд розподілу швидкості фільтрування за об’ємом моделі протигазового фільтра трапецивидної форми за витрати повітря 47,5 дм³/хв.

Наявність проміжку між адсорбентом і нижньою стінкою фільтра за незначної витрати повітряного потоку (до 15 дм³/хв.) через фільтр сприяє рівномірному розподілу руху повітряних потоків між шарами активованого вугілля у фільтрувальній коробці трапецевидної форми. Водночас у протигазовому фільтрі циліндричної форми при витраті повітря 15 дм³/хв. можна спостерігати області зниженої швидкості повітряного потоку, які, ймовірно, залишаються частково не задіяними у фільтрації шкідливих речовин (рис. 4.11).

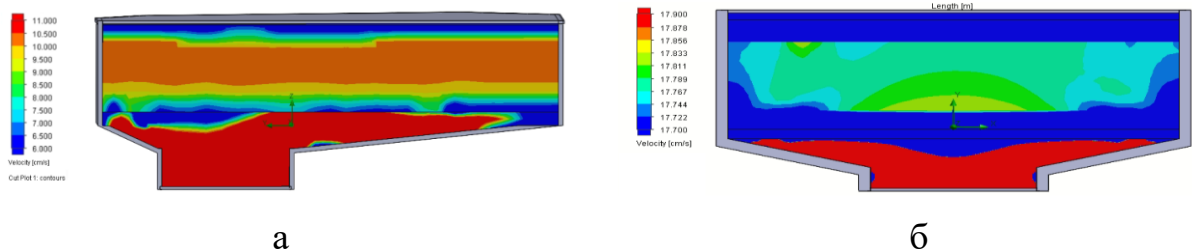


Рисунок 4.11 – Вигляд розподілу швидкості фільтрування за об’ємом трапецевидної моделі (а) і циліндричної моделі (б) протигазового фільтра за витрати 15 дм³/хв.

Збільшення висоти фільтрувальної коробки за однакоого об’єму адсорбенту призводить до уповільнення швидкості руху повітряного потоку через фільтр. У протигазовому фільтрі циліндричної форми рух повітря

рівномірно симетрично розподіляється щодо центральної осі, при цьому швидкість потоку знижується ближче до стінок коробки (рис. 4.12). У протигазовому фільтрі плоскої форми спостерігається нерівномірність у швидкості проходження повітря вздовж усієї коробки, з особливим зменшенням швидкості на відрізку довжиною 40 мм із загальних 100 мм. Як наслідок, можна припустити, що активоване вугілля на цьому сегменті буде недостатньо залученим до процесу фільтрування, що може призвести до скорішої появи проскоку шкідливих речовин через фільтр.

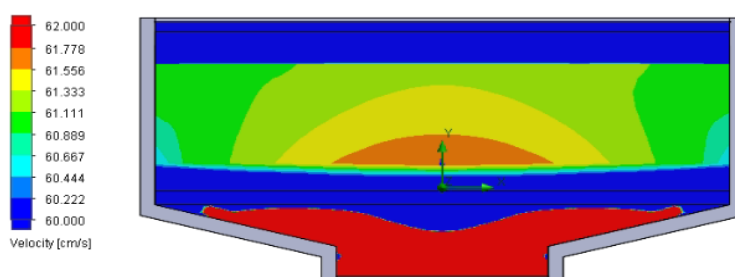


Рисунок 4.12 – Дані моделювання швидкості руху повітря через фільтр циліндричної форми за витрати 47,5 дм³/хв.

Отже, шляхом моделювання можна спрогнозувати час захисної дії протигазових фільтрів різної форми з використанням формули (4.1). Задамо основні характеристики активованого вугілля та параметри фільтрувальних коробок, що будуть впливати на кінцевий результат: протигазові фільтри для захисту від органічних парів (тип А), тест-речовина циклогексан-повітряна суміш, концентрація тест-речовини в повітрі 250 мг/м³, граничнодопустима концентрація 1,4 мг/м³, щільністю упакування гранул активованого вугілля – 0,74 г/см³, k_v – коефіцієнт швидкості адсорбції 3400 хв.⁻¹. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.8.

Витрату повітря Q рахуємо як змінну величину, що визначається за формулою:

$$Q = S \cdot V,$$

де S – площа фільтрувальної коробки, см^2 , V – швидкість руху повітря через коробку, см/с .

Вихідними даними для розрахунку є характеристики фільтрувальних коробок циліндричної форми з табл. 4.4 та характеристики фільтрувальних коробок трапецевидної форми з табл. 4.5. Вихідні дані щодо швидкості згідно таблиці 4.7.

Таблиця 4.8 – Величина розрахованого часу захисної дії фільтрувальних протигазових коробок за площею

Площа фільтрувальної поверхні	Теоретична величина часу захисної дії фільтрів, хв.	
	Трапецевидної форми	Циліндричної форми
110 см^2	272	200
80 см^2	182	173
50 см^2	199	189

В таблиці 4.9 наведено результати розрахунків фільтрувальних коробок різних форм від конструктивних параметрів.

За результатами досліджень можна робити наступні проміжні висновки:

- зі збільшенням діаметра вихідного отвору коробки збільшується час захисної дії фільтра, оскільки зменшується швидкість проходження повітря через шари активованого вугілля. Це сприяє рівномірності потоку та залученню більшого обсягу активованого вугілля до процесу фільтрації.

- зміщення вихідного отвору від центру коробки призводить до збільшення обсягу активованого вугілля, що не бере участі у фільтрації або залучається до фільтрування не в повному обсязі. Таке зміщення також може викликати нерівномірність фільтрації та утворення турбулентних потоків, що зменшує час захисної дії фільтра.

- збільшення проміжку між адсорбентом і нижньою стінкою фільтра збільшує час захисної дії завдяки більш рівномірному проходженню

повітряного потоку через шари активованого вугілля, а також через залучення більшого обсягу адсорбента до процесу фільтрації.

- зростання висоти коробки фільтра, а разом із цим і товщини шару активованого вугілля, збільшує тривалість захисної дії фільтра, водночас збільшення висоти коробки призводить до підвищення опору диханню виробу.

Таблиця 4.9 – Величина часу захисної дії фільтрувальних протигазовим коробок розрахованого за іншими конструктивними параметрами

Конструктивні параметри	Теоретична величина часу захисної дії фільтра, хв.	
	Трапецевидної форми	Циліндричної форми
Діаметр вихідного отвору		
24 мм	162	168
28 мм	189	196
32 мм	216	224
Зміщення вихідного отвору від центру коробки		
5 мм	199	185
10 мм	193	181
15 мм	189	178
Зазор між адсорбентом і нижньої стінкою фільтра		
4 мм	145	151
5 мм	182	189
6 мм	218	226
Висота фільтрувальної коробки		
24 мм	182	141
28 мм	212	165
32 мм	242	189

Аналіз проведених розрахунків показує, що збільшення площі фільтрувальної поверхні та вихідного отвору, за інших однакових умов, сприяє продовженню часу захисної дії фільтра до 30 % для виробів в діапазоні фільтрувальної поверхні від 50 см² до 110 см². Незначне зміщення діаметра вихідного отвору від центру фільтрувальної коробки практично не впливає на час захисної дії, оскільки знаходиться в межах похибки до 5 %. Наявність проміжку між адсорбентом і нижньою стінкою фільтрувальної

коробки також сприяє збільшенню часу захисної дії. Проте, на відміну від інших конструктивних параметрів, цей показник залишається незмінним після досягнення певної величини, що пояснюється стабілізацією швидкості фільтрування завдяки вирівнюванню опору повітряному потоку у підмасковому просторі респіратору, до якого встановлюються дані фільтри.

У відкритому доступі є публікації в яких автори розглядають вплив різних конструктивних та технологічних параметрів на час захисної дії фільтрів зокрема параметри активованого вугілля (діаметра гранул, щільності пакування) [18], товщини фільтрувального шару адсорбенту [19], кліматичних умов експлуатації фільтрів [20, 21]. Встановлено, що у більшості випадків взаємозв'язок між часом захисної дії та об'ємною витратою повітряного потоку, що проходить через фільтр, лінійний. В деяких дослідженнях зазначається, що можуть бути відхилення від загальноприйнятих залежностей. Наприклад, при пульсуючому потоці [22] або впливі конструктивних параметрів фільтрувальної коробки [23], коли спостерігається нерівномірний розподіл повітряного потоку в об'ємі корпусу фільтра. Проведені дослідження підтверджують, що конструктивні особливості можуть суттєво впливати на процес фільтрації. Це пояснюється нерівномірним розподілом швидкості повітряного потоку по площі фільтра через зміщення вихідного отвору відносно центру фільтрувальної коробки або через наявність невеликого зазору між фільтром та нижньою стінкою коробки [24, 25]. У теоретичних розрахунках передбачається рівномірність процесу фільтрації по всій площі фільтра, проте дослідження демонструють можливість коливань показників у межах 20–30 %. Це пов'язано зі швидким насиченням гранул адсорбованим газом у зоні найвищої швидкості фільтрації, що веде до фази проникання шкідливої речовини, тоді як решта фільтра залишається недопрацьованою [26].

Такий стан фільтра в процесі насичення пояснюється тим, що для досягнення шарів активного вугілля периферійним струмкам повітря в конструкції коробки зі зміщенням щодо центру вихідним отвором необхідно

подолати більшу відстань, ніж струмкам повітря, що проходять через центральну частину коробки [27, 28]. Крім того, зіштовхуючись з нижньою стінкою коробки їм необхідно буде додатково повернути, що також зменшує швидкість та енергію руху [29]. Чим далі повітряний струмінь від вихідного отвору, то більше опір йому потрібно подолати. Зауважимо, що зазвичай для визначення часу захисної дії активного вугілля в лабораторних умовах використовується стандартна динамічна трубка [30]. В ній випробуване вугілля не є настільки ущільненим, як це зазвичай буває в протигазовій коробці, тому величина пор не буде відповідати умовам реального застосування фільтра. Крім того, фронт руху адсорбції важко визначити, оскільки діаметр стандартної динамічної трубки становить лише 20 мм, тоді як діаметр реального фільтра, наприклад циліндричної форми 1 класу захисту, не менше 75 мм, чим значно відрізняються між собою.

Саме фронт адсорбції визначає реальний час захисної дії, чим він буде більш пологим, тим рівномірніше відпрацьовуватимуть шари активованого вугілля в корпусі фільтра та пізніше наступить час проникання шкідливої речовини [31]. Усі вище зазначені параметри впливають на збільшення терміну використання протигазового фільтру та зменшення ризику появи нефільтрованої шкідливої речовини в зоні дихання користувача.

Фронт адсорбції завжди розглядається як рівномірне покрокове залучення до фільтрування та затримання шкідливих речовин елементарними шарами активованого вугілля [32], проте лінійна площа фільтрувальної поверхні, через яку буде проходити постійний потік повітря може змінювати швидкість фільтрування по всій поверхні коробки. Отже, питання руху фронту адсорбції в активованому вугіллі в лінійній площині залишається досі відкритим [33].

Варто також звернути увагу на даний момент є широкий вибір фільтрувальних протигазових коробок різних форм, які кожен виробник створює за власними конструктивним баченням та рішеннями, тому вони потенційно можуть відрізнятись між собою.

4.3 Пошук закономірностей для раціональної побудови конструкції протигазової частини фільтра

Аналіз останніх досліджень підтверджує актуальність даного напрямку досліджень та підкреслює важливість подальшого вивчення. Незважаючи на значну кількість виявлених залежностей між геометричними параметрами фільтрувальних коробок, в які монтуються фільтри, залишається необхідність у визначенні універсальних закономірностей, які б дозволили оперативно ухвалювати рішення щодо конструктивних особливостей фільтрів. Це є важливим в контексті частоті змін умов експлуатації фільтрів, характеристик адсорбентів та їх впливу на безпеку користувачів респіраторів (зокрема, вплив на поле зору та ергономіку). Відтак, дослідження закономірностей формування геометричних розмірів фільтрувальних коробок для протигазових фільтрів залишається актуальним завданням.

Пропонуємо в дослідженні для визначення геометричних розмірів фільтрувальних коробок використовувати три коефіцієнти:

- комфортності, який дозволяє визначити вплив геометричних розмірів коробки на перепад тиску на фільтрі

$$K_{комф} = \frac{\Delta P \cdot S_{\phi} \cdot K_{масш}}{\mu Q_{\phi}},$$

де ΔP – перепад тиску на фільтрі, Па; S_{ϕ} – площа фільтра, через яку проходить повітряний потік, м²; Q_{ϕ} – витрата повітря через фільтр, м³/с; μ – динамічна в'язкість повітря ($18 \cdot 10^{-6}$), Н·с/м³; $K_{масш}$ – коефіцієнт масштабування (10^{-6}).

- ефективності, який дозволяє визначити вплив геометричних розмірів коробки на час захисної дії фільтра

$$K_{еф} = \frac{K_{зах}}{K_{норм}} = \frac{T_{факт}}{T_{норм}},$$

де $T_{факт}$ – реально визначений час захисної дії протигазового фільтра, хв.;
 $T_{норм}$ – нормативно визначений час захисної дії протигазового фільтра, хв.;

- продуктивності, який дозволяє визначити вплив геометричних розмірів коробки на фактичний об'єм активованого вугілля, що приймає участь в фільтрації (тобто кількість об'єму адсорбента, яка залучена в процесі фільтрування до моменту початку фіксування проникання шкідливої речовини за фільтром)

$$K_{prod} = \frac{V_{дієв}}{V_{заг}}$$

де $V_{заг}$ – загальний об'єм фільтра, см^3 , $V_{дієв}$ – об'єм фільтра, що приймає участь в процесі фільтрації, см^3 .

На основі визначених залежностей зміни відповідних коефіцієнтів залежно від витрати повітря, що проходить через фільтрувальну коробку з фільтром, може бути встановлено діапазон, у якому усі три показники залишаються в прийнятних межах. Під такими значеннями слід розуміти такі, за яких геометричні параметри коробок мінімізують вплив на перепад тиску на фільтрі, оптимізують час захисної дії та забезпечують повноцінне використання всього об'єму адсорбенту у фільтрі.

Для визначення відповідних коефіцієнтів проводилось комп'ютерне моделювання руху повітряних потоків через протигазові фільтрувальні коробки за допомогою програмного забезпечення SolidWorks. Базові параметри конструкцій моделей протигазових фільтрів, які були оцифровані, та за якими було побудовані 3D моделі зі збереженням всіх розмірів показані на рисунках 4.5 та 4.6.

На основі вище згаданих моделей було розроблено декілька варіантів оцифрованих моделей протигазових коробок, які відрізнялись між собою геометричними розмірами (діаметром та висотою для коробок циліндричної форми; висотою та параметрами сторін $A \times B \times L$ для коробок плоскої форми). Проте для усіх варіацій коробок загальний об'єм адсорбенту залишався приблизно однаковим $(100 \pm 3) \text{ см}^3$. Дані проєктованих коробок представлені в таблицях 4.10 та 4.11.

Так само при побудові оцифрованих моделей корпусів фільтрувальних коробок враховувалось наступне:

- для коробок циліндричної форми вхідний та вихідний отвори є симетричними відносно осі виробу, а для коробок плоскої форми вихідний отвір є зміщеним відносно загальної осі виробу;
- діаметр вихідного отвору для коробок обох форм задавався однакового розміру 28 мм; зазор між адсорбентом і нижньою частиною фільтрувальної коробки становив 5 мм.

У ході дослідження використовували CFD-пакет (computational fluid dynamics) у програмному середовищі SolidWorks, який дозволяє визначати гідродинамічні характеристики повітряного потоку, що проходить крізь фільтрувальні коробки з різною витратою повітря. У програмному пакеті проводилися розрахунки швидкостей $V_{\theta i}^{(0)}$, $V_{zi}^{(0)}$, $V_{ri}^{(0)}$ у вузлах скінченно-елементної сітки, нанесеної на цифрову поверхню фільтрувальної коробки (рис. 4.13). Середні значення швидкостей визначалися відповідно до площі поперечного перерізу фільтра та обсягу повітря, що проходить через фільтрувальну коробку. Кількість ітерацій задавалась в діапазоні від 167 до 285 та залежала від величини варіювального кроку, який встановлювався відповідно до допустимої похибки розрахунку (не більше 5 % від заданого значення перепаду тиску).

Таблиця 4.10 – Характеристики корпусів фільтрів циліндричної форми

Позначення зразка	Діаметр коробки D_k , мм	Висота коробки H_k , мм	Об'єм корпусу для адсорбенту, см^3
ЗЦ 1	75	23	101,6
ЗЦ 2	70	26,5	101,9
ЗЦ 3	65	30,5	101,2
ЗЦ 4	80	20,5	103,0
ЗЦ 5	85	18	102,1
ЗЦ 6	90	16	101,7

Таблиця 4.11 – Характеристики корпусів фільтрів плоскої форми

Позначення зразка	Параметри коробки, мм (сторона $A \times B \times L^*$)	Висота коробки H_k , мм	Об'єм корпусу для адсорбенту, см^3
ЗП 1	40x66x90	21	100,2
ЗП 2	47x77x90	18	100,4
ЗП 3	47x77x101	16	100,2
ЗП 4	40x64x85	23	101,7
ЗП 5	34x64x83	25	101,7

Примітка: А – мала сторона основи фільтра; В – велика сторона основи фільтра; L – довжина коробки фільтра.

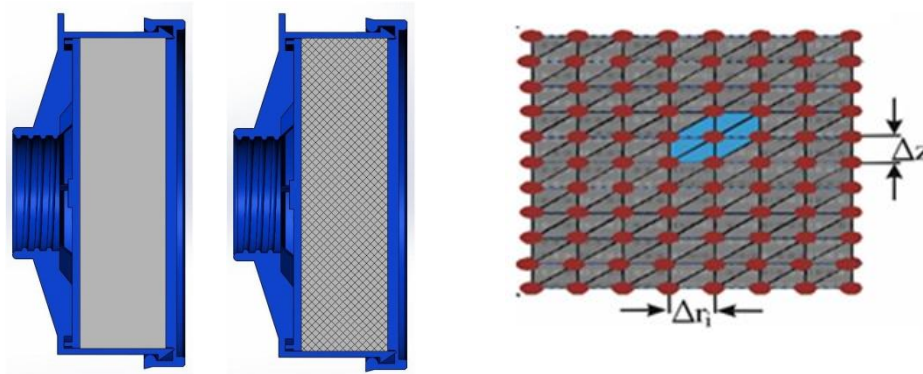


Рисунок 4.13 – Вигляд оцифрованої моделі фільтра циліндричної форми зі скінченно-елементною сіткою

Процес моделювання руху повітряного потоку через фільтрувальні коробки складався з декількох основних стадій. Спочатку проводився збір вихідних даних, зокрема геометричних параметрів фільтрувальної коробки та характеристик середовища фільтрації, таких як щільність упаковки адсорбенту (0,74), перепад тиску (90 Па для фільтрів циліндричної форми та 38 Па для фільтрів плоскої форми), а також пористість середовища (0,26).

Наступним кроком було створення тривимірної моделі у програмному середовищі SolidWorks, на яку наносилася скінченно-елементна сітка для подальших розрахунків швидкості фільтрації. Після цього проводилась перевірка початкових даних на відповідність нанесеній сітці для коригування кроку варіювання.

Далі здійснювалося моделювання руху потоку повітря через фільтрувальну коробку, що дозволило отримати розподіл швидкостей фільтрації залежно від форми фільтра та геометричних параметрів коробки. Під час цього етапу були сформовані кольорові епюри, що відображали розподіл швидкостей потоку усередині корпусу тестованого фільтру (рис. 4.14).

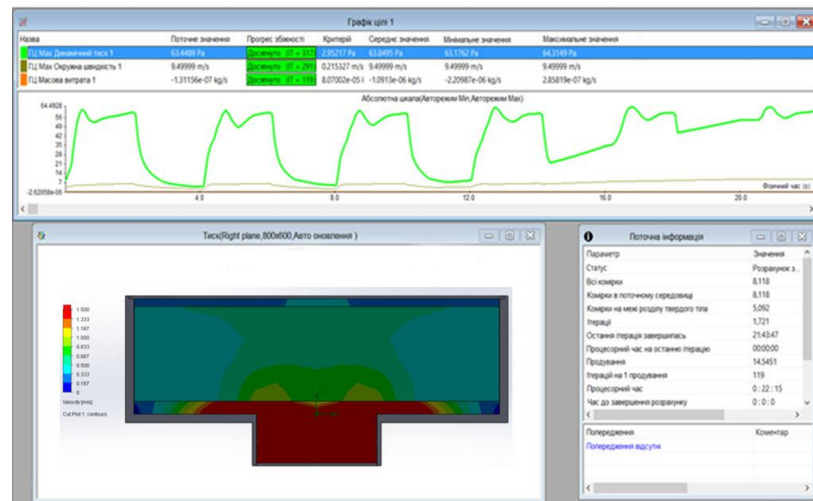


Рисунок 4.14 – Програмна модель для дослідження роботи руху повітряного потоку через фільтрувальну коробку

Останній етап – верифікація отриманих результатів, що передбачала оцінку точності отриманих даних з моделювання. Для цього визначалося процентне співвідношення площ з різними кольоровими відтінками, які відповідали швидкостям фільтрації. Визначення цих площ здійснювалося у програмі Компас 3D за допомогою програмного елемента «замкнені сплайни». Контури кольорових ділянок обводилися суцільними лініями з контрольними точками, що формували замкнені лінії. За допомогою функції «визначення площі» проводився розрахунок з точністю до 0,1 мм². Далі всі окреслені площі підсумовувалися і загальне отримане значення не перевищувало 100 %. Середня точність отриманих даних з верифікації становила 0,7 %, в найгіршому випадку 1,2 %. Такий підхід дозволив детально проаналізувати процес фільтрації та оптимізувати параметри фільтрувальних коробок.

За результатами даних з розподілу швидкості фільтрування за площею фільтра були встановлені залежності коефіцієнту комфортності від величини витрати повітря (рис. 4.15).

На основі даних з визначення часу захисної дії фільтра, тобто моменту досягнення критичної швидкості, за якої адсорбція стає неможливою, було встановлено залежність коефіцієнта ефективності від геометричних параметрів коробок (рис. 4.16). Для перевірки достовірності отриманих закономірностей шляхом моделювання була розрахована крива часу захисної дії фільтра за формулою Вілера-Джонаса відповідно до методики, описаної у роботі [4].

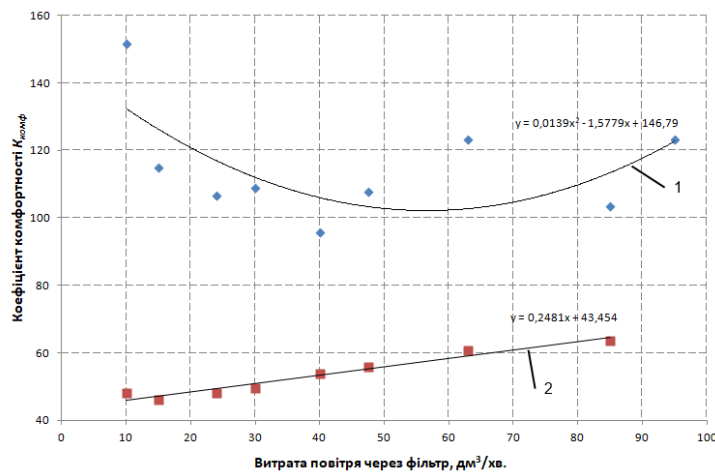


Рисунок 4.15 – Коефіцієнт комфортності від витрати повітря через фільтр: 1 – для фільтрів циліндричної форми, 2 – для фільтрів пласкої форми

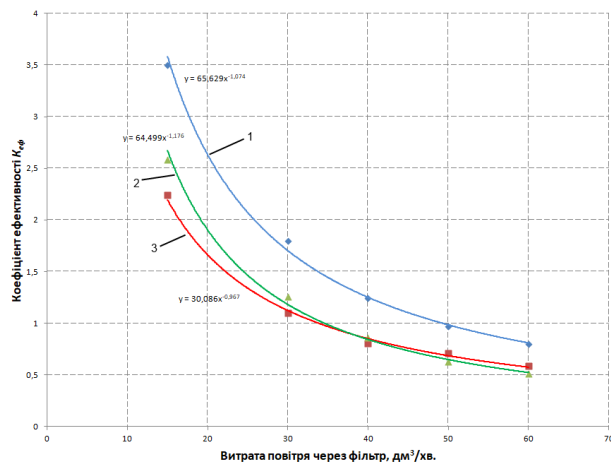


Рисунок 4.16 – Залежність коефіцієнту ефективності фільтра від витрати повітря через фільтр: 1– розрахована за формулою Вілера-Джонаса; 2 – для фільтрів пласкої форми; 3– для фільтрів циліндричної форми

Щоб визначити взаємозв'язок коефіцієнта продуктивності з геометричними розмірами коробок, спершу було проведено аналіз площ забарвлення фільтрів (рис. 4.17).

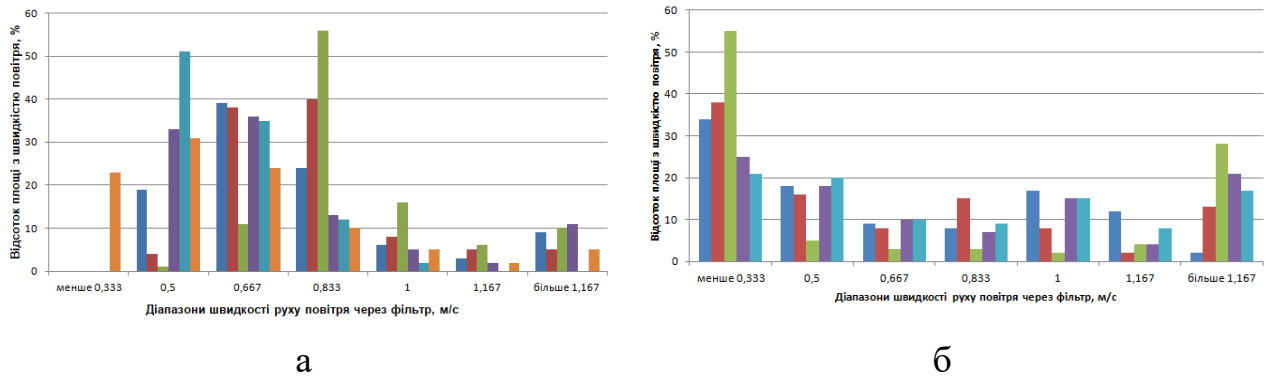


Рисунок 4.17 – Гістограми розподілу швидкостей для фільтрів:

а – циліндричної форми; б – пласкої форми

Наступним етапом, використовуючи дані моделювання, було побудовано графік залежності коефіцієнта продуктивності від витрати повітря (рис. 4.18).

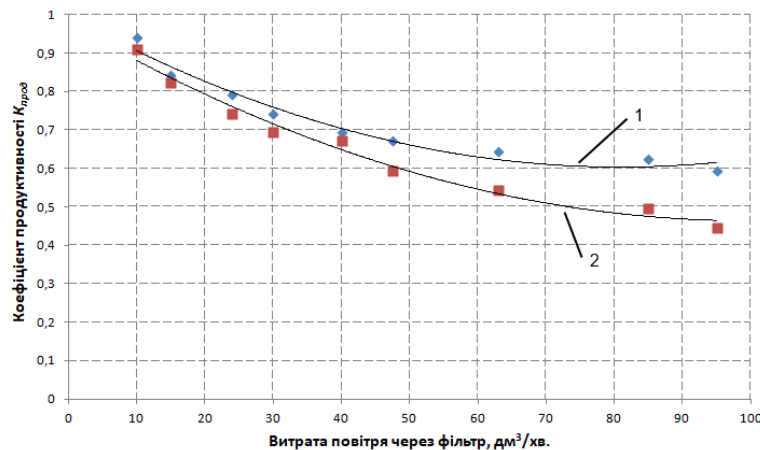


Рисунок 4.18 – Коефіцієнт продуктивності від витрати повітря через фільтр:

1 – фільтри циліндричної форми, 2 – фільтри пласкої форми

З метою визначення оптимальних геометричних параметрів коробок протигазових фільтрів визначимо діапазон прийнятних значень даних коефіцієнтів, виходячи з діапазону перетинів розрахованих кривих (рис. 4.19

і 4.20). Ділянка в межах перехрещення трьох кривих визначає параметри коробок, що будуть відповідати оптимальним значенням розмірів коробок фільтрів.

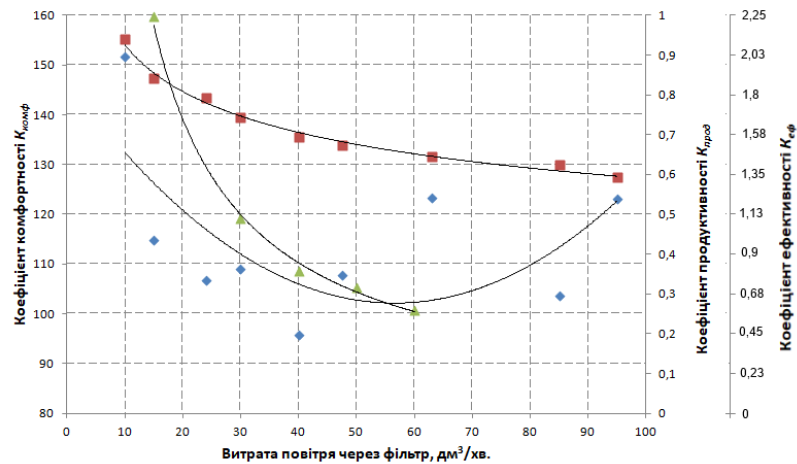


Рисунок 4.19 – Залежності коефіцієнтів ефективності, продуктивності і комфортності від витрати повітря для коробок протигазових фільтрів циліндричної форми

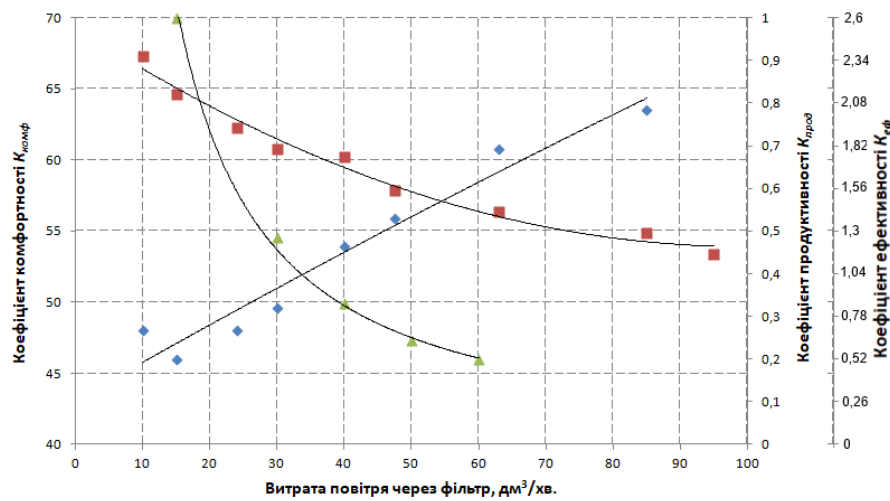


Рисунок 4.20 – Залежність коефіцієнтів ефективності, продуктивності і комфортності від витрати повітря для коробок протигазових фільтрів плоскої форми

На рисунках 4.19 і 4.20 показано, що ефективна область використання протигазових фільтрів циліндричної форми з більшою за аналогічну область для фільтрів плоскої форми. Рекомендується застосовувати фільтри плоскої

форми при витраті повітряного потоку через фільтр від 0 до 50 $\text{дм}^3/\text{хв.}$, тоді як фільтри циліндричної форми мають ширший та зміщений діапазон застосування (від 20 до 90 $\text{дм}^3/\text{хв.}$), але характеризуються більшим перепадом тиску, що впливає на коефіцієнт комфортності.

На основі аналізу перетину кривих коефіцієнтів ефективності, продуктивності й комфортності залежно від витрати повітря були визначені оптимальні параметри фільтрувальних коробок: для циліндричних діаметр і висота, для плоских розміри сторін і висота. Результати моделювання представлені в таблицях 4.12 та 4.13.

Таблиця 4.12 – Результати з визначення параметрів фільтрувальної коробки, виходячи із величин коефіцієнтів комфортності, продуктивності та ефективності за витрати 30 $\text{дм}^3/\text{хв.}$

Позначення зразка	Діаметр корпусу, м	Висота корпусу, м	Значення коефіцієнтів			Належність до раціонального діапазону
			комфортності	продуктивності	ефективності	
ЗЦ 1	0,075	0,023	109	0,74	1,10	так
ЗЦ 2	0,070	0,0265	101	0,78	1,13	ні
ЗЦ 3	0,065	0,0305	97	0,82	1,17	ні
ЗЦ 4	0,080	0,0205	112	0,71	1,06	так
ЗЦ 5	0,085	0,018	115	0,69	1,01	так
ЗЦ 6	0,090	0,016	120	0,66	0,94	ні

Таблиця 4.13 – Результати з визначення параметрів фільтрувальної коробки, виходячи із величин коефіцієнтів комфортності, продуктивності та ефективності за витрати 30 $\text{дм}^3/\text{хв.}$

Позначення зразка	Розмірів корпусу, м	Висота корпусу, м	Значення коефіцієнтів			Належність до раціонального діапазону
			комфортності	продуктивності	ефективності	
ЗП 1	40x66x90	21	48	0,69	1,25	так
ЗП 2	47x77x90	18	50	0,67	1,18	так
ЗП 3	47x77x101	16	41	0,61	1,05	ні
ЗП 4	40x64x85	23	51	0,70	1,23	ні
ЗП 5	34x64x83	25	57	0,70	1,23	ні

Аналіз даних таблиць 4.12 та 4.13 показує, що фільтри циліндричної форми ЗЦ 2 і ЗЦ 3 мають найбільшу частку площі у середньому діапазоні швидкостей та характеризуються більш рівномірним рухом повітря через фільтр. Однак в разі наближення діаметру фільтра до діаметра вихідного отвору коробки, може спричиняти збільшення перепаду тиску. Модель ЗЦ 6 демонструє появу зон неповної фільтрації. Моделі ЗЦ 1, ЗЦ 4 та ЗЦ 5 забезпечують рівномірний потік повітря, що сприяє ефективній фільтрації. Водночас, ЗЦ 4 і ЗЦ 5 виявляють зони зі зниженою швидкістю руху, що може зменшити перепад тиску, роблячи ці три зразки найбільш ефективними.

Серед фільтрів плоскої форми моделі ЗП 4 і ЗП 5 демонструють подібні результати до циліндричних моделей, що може свідчити про ймовірне збільшення перепаду тиску. У моделі ЗП 3 понад 50 % площі фільтрації має зони зі швидкістю повітря менше 0,3 м/с, що свідчить про наявність зон неповної фільтрації. Моделі ЗП 1 і ЗП 2 забезпечують найкращий розподіл швидкостей серед усіх запропонованих.

В результаті проведених моделювань були визначені закономірності між коефіцієнтом комфортності, ефективності і продуктивності протигазових фільтрів, які залежать від перепаду тиску, параметрів та площі протигазового фільтра, часу захисної дії та геометричних параметрів коробок фільтрів. Дані параметри впливають на швидкість та рівномірність процесу фільтрації. Оскільки коефіцієнти мають різний характер залежності від витрати повітряного потоку, для кожної фільтрувальної коробки можна встановити граничну межу. Її перевищення спричиняє нерівномірне використання адсорбенту, що призводить до неефективного застосування фільтра.

Як видно на рисунку 4.14, біля вихідного отвору коробки швидкість фільтрації значно вища, ніж на інших її ділянках. Це спричиняє нерівномірне використання адсорбенту, першочергово у зонах із високою швидкістю повітряного потоку. Моделювання підтверджує, що конструкція коробки має важливе значення для аеродинамічного розподілу повітря через фільтр [34]. Найкращі результати забезпечує дотримання співвідношення площі

фільтрування до висоти коробки. Якщо площа фільтра, через яку проходить повітряний потік S_f , перевищує оптимальне співвідношення до висоти через збільшення габаритних розмірів коробки, то утворюються зони з низькою швидкістю фільтрації [35].

На відміну від традиційних методів визначення оптимальних геометричних розмірів фільтрувальних коробок, запропонований підхід враховує різні характеристики фільтрів, такі як щільність упакування, сорбційна ємність, площа фільтрування, висота фільтра та швидкість фільтрування. Це досягається завдяки використанню коефіцієнтів комфорту, ефективності та продуктивності, які дозволяють визначити діапазон параметрів, у якому конструктивні особливості коробок мінімально впливають на розподіл швидкостей фільтрування. Відповідні оптимальні параметри наведені в таблицях 4.12 і 4.13. Вони вважаються такими, якщо витрата повітря через фільтр має мінімальний вплив на комфорт використання респіратору, забезпечуючи допустиму ефективність уловлювання шкідливих аерозолів при незначному зниженні продуктивності.

Такий підхід дозволяє систематизувати дані та визначити оптимальні габаритні розміри фільтрувальних коробок, враховуючи характеристики використовуваного адсорбенту, зокрема його поглинальну здатність, щільність гранул, масу та об'єм. Використовуючи коефіцієнти, можна прогнозувати параметри нових моделей, які відрізнятимуться від вже існуючих зразків. Раніше такий метод не застосовувався широко, а нові моделі розроблялися переважно експериментальним шляхом та на основі досвіду конструкторів, використовуючи експертний підхід [36, 37].

Проте треба зауважити, що дане дослідження охоплює протигазові фільтри малого об'єму (1 клас захисту), тому отримані результати можуть відрізнятися для фільтрів вищих класів захисту (2 або 3), що характеризуються більшим об'ємом адсорбенту до 500 см^3 . У всіх розглянутих моделях об'єм адсорбенту складав 100 см^3 , і його зміна шляхом коригування геометричних параметрів коробок може впливати на

встановлені в роботі залежності.

При проведенні досліджень не враховувалися фактори навколишнього середовища, зокрема температура та відносна вологість повітря. Крім того, в процесі цифрового моделювання фільтрувальних коробок їхні реальні геометричні особливості не враховувалися, а самі моделі мали правильні геометричні форми (наприклад, циліндр чи трапецію), хоча на практиці вони можуть мати заокруглення та скоси. У майбутніх дослідженнях передбачається більш детальний підхід до моделювання, що включатиме точніше відображення реальних конструктивних елементів.

Дане дослідження відкриває нові перспективи для аналізу впливу форми та геометричних параметрів фільтрів на захисні та ергономічні характеристики респіраторів [38]. Однак можуть виникати експериментальні складнощі, пов'язані з моделюванням всіх елементів реального протигазового фільтра, що може призводити до певних похибок на етапі створення моделей.

Формування різних комбінацій навколишніх умов для тестування запропонованих моделей (наприклад, концентрація речовини, швидкість потоку повітря, температура та вологість) може бути обмежене через технічні труднощі.

З математичної точки зору побудова моделі руху повітряного потоку через пористе середовище не викликає проблем, оскільки його можна привести до елементарної одиниці площі з однаковими параметрами. Проте врахування впливу конструктивних особливостей залишається складним завданням.

4.4 Дослідження та удосконалення підходу до оповіщення користувачів про закінчення строку служби скомбінованих фільтрів

Виконання удосконалення оповіщення користувачів респіраторів зі скомбінованими фільтрами проведено в декілька етапів.

На початковому етапі було проведено аналіз нормативних документів та визначено, що головною вимогою для встановлення часу захисної дії протигазових фільтрів є TP ЗІЗ [39]. У цьому документі зазначено, що ЗІЗ мають бути створені та обладнані таким чином, щоб забезпечувати безпечне дихання користувача протягом усього періоду використання відповідно до призначення та ефективність очищення повинна гарантувати захист від попадання забрудненого повітря у кількості, яка не загрожує здоров'ю або гігієні користувача. Однак специфічні вимоги до систем визначення закінчення терміну служби виробів взагалі відсутні.

В стандарті ДСТУ EN 14387 [40] також не передбачено обов'язкового впровадження будь-яких систем чи елементів контролювання часу захисної дії для фільтрів. Натомість, зазначається, що мінімальний час захисної дії встановлюється виключно на основі лабораторних випробувань, проведених за стандартних умов, і цей показник не може вважатися орієнтиром для умов реальної експлуатації. Фактичний час використання може суттєво відрізнятися залежно від умов застосування.

Водночас, у стандарті [41], який діє у США, вже закріплені вимоги до впровадження систем визначення закінчення терміну служби. Згідно з пунктом 1910.134(b), індикатор закінчення терміну служби (ESLI) є механізмом, що попереджає користувача про наближення до завершення належного захисту органів дихання, наприклад, через насичення або втрату ефективності адсорбенту.

Згідно вимог захист від газів і парів забезпечується респіратором, обладнаним індикатором ESLI, сертифікованим NIOSH для відповідного типу забруднень. У разі, якщо індикатор ESLI, сумісний з умовами на

робочому місці, відсутній, то роботодавець зобов'язаний впровадити графік заміни фільтрів, спираючись на достовірні дані та об'єктивну інформацію, які гарантують своєчасну заміну фільтрів до завершення їх часу експлуатації. Додатково в програмі респіраторного захисту повинні бути детально описані дані, на яких базується графік заміни, обґрунтування цих даних та підстави для довіри до них.

Державний Стандарт ДСТУ EN 529 [42] наголошує на складності встановлення універсального правила для визначення безпечного часу використання протигазових фільтрів. Користувачам необхідно надавати якомога більше інформації про тип та наявність шкідливих речовин в повітрі робочої зони, ймовірну концентрацію цих речовин, рівень відносної вологості та температуру повітря, інтенсивність виконуваних робіт. Згідно даної інформації працівники, керуючись рекомендаціями виробника, контролюють час та тривалість використання фільтрів.

На другому етапі було визначено основні наявні методи, що застосовуються для встановлення часу заміни протигазових фільтрів.

Першим відомим методом є заміна протигазових фільтрів ЗІЗОД за умов збільшення їх ваги. Згідно теорії вважається, що маса активної речовини, а саме активованого вугілля, залишається незмінною, оскільки об'єм корпусу фільтра є постійним та активоване вугілля не висипається в процесі використання фільтрів. Таким чином, збільшення ваги фільтра може відбуватися лише в результаті накопичення шкідливих речовин в адсорбенті. Для цього фільтр періодично зважується, і у разі збільшення його ваги, ухвалюється рішення щодо можливості подальшого використання фільтра.

Наступним методом є заміна протигазового фільтра, коли в підмасковому просторі респіратора з'являється запах шкідливої речовини. Це відбувається через те, що під час фільтрації активоване вугілля у фільтрі накопичує шкідливі речовини та втрачає здатність їх поглинати. В результаті збільшується кількість неочищеного повітря, яке надходить до органів дихання користувача. З часом це може викликати відчуття запаху, присмаку

або подразнення органів дихання (таких як першіння в горлі чи набряклість). В такому випадку користувач повинен залишити небезпечну зону та замінити фільтр на новий вже в умовах чистого повітря.

Ще одним методом є планова заміна протигазових фільтрів, але вона є можливою за умови, що на робочих місцях постійно контролюється склад повітря (наприклад, щозміни), концентрація шкідливих речовин коливається незначно, шкідливі речовини точно визначені і нові не виникають. У такій ситуації особа, відповідальна за охорону праці, може розрахувати термін служби фільтра та скласти графік його заміни.

Лабораторні випробування протигазових фільтрів є ефективним методом оцінювання якості фільтрів та встановлення часу захисної дії. Такі тестування дозволяють визначити як загальний, так і залишковий час роботи фільтра, що дає змогу встановити його реальний захисний ресурс у конкретних умовах.

Розрахунок часу захисної дії протигазових фільтрів можна виконати за допомогою спеціальних комп'ютерних програм чи додатків, що розробляються виробниками. Таке програмне забезпечення враховує велику кількість параметрів зокрема концентрацію шкідливих речовин у вдихуваному повітрі, бажаний рівень допустимої концентрації після фільтра, температура, тиск та відносна вологість повітря, а також інтенсивність роботи. На основі цих даних програма рекомендує відповідні моделі респіратора та фільтра до нього із продукції виробника, а також прогнозований час захисної дії таких ЗІЗОД.

Заміна протигазових фільтрів з індикатором ESLI проводиться переважно у разі спрацювання індикатора. Використання таких індикаторів стає все більш поширеним у світі. Особливо активно вони застосовуються в конструкціях протигазових фільтрів та супутніх виробках, які виробляють компанії зі Сполучених Штатів. Це зумовлено, перш за все, вимогами стандарту п. 1910.134(b), який обов'язково регламентує використання подібних систем індикаторів.

Результатом третього етапу є підсумкова таблиця з оцінками, що визначає найбільш зручний метод для розрахунку часу захисної дії протигазових фільтрів. Під час аналізу виключили метод заміни фільтра при появі запаху, оскільки багато шкідливих речовин можуть проявлятися у концентраціях, які не перевищують граничнодопустиму концентрацію (ГДК). Крім того, запах може виникати через недостатнє прилягання лицевої частини респиратора до обличчя користувача, а його присутність у підмасковому просторі означає, що користувач вже вдихає забруднене повітря. Цей метод також не дає змоги оцінити такі гази та пари, що не мають вираженого запаху чи смаку при концентраціях до рівня ГДК.

Дослідження виконувались із залученням технічних спеціалістів підприємств-виробників ЗІЗОД зокрема ТОВ НВП «СТАНДАРТ» (м. Дніпро) та експертів, в тому числі з числа викладачів НТУ «Дніпровська політехніка». Зведені результати інших методів представлені в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Осереднені результати якісної оцінки підходів щодо визначення часу захисної дії протигазових фільтрів

Група дослідників	Критерії оцінки	Підходи щодо визначення часу захисної дії протигазових фільтрів ЗІЗОД, бали				
		Заміна фільтрів при збільшенні його ваги	Лабораторні випробування фільтрів	Заміна фільтрів за визначеним графіком	Розрахунок часу захисної дії комп'ютерними програмами	Заміна протигазових фільтрів при спрацюванні індикатора
Технічні фахівці	Простота	3	1	4	4	5
	Функціональність	2	2	3	3	4
	Результативність	2	4	3	4	4
	Надійність	1	5	3	4	5
	Адаптивність	1	1	3	3	4
Експерти	Простота	4	2	4	5	5
	Функціональність	2	3	3	4	5
	Результативність	2	3	3	4	4
	Надійність	2	3	4	5	5
	Адаптивність	1	2	2	4	4
Осереднений результат		2,0	2,6	3,2	4,0	4,5

На четвертому етапі були систематизовані розглянуті раніше в роботі методи з визначення часу захисної дії протигазових фільтрів, а також розроблені рекомендації щодо їх використання (табл. 4.15). Усі методи для визначення часу захисної дії фільтрів поділяються на дві основні групи: організаційно-наукові та технічні. Технічні методи, своєю чергою, поділяються на пасивні та активні засоби (рис. 4.21).

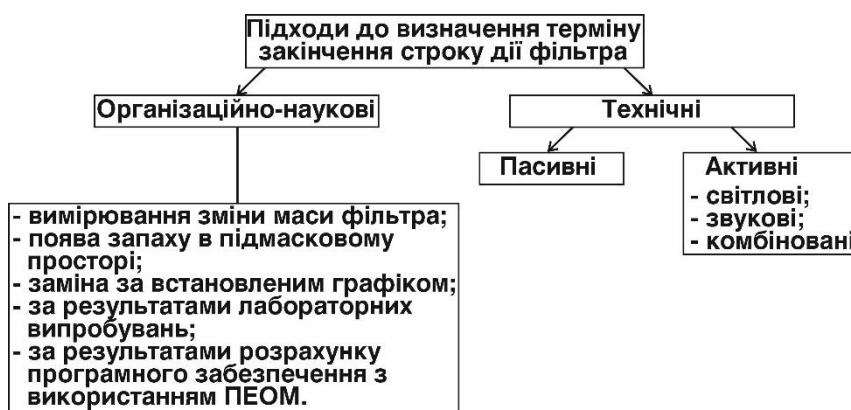


Рисунок 4.21 – Методи визначення часу захисної дії протигазових фільтрів

Таблиця 4.15 – Рекомендації щодо застосування підходів до визначення часу захисної дії протигазових фільтрів

Підходи до визначення часу захисної дії протигазових фільтрів	Рекомендації щодо їх застосування
Заміна фільтрів при збільшенні його ваги	1. Присутність газів, які неможливо визначити іншими методами, специфічні гази (наприклад, СО). 2. Необхідність залучення фахівця.
Лабораторні випробування фільтрів	1. Наявність лабораторії або доступ до неї, що забезпечить швидке проведення випробувань з моменту надання зразків. 2. Є можливість чекати на отримання результатів. 3. Концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони є постійними в часі.
Заміна фільтрів за визначеним графіком	1. Як процедура впровадженої системи менеджменту на підприємстві. 2. Концентрації шкідливих речовин та їх перелік в повітрі робочої зони є постійними в часі. 3. Необхідність залучення фахівця.
Розрахунок часу захисної дії комп'ютерними програмами	1. Концентрації шкідливих речовин та їх перелік в повітрі робочої зони відомі. 2. Доступ до мережі Інтернет або заздалегідь встановлена програма на ПК.
Заміна протигазових фільтрів при спрацюванні індикатора	В будь-яких умовах, де концентрації шкідливих речовин можуть змінюватись протягом часу використання фільтрів.

Визначення часу захисної дії протигазового фільтра є ключовим заходом для запобігання отруєнню користувачів. Існує чимало методів, які можна класифікувати на дві основні групи: організаційно-наукові та технічні. Найбільш ефективними вважаються використання протигазових фільтрів з індикаторами та обчислення часу їх захисної дії за допомогою спеціалізованих програм. Рекомендації були сформовані на основі якісного аналізу критеріїв та аналізу переваг і недоліків кожного з підходів.

Серед переваг методу визначення часу за вагою фільтра можна виділити відсутність необхідності постійного контролю стану фільтра. Цей метод є швидким, не вимагає значних затрат часу на обчислення та не потребує спеціального обладнання. Проте такі умови трапляються рідко, оскільки роботодавці часто прагнуть максимально використати засоби захисту та скоротити фінансові витрати на їх заміну. Окрім того, метод не враховує різницю у часі захисної дії між різними партіями фільтрів, які потенційно можуть бути відмінними. У лабораторії, як правило, аналізують зразки фільтрів, що вже використовувались на виробництві, для оцінки залишкового ресурсу або прийняття рішення про їх заміну.

Лабораторний метод оцінки ефективності є дієвим, оскільки дозволяє перевірити протигазові фільтри в умовах, близьких до реальних. Результати тестів чітко визначають оптимальний час заміни фільтрів. Однак метод потребує точних даних про склад забрудненого повітря, який часто змінюється. Крім того, лабораторне тестування займає багато часу, вимагає дорогого обладнання, що потребує технічного обслуговування і спеціалістів. Вартість таких випробувань є досить високою.

Метод комп'ютерного розрахунку є досить зручним. Програмне забезпечення може функціонувати онлайн, наприклад, на сайтах виробників, таких як 3M [43] або Honeywell [44], або ж бути встановленим на персональний комп'ютер, як програма MultiVarog [45]. Основними перевагами цього підходу є можливість вибору протигазового фільтра відповідного рівня захисту у будь-який час за наявності доступу до

Інтернету. База даних постійно оновлюється, а процес обробки інформації для визначення оптимальних моделей протигазових фільтрів вдосконалюється.

Однак є й недоліки: програма не встановлює терміни заміни фільтрів і розробляється виключно для певних марок, що випускаються конкретними виробниками. Вона не враховує можливість використання альтернативних варіантів фільтрів інших компаній. До того ж, оскільки програми різних виробників можуть суттєво відрізнятися, користувачам інколи складно правильно вводити необхідні дані.

Фахівці вважають, що метод заміни протигазових фільтрів на основі спрацювання пасивного індикатора ESLI є перспективним, хоча й потребує значного вдосконалення. Основні проблеми пов'язані з обмеженим терміном зберігання таких фільтрів, труднощами візуального визначення зміни кольору індикатора при використанні респіраторів у забрудненому середовищі, а також відсутністю універсального індикатора для всіх типів газів, оскільки кожен тип потребує окремого пристрою, що не дозволяє виявляти присутність інших шкідливих речовин. Крім того, людям, які мають труднощі з розпізнаванням кольорів, складно використовувати фільтри такої конструкції.

Водночас активні системи індикації ESLI мають низку переваг: вони здатні сигналізувати про необхідність заміни незалежно від освітленості на робочому місці, позбавляють працівників потреби самостійно контролювати час експлуатації та можуть виявляти наявність кількох шкідливих речовин одночасно.

Отже, найдієвішим способом є застосування протигазових фільтрів з індикаторами терміну служби ESLI, що дозволяє користувачеві залишатися під надійним захистом та контролювати придатність застосовуваних ЗІЗОД. Крім того, перспективним підходом є використання програм-калькуляторів для визначення часу захисної дії, адже це дає можливість прогнозувати період ефективного використання протигазового фільтра [46].

Як елемент з удосконалення оповіщення користувачів про закінчення часу експлуатації протигазових та скомбінованих фільтрів пропонується інтегрувати розчинну хлоридно-натрієву капсулу з ароматичною речовиною в шар активованого вугілля (рис. 4.22). Таким чином забруднене повітря, проходячи через жалюзі, потрапляє в корпус фільтра та проходить через високоефективний протиаерозольний фільтр, де відбувається очищення від твердих аерозольних частинок. Далі повітря надходить до шару активованого вугілля, де шкідливі речовини вступають у реакцію з активними компонентами, нейтралізуються та затримуються в його порах [47].

Коли активоване вугілля повністю вичерпує свій сорбційний ресурс, це спричиняє руйнування структури хлоридно-натрієвої оболонки капсули шляхом її деструкції на нешкідливі для людини хімічні сполуки. Наприклад, можна розглянути механізм уловлювання різних речовин.



При руйнуванні оболонки пасивного індикатора відбувається виділення ароматичних речовин у повітря, що проходить через фільтр. В подальшому їх відчуває користувач і розуміє, що час захисної дії фільтра спливає і є потреба замінити фільтр.

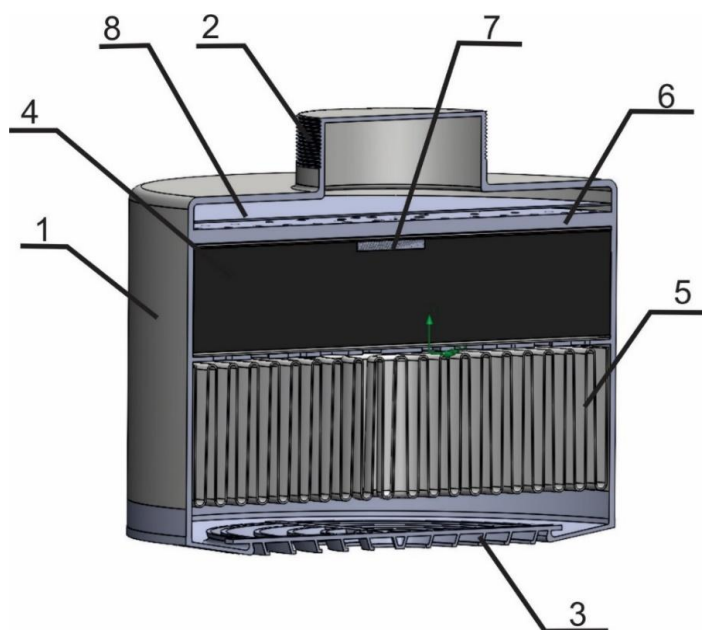


Рисунок 4.22 – Конструкція удосконаленого скомбінованого фільтра з системою індикації строку служби: 1 – корпус скомбінованого фільтра; 2 – випускний отвір з різьбленням; 3 – вхідний отвір з жалюзьями; 4 – фільтрувальний шар активованого вугілля; 5 – високоефективний протиаерозольний фільтр; 6 - полімерна вставка-обмежувач; 7 – хлоридно-натрієва капсула з ароматичною речовиною; 8 – шар фільтрувального матеріалу

В таблиці 4.16 наведені результати порівняльні випробувань з встановлення часу захисної дії скомбінованих фільтрів з хлоридно-натрієвою капсулою. Тестування проводились в випробувальній лабораторії засобів індивідуального захисту ТОВ «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ» (м. Дніпро), тому до експерименту було залучено експерта-випробувача, що визначав наявність появи газів в підмасковому просторі за запахом, а також паралельно було приєднано газоаналізатор ДОЗОР-С-М-4Ф. Окремо було теоретично розраховано час захисної дії фільтрів для даних умов за формулою 4.1.

Таблиця 4.16 – Результати випробувань скомбінованих фільтрів з використанням різних тестових газів

Номер фільтра та наявність капсули	Час появи запаху, визначені випробувачем-експертом, хв.	Час появи проникнення газу через фільтр, визначений газоаналізатором, хв.	Теоретично розрахований час захисної дії фільтрів, хв.
газ аміак NH_3			
1 (присутня)	140	152	181
2 (присутня)	135	141	181
3 (присутня)	140	148	181
4 (відсутня)	-	159	189
5 (відсутня)	-	157	189
6 (відсутня)	-	161	189
газ сірководень H_2S			
1 (присутня)	55	59	84
2 (присутня)	55	62	84
3 (присутня)	55	63	84
4 (відсутня)	-	71	90
5 (відсутня)	-	68	90
6 (відсутня)	-	68	90

Наявність капсули у конструкції скомбінованого фільтра запобігає появі шкідливих речовин у підмасковому просторі користувача, дозволяючи своєчасно замінити фільтри. При цьому капсула зменшує до 5 % об'єму активованого вугілля, задіяного у фільтрації шкідливих газів, тому загальний час захисної дії фільтрів із капсулою трохи коротший, ніж у фільтрів без неї. Графіки залежності часу захисної дії від концентрації випробувальної камери для різних шкідливих речовин, представлені на рисунках 4.23 і 4.24, побудовані теоретично за формулою 3.1 та фактично на основі апроксимації даних [48].

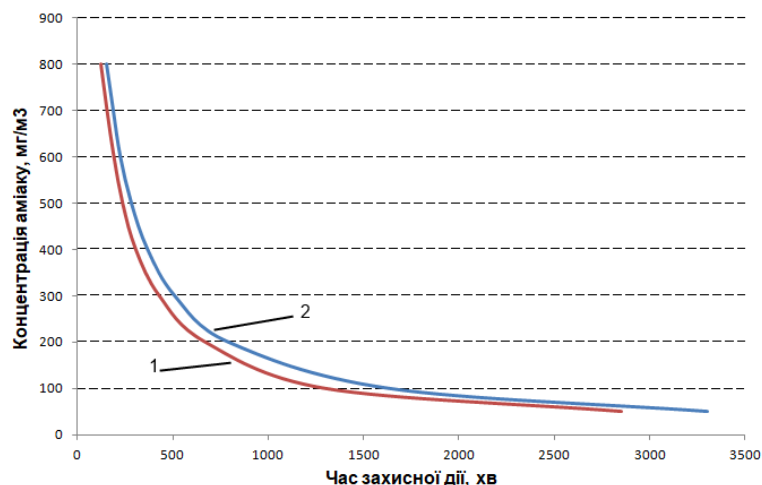


Рисунок 4.23 – Графік залежності часу захисної дії скомбінованого фільтру концентрації шкідливої речовини (аміаку): 1 – час отриманий за газоаналізатором, 2 – теоретично розрахований час

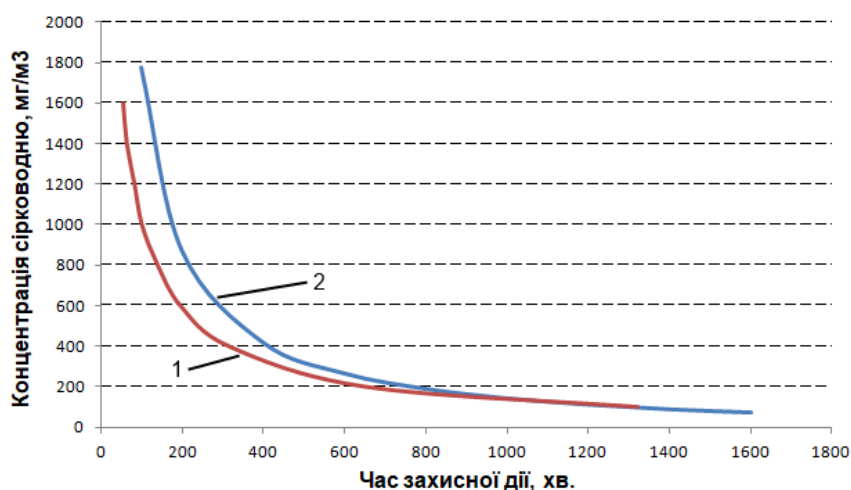


Рисунок 4.24 – Графік залежності часу захисної дії скомбінованого фільтру концентрації шкідливої речовини (сірководень): 1 – час отриманий за газоаналізатором, 2 – теоретично розрахований час

Реальний час захисної дії фільтрів з капсулою виявився до 20 % меншим за розрахунковий, що зумовлено конструктивними особливостями фільтра, які не використовують весь об'єм активованого вугілля для процесу фільтрації. Крім того, відхилення фактичних даних можуть бути спричинені варіаціями технічних характеристик активованого вугілля, яке застосовується у фільтрах, а також, ймовірно, нерівномірним розподілом частинок вугілля в коробці та рухом повітряних потоків крізь нього.

Роботодавці та користувачі фільтрів повинні приділяти особливу увагу визначенню часу захисної дії, оскільки цей параметр є критично важливим для забезпечення ефективного захисту органів дихання та запобігання отруєнню [49]. Для протипилових фільтрів час захисної дії здебільшого залежить від опору диханню, тоді як для скомбінованих фільтрів він обумовлений багатьма факторами. До ключових факторів належать кількість забруднювачів та їх хімічний склад, концентрація, умови використання (об'ємна витрата повітря через фільтр, температура та відносна вологість повітря). Важливими також є характеристики самого фільтра, зокрема його конструкція, об'єм і властивості адсорбенту у формі гранул, який міститься у корпусі фільтрувальної коробки. Очищення повітря відбувається завдяки тому, що молекули шкідливих речовин зіштовхуються з поверхнею сорбенту, «прикріплюючись» до нього через утворення міцного зв'язку за участю спеціальних хімічних добавок [50]. З часом експлуатації сорбент насичується забруднюючими речовинами, що зменшує його здатність ефективно поглинати нові домішки. Це призводить до проникнення небезпечних речовин у глибші шари сорбенту. У результаті концентрація шкідливих речовин в очищеному повітрі, яке проходить через фільтр і потрапляє у підмасковий простір респіратора, поступово зростає і врешті може перевищити ГДК. Тому заміну протигазового фільтра необхідно здійснювати до цього моменту.

Згідно з Правилами вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання, а також рекомендаціями вітчизняних заводів-виробників, основним критерієм для заміни фільтра є поява запаху шкідливої речовини в підмасковому просторі. Втім, дослідження показують, що використання органів чуття для виявлення запаху є ненадійним методом, оскільки низка газів не має запаху навіть при концентраціях, значно вищих за ГДК.

Реакція на запах є індивідуальною і залежить від багатьох факторів, таких як стан здоров'я, рівень концентрації працівника на роботі,

напруженість і монотонність праці, рівень втоми тощо [51]. Згідно з дослідженнями [52], поріг сприйняття запахів у 95 % людей може варіюватися від 1/16 до 16 відносно середнього значення. Наприклад, якщо середньостатистична людина починає відчувати запах хлороформу при концентрації приблизно 1 ГДК, то деякі люди можуть не реагувати навіть за значного перевищення цієї концентрації.

Крім того, сприйняття запахів залежить від приділення уваги роботі, стану здоров'я (зокрема, наявності простудних захворювань, травм чи алергії) та усвідомлення моменту, коли фільтр перестає забезпечувати захист. На ранніх етапах можлива реакція на низькі концентрації, які в 1000 разів нижчі за ГДК, але з часом чутливість слабшає, виникає ефект звикання, і небезпечне перевищення концентрації може залишитися непоміченим [53]. Також тривала робота в умовах забрудненого середовища може спричинити зниження чутливості до впливу речовин, що може призвести до того, що небезпечний рівень концентрації не буде своєчасно виявлено [54].

Ще минулого століття розвинені країни зокрема США визнали ненадійність використання суб'єктивної реакції працівників на запах для визначення часу захисної дії протигазового фільтра. Згодом цей метод повністю заборонили, оскільки наукові дослідження запропонували точніші та безпечніші альтернативи. Натомість розробили методи розрахунку часу захисної дії фільтрів за допомогою комп'ютерних програм, а також впровадили індикатори пасивного та активного типу [55].

Пасивні індикатори працюють за принципом зміни кольору спеціальних поглиначів, що вказує на насичення сорбенту шкідливими газами і дозволяє визначити момент, коли фільтр перестає виконувати свою функцію. Активні індикатори, у свою чергу, в режимі реального часу відстежують концентрацію речовин, а при перевищенні ГДК подають сигнал у формі світлового, звукового або комбінованого оповіщення про необхідність заміни фільтра [56].

Хоча дослідження в області альтернативних способів контролю часу захисної дії фільтрів обмежені, вже існує низка запатентованих інноваційних рішень, що заслуговують на впровадження.

Сучасні законодавчі норми, зокрема у США, зобов'язують роботодавців замінювати фільтри або відповідно до визначеного графіка, або керуючись показниками індикаторів [41]. Графік складається на основі лабораторних випробувань конкретної марки та типу скомбінованих фільтрів, які використовуються на виробництві. Дані випробування враховують певні критичні параметри, такі як хімічний склад повітря, концентрацію забруднювачів, температура та відносна вологість, щоб надати найбільш точне значення щодо часу захисної дії фільтрів.

Виробники повинні оцінювати потенційні ризики, що можуть виникати при експлуатації фільтрів, а також надавати розрахунки та рекомендації для їхнього усунення. Причинами останніх можуть бути дефекти складових частин фільтрів. Такий підхід гарантує всебічний захист працівників і знижує загрозу для їхнього здоров'я, особливо в умовах присутності високо небезпечних речовин, де своєчасна заміна фільтра може бути критичною для безпеки.

Окрім технічних аспектів, важливим чинником ефективного захисту від шкідливих факторів є навчання персоналу [57]. Працівники мають отримати знання про правильне використання ЗІЗОД, зокрема щодо їхнього вибору, експлуатації та заміни фільтрів. Якщо респіратори використовуються неправильно або несвоєчасно, навіть найсучасніші моделі не гарантують належного рівня безпеки.

Крім того, роботодавці повинні не тільки забезпечувати технічну підтримку та визначати час захисної дії фільтрів, а й проводити систематичне навчання працівників та перевірку їхніх знань щодо правил використання засобів захисту, що є ключовим для збереження їхнього здоров'я [58].

4.5 Розробка програмного забезпечення для прогнозування часу захисної дії скомбінованих фільтрів універсальних респіраторів

Для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів за встановлених умов експлуатації було розроблено автономний програмний комплекс (рис. 4.25), що запускається з персонального комп'ютера без додаткової установки.

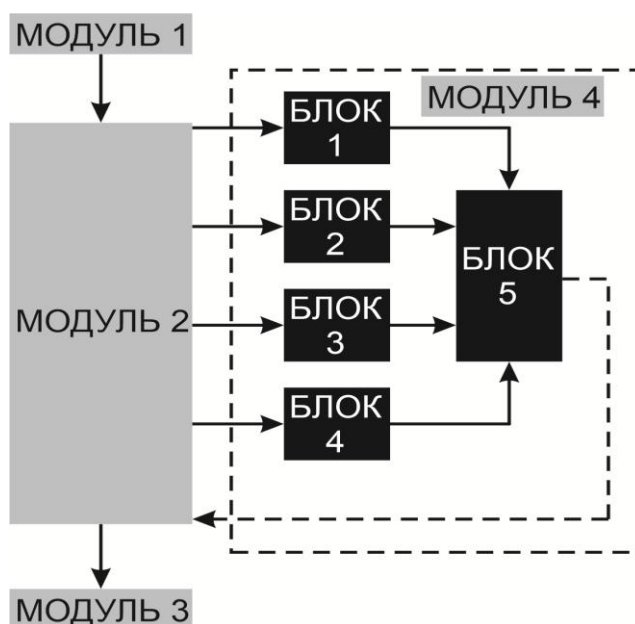


Рисунок 4.25 – Функціональна схема програмного комплексу для розрахунку прогнозного часу захисної дії протигазових фільтрів: модуль 1 – введення початкових даних; модуль 2 – масив даних та специфікацій; модуль 3 – виведення та візуалізації інформації; модуль 4 – обчислення і аналізу даних; блок 1 – формування масиву даних про небезпечні хімічні речовини; блок 2 – характеристики типу робіт; блок 3 – типів фільтрів; блок 4 – перерахунку концентрацій; блок 5 – розрахунку часу захисної дії

Програмний комплекс містить чотири блоки: модуль введення початкових даних, модуль пам'яті, модуль виведення й візуалізації інформації, а також модуль обчислення тривалості захисної дії протигазових

фільтрів. Останній модель містить кілька субелементів зокрема блок інформації про характеристики небезпечних хімічних речовин, блок визначення типів і властивостей фільтрів з врахуванням умов експлуатації фільтрів, блок розрахунку ємності фільтрів та аналізу з порівнянням з ГДК, а також блоку формування масиву факторів, які можуть знижувати ефективність роботи фільтрів. Головною особливістю цього програмного комплексу є розширення функціоналу для аналізу прогнозованого часу захисної дії з урахуванням впливу шкідливих факторів виробничого середовища, що зменшує невизначеність результатів прогнозу.

Програмний комплекс було розроблено за допомогою інтегрованого середовища розробки Visual Studio Code з використанням мови програмування Python 3.9. Алгоритм з розрахунку прогнозного часу захисної дії фільтрів містив наступні етапи:

На першому етапі користувач визначає основні параметри для розрахунку: назву і концентрацію хімічної речовини, режим роботи, що характеризується хвилинним об'ємом легеневої вентиляції, а тому й проходженням повітря через фільтр. Характеристики типу роботи і відповідні витрати повітря через фільтр, $\text{дм}^3/\text{хв.}$, були встановлені на основі досліджень компанії 3М [59].

На другому етапі, через модуль введення початкових даних із запропонованого списку обирають назву хімічної речовини, вводять інформацію про концентрацію шкідливої речовини у повітрі робочої зони та підмасковому просторі, а також задають режим виконання роботи.

На третьому етапі здійснюється вибір відповідного фільтра з переліку, що зберігається в модулі пам'яті, на основі заданої хімічної речовини. Параметри активованого вугілля та протигазових фільтрів, які використовуються для розрахунків, були отримані експериментальним шляхом у випробувальній лабораторії засобів індивідуального захисту ТОВ «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ» (м. Дніпро). Фізичні характеристики

визначалися за допомогою прямого вимірювання та математичних обчислень.

На четвертому етапі, у модулі визначення параметрів фільтрів, виконується розрахунок їх ємності та прогнозується час досягнення критичного значення концентрації хімічної речовини у підмасковому просторі, визначеної раніше на другому етапі. Основою для обчислення часу захисної дії служили загальновідома формула Вілера-Джонаса (4.1) і формула для переведення концентрації з ppm у мг/м³.

$$C_i = \frac{(C_{ppm} * \mu)}{24.055}, \quad (4.2)$$

де C_i – концентрація шкідливої речовини, що розраховується, мг/м³; C_{ppm} – початкова концентрація шкідливої речовини, ppm; μ – молярна маса шкідливої речовини, г/моль; 24,055 – молярний об'єм ідеального газу, л/моль.;

На п'ятому етапі результат розрахунку виводиться в поле програми через модуль візуалізації (рис. 4.26). Для кращого сприйняття розрахованого часу захисної дії дані виводяться в форматі години та хвилини. Код програмного продукту наведено в Додатку Е.

Рисунок 4.26 – Інтерфейс програми з розрахунку прогнозованого часу захисної дії протигазових фільтрів

Реальний час захисної дії протигазових фільтрів визначався на лабораторному стенді для оцінки поглинальної здатності, що відповідає стандарту ДСТУ EN 14387 [40] у випробувальній лабораторії засобів індивідуального захисту ТОВ «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ».

Отримані дані передаються з модуля пам'яті для можливого уточнення та створення каталогу розрахунків для заданих умов, що дозволяє перевірити проведені розрахунки.

На рисунках 4.27–4.29 представлено результати розрахунків прогнозованого часу роботи фільтрів ФРПА-G марок А1, В1 та К1. Фільтри мають однакову конструкцію корпусу з корисним об'ємом 100 см³ та діаметром 80 мм. Додатково враховувалися температура (20 ± 1) °С та вологість повітря (70 ± 5) %, а також різні типи роботи.

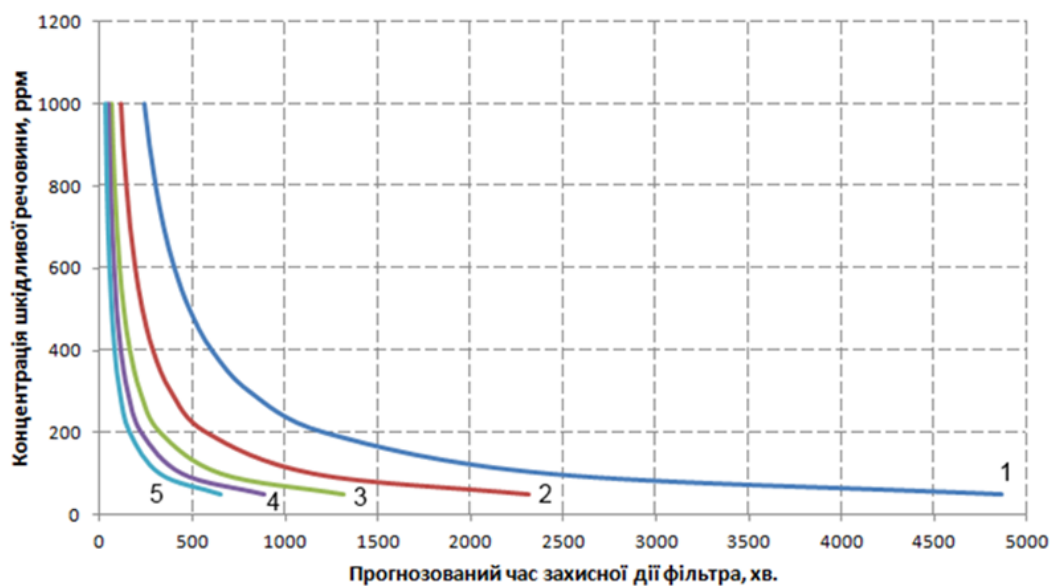


Рисунок 4.27 – Графік залежності прогнозованого часу захисної дії фільтрів ФРПА-G К1 за різної концентрації аміаку в повітрі та типу виконуваних робіт: 1 – легка робота, 2 – роботи середньої важкості, 3 – важка робота. 4 – дуже важка робота, 5 – максимальне навантаження

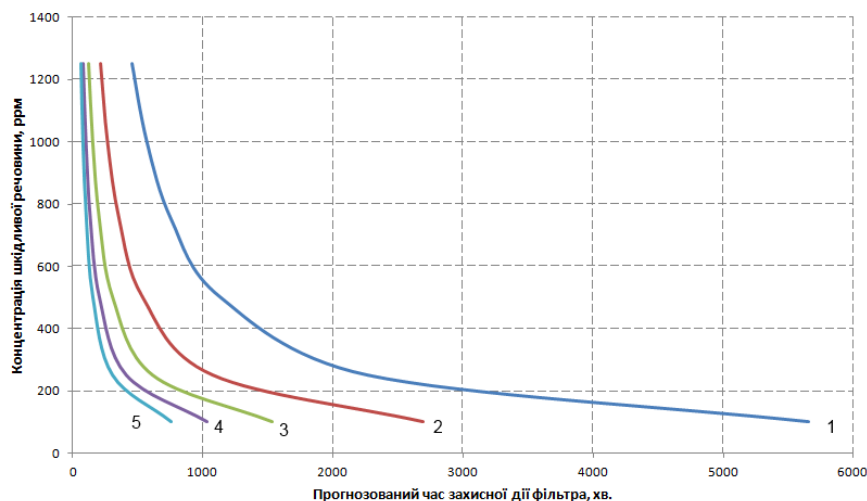


Рисунок 4.28 – Графік залежності прогнозованого часу захисної дії фільтрів ФРПА-G A1 за різної концентрації циклогексану в повітрі та типу виконуваних робіт: 1 – легка робота, 2 – роботи середньої важкості, 3 – важка робота, 4 – дуже важка робота, 5 – максимальне навантаження

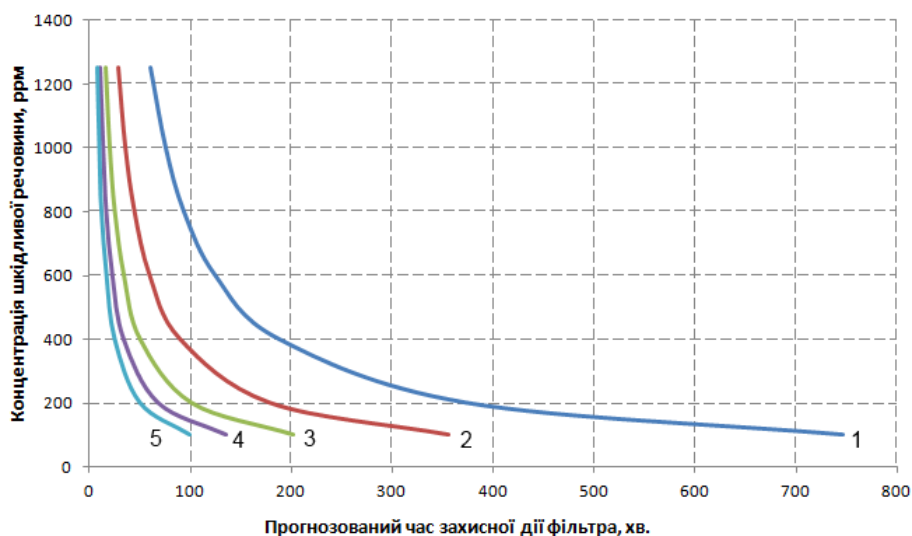


Рисунок 4.29 – Графік залежності прогнозованого часу захисної дії фільтрів ФРПА-G B1 за різної концентрації діоксиду сірки в повітрі та типу виконуваних робіт: 1 – легка робота, 2 – роботи середньої важкості, 3 – важка робота, 4 – дуже важка робота, 5 – максимальне навантаження

Для забезпечення точності та достовірності розрахунків прогнозного часу захисної дії протигазових фільтрів було виконано порівняння отриманих результатів із даними, отриманими за допомогою програмного забезпечення

інших виробників, за аналогічних умов. Результати цих розрахунків представлені в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Результати порівняння розрахункових значень часу захисної дії фільтра (атмосферний тиск 760 мм.рт.ст, температура повітря 20 °C)

Тип та концентрація хімічної речовини, ppm	Тип та марка фільтра	Вологість повітря, %	Тип роботи та витрата повітря, дм³/хв.	Прогнозований час захисної дії фільтрів, хв.	Похибка, %
Розроблений програмний продукт					
Циклогексан, 1000 ppm	ФРПА-G A1	≤ 65 %	Легка (10 дм³/хв.	566	3,2 %
			Середня (21 дм³/хв.)	269	
			Важка (37 дм³/хв.)	153	
			Дуже важка (55 дм³/хв.)	103	
			Максимальна (75 дм³/хв.)	75	
Select and Service Life (фірма 3М)					
Циклогексан, 1000 ppm	A1 модель 6051	≤ 65 %	Легка (-)	352	8 %
			Середня (-)	277	
			Важка (-)	221	
		65 %	Легка (-)	176	
			Середня (-)	138	
			Важка (-)	110	
		75 %	Легка (-)	117	
			Середня (-)	92	
			Важка (-)	73	
Cartridge Life Expectancy Calculator (фірма MSA Safety)					
Циклогексан, 1000 ppm	Півмаска Advantage-фільтр Organic Vapor (GMA)	50 %	Користувача (10 дм³/хв.)	536	8 %
			Користувача (21 дм³/хв.)	251	
			Користувача (37 дм³/хв.)	139	
			Користувача (55 дм³/хв.)	91	
			Користувача (75 дм³/хв.)	65	
		65 %	Користувача (10 дм³/хв.)	438	
			Користувача (21 дм³/хв.)	205	
			Користувача (37 дм³/хв.)	114	
			Користувача (55 дм³/хв.)	75	
			Користувача (75 дм³/хв.)	53	
		75 %	Користувача (10 дм³/хв.)	360	
			Користувача (21 дм³/хв.)	169	
			Користувача (37 л/хв.)	94	
			Користувача (55 дм³/хв.)	61	
			Користувача (75 дм³/хв.)	44	

Відхилення отриманих результатів, яке не перевищує 10 %, можна пояснити нерівномірним розподілом швидкості повітряного потоку через поверхню фільтра, а також характеристиками активованого вугілля, що використовується. Теоретичні розрахунки передбачають рівномірний процес

фільтрації по всій площі, що зумовлює необхідність введення додаткових коефіцієнтів для врахування нерівномірності.

Як видно з даних таблиці 4.17, результати розрахунків, що виконані за допомогою розробленого програмного забезпечення, повністю збігаються з результатами, отриманими за допомогою програми Cartridge Life Expectancy Calculator (MSA Safety) при відносній вологості повітря нижче 65 %. Вони також узгоджуються з даними, розрахованими за допомогою програми Select and Service Life (3M), за умови відповідних витрат повітря через фільтр.

Також слід враховувати конструктивні відмінності фільтрів, зокрема їх форму. Наприклад, фільтри ФРПА-G та Organic Vapor (GMA) мають циліндричну форму, тоді як фільтри 3M моделі 6051 виконані у трапецевидній формі, що впливає на процес оцінки прогнозованого часу їх захисної дії.

Сумарна похибка розрахунків може бути обумовлена метрологічними характеристиками приладів, які використовуються для вимірювання параметрів (температури та вологості повітря, концентрації шкідливих речовин тощо), що входять до рівняння для визначення часу роботи фільтрів [60].

У результаті досліджень був створений програмний комплекс, призначений для розрахунку прогнозного часу захисної дії фільтрів проти газів і респіраторів за заданих умов експлуатації. Комплекс складається з чотирьох модулів: модуль введення початкових даних, модуль пам'яті, модуль виводу та візуалізації інформації, а також модуль обчислення часу захисної дії фільтрів.

Основною перевагою цього комплексу є можливість визначення часу використання фільтрів з урахуванням небезпечних факторів, які попередньо заносяться в модуль пам'яті та враховуються при розрахунках. Крім того, комплекс дозволяє проводити аналіз концентрацій шкідливих речовин, що утворюються після фільтрації, та порівнювати їх із гранично допустимими, що забезпечує додаткову перевірку часу захисної дії.

На початковому етапі аналізу враховуються такі параметри: тип хімічного забруднення, коефіцієнт забруднення повітря, стан аерозолі (твердий чи рідкий), ГДК хімічних речовин, а також небезпечні чинники, такі як температура та вологість повітря, режим роботи. У процесі розрахунків часу захисної дії деякі небезпечні чинники враховуються додатково, наприклад, можливі пошкодження фільтрів або об'єм сорбційної речовини в фільтрі.

При виборі фільтра з каталогу визначається його тип і об'єм сорбційного матеріалу, що дозволяє оцінити його відповідність заданим умовам. Якщо прогнозований час захисної дії фільтра недостатній, або переглядаються умови, або рекомендується застосування кількох фільтрів [61, 62].

У майбутньому важливо доповнити алгоритм цього програмного продукту можливістю вибору даних про відносну вологість і температуру вдихуваного повітря для більш точного визначення прогнозованого часу захисної дії фільтрів [63].

Варто зазначити, що при концентрації шкідливої речовини до 300 ppm ключовий вплив на час захисної дії фільтрів має об'ємна витрата повітря, що проходить через фільтр. Натомість, при концентраціях понад 300 ppm вирішальним фактором стає саме рівень концентрації шкідливої речовини у повітрі, яка проходить через протигазовий фільтр [33, 64].

Висновки до розділу 4

1. Встановлена залежність між енерговитратами споживача під час виробничої роботи у вугільних шахтах та кількістю проникнення шкідливої хімічної небезпечної речовини в підмасковий простір засобу індивідуального захисту органів дихання, яка має нелінійний характер при концентрації сірководню в повітрі робочої зони до $100 \pm 5 \text{ мг/м}^3$, що викликано збільшенням швидкості адсорбції.

2. Встановлена залежність між розподілом швидкості фільтрування за площею фільтра і опором повітряному потоку фільтрів засобів індивідуального захисту органів дихання при різних режимах дихання, що призводить до зміни повітряного потоку від ламінарного до перехідного через різне фізичне навантаження.

3. Встановлено, що час захисної дії скомбінованих фільтрів до фільтрувальних респіраторів залежить не тільки від об'єму сорбенту у фільтрувальній коробці, концентрації небезпечної хімічної речовини у повітрі робочої зони, опору повітряному потоку фільтрів та швидкості фільтрування, а й від енерговитрат користувачів, що додатково впливає на швидкість абсорбції та характер руху повітряного потоку та зменшує термін захисної дії фільтрів до 40 % при високих енерговитратах (250 – 300 Вт) та до 20 % при середніх енерговитратах (150 – 200 Вт) у порівнянні з невисокими енерговитратами в межах 100 Вт.

4. Визначені раціональні конструктивні параметри фільтрувальних коробок (діаметр і висота для циліндричних і розміри сторін і висота для плоских фільтрів), які дозволяють забезпечити рівномірний розподіл швидкості фільтрування з площею фільтра, виходячи із визначення взаємозв'язку між ефективністю, продуктивністю і комфортністю використання фільтрів.

5. Встановлено, що застосування протигазових фільтрів з плоскою формою являється доцільним при низьких і середніх енерговитратах при об'ємній витраті повітряного потоку через фільтрувальний шар до $50 \text{ дм}^3/\text{хв.}$, тоді як фільтри циліндричної форми краще застосовувати для робіт з середніми і високими енерговитратами з об'ємною витратою повітря через фільтрувальний шар від 30 до $90 \text{ дм}^3/\text{хв.}$, що зумовлено переходом режиму руху повітряного потоку від ламінарного до перехідного.

6. Доведено, що визначення терміну захисної дії фільтрів на основі спрацювання ароматичного індикатора, які розміщені в середній фільтрувальній коробці дозволяє на 20 % зменшити невідповідність

розрахунку часу експлуатації фільтрів у порівнянні з лабораторними випробуваннями, що зумовлено врахуванням впливу режиму руху повітряного потоку від ламінарного до перехідного.

7. Удосконалено конструкцію скомбінованого фільтра, за рахунок розміщення в передостанньому шарі активованого вугілля по центру руху повітряного потоку розчинної хлоридно-натрієвої капсули з ароматичною речовиною, яка дозволяє визначити термін захисної дії фільтра, за рахунок дострокового органолептичного визначення закінчення сорбційної ємності фільтра.

8. Розроблено програмний комплекс для розрахунку прогнозного терміну захисної дії протигазових фільтрів, який складається з чотирьох модулів: модуль початкових даних, модуль пам'яті, модуль виведення та візуалізації інформації та модуль обчислення часу захисної дії протигазових фільтрів, що відрізняється від подібних програм можливістю оцінювання рівномірності розподілу повітряного потоку за площею фільтра, впливу режиму руху повітряного потоку від ламінарного до перехідного та кількості енерговитрат користувача.

9. Встановлено, що величини прогнозного часу захисної дії з використанням розробленого програмного продукту та програм виробників засобів індивідуального захисту мають похибку між показниками не більше 10 %, що зумовлено відсутністю врахування нерівномірності відпрацювання адсорбенту фільтра за всією площею.

10. Встановлено, що домінуючим фактором впливу на час захисної дії фільтрів є концентрації шкідливих речовин в діапазоні до 300 ppm, тоді як при перевищенні даного значення домінуючим фактором стає швидкість повітряного потоку, що проходить через фільтр.

Результати досліджень представлені в даному розділі опубліковані в [7, 33, 46, 47, 48]

Література до розділу 4

1. Tristiana R. R. D., Pravitasari R., Wahyuni E. D. Contributing factors of personal protection equipment (PPE) utilization among sand and gravel (SSG) mine workers. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020. Vol. 24, No. 7. P. 9035–9041. DOI: <http://dx.doi.org/10.37200/IJPR/V24I7/PR270893> (дата звернення: 15.10.2025).
2. Ramirez J., O'Shaughnessy P. Filter penetration and breathing resistance evaluation of respirators and dust masks. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2016. Vol. 14, No. 2. P. 148–157. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1237027> (дата звернення: 15.10.2025).
3. Htwe Y. Z. N., Mamat H., Osman B., Haalah M. Performance comparison of single and double masks: Filtration efficiencies, breathing resistance and CO₂ content. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. P. 8349–8357. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06801-w> (дата звернення: 15.10.2025).
4. Lodewyckx P., Fernandez-Velasco L., Boutillara Y. Estimating the Service Life of Activated Carbon Filters for Air Purification. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 2019. Vol. 21(3). P. 193–201. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj860> (дата звернення: 15.10.2025).
5. Holmer I., Kalev K., Gao C. Minute volume and inspiratory flow rates during exhausting treadmill walking using respirators. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2007. Vol. 51, No. 3. P. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1093/annhyg/mem004> (дата звернення: 15.10.2025).
6. Pleil J. D., Wallace M. A. G., Davis M. D., Matty C. M. The physics of human breathing: flow, timing, volume, and pressure parameters for normal, on-demand, and ventilator respiration. *Journal of Breath Research*. 2021. Vol. 15, No. 4. P. ac2589. DOI: <https://doi.org/10.1088/1752-7163/ac2589> (дата звернення: 15.10.2025).
7. Holinko V. I., Cheberiachko S. I., Radchuk D. I., Cheberiachko Yu. I. Study of aerodynamic breathing resistance of dust respirators. *Naukovyi Visnyk*

Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2014. No. 6. P. 131–136 (дата звернення: 15.10.2025).

8. Bazaluk O., Ennan A., Cheberiachko S., Deryugin O., Cheberiachko Y., Saik P., Lozynskiy V., Knysh I. Research on Regularities of Cyclic Air Motion through a Respirator Filter. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 7. P. 3157. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11073157> (дата звернення: 15.10.2025).

9. Bazaluk O., Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Lozynskiy V., Knysh I., Saik P., Naumov M. Development of a Dust Respirator by Improving the Half Mask Frame Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, No. 10. P. 5482. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482> (дата звернення: 15.10.2025).

10. Coyne K., Caretti D., Scott W., Johnson A., Koh F. Inspiratory flow rates during hard work when breathing through different respirator inhalation and exhalation resistances. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2006. Vol. 3, No. 9. P. 490–500. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459620600867807> (дата звернення: 15.10.2025).

11. Ingle M. A., Talmale G. R. Respiratory Mask Selection and Leakage Detection System Based on Canny Edge Detection Operator. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 78. P. 323–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.02.064> (дата звернення: 15.10.2025).

12. Santandrea A., Marchal M., Chazelet S., Marsteau S. Measurement of inward leakage of full-face masks in EN and ISO standards: comparison of gas and aerosol test agents. *Annals of Work Exposures and Health*. 2024. Vol. 68, No. 8. P. 820–833. DOI: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae056> (дата звернення: 15.10.2025).

13. Balanay J. A., Lungu C. Determination of Pressure Drop across Activated Carbon Fiber Respirator Cartridges. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2016. Vol. 13. P. 141–147. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15459624.2015.1091960> (дата звернення: 15.10.2025).

14. Roberge R. J., Kim J. H., Powell J. B., Shaffer R. E., Ylitalo C. M.

Impact of Low Filter Resistances on Subjective and Physiological Responses to Filtering Facepiece Respirators. PLOS ONE. 2013. Vol. 8, No. 12. e84901. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084901> (дата звернення: 15.10.2025).

15. Seo Y. Added inspiratory resistance does not impair cognitive function and mood state. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20, No. 3. P. 2743. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032743> (дата звернення: 15.10.2025).

16. Saleh A. M., Vahedi Tafreshi H., Pourdeyhimi B. Service life of circular pleated filters vs. that of their flat counterpart. Separation and Purification Technology. 2015. Vol. 156(2). P. 881–888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.041> (дата звернення: 15.10.2025).

17. Powell J. B., Kim J. H., Roberge R. J. Powered air-purifying respirator use in healthcare: Effects on thermal sensations and comfort. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2017. Vol. 14, No. 12. P. 947–954. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15459624.2017.1358817> (дата звернення: 15.10.2025).

18. Balanay J. A. G., Lungu C. T. Morphologic and surface characterization of different types of activated carbon fibres. Adsorption Science and Technology. 2012. Vol. 30. P. 355–368. DOI: <https://doi.org/10.1260/0263-6174.30.4.355> (дата звернення: 15.10.2025).

19. Balanay J. A. G., Bartolucci A. A., Lungu C. T. Adsorption characteristics of activated carbon fibers (ACFs) for toluene: application in respiratory protection. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2014. Vol. 11, No. 3. P. 133–143. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.816433> (дата звернення: 15.10.2025).

20. Hung H. W., Lin T. F. Prediction of the adsorption capacity for volatile organic compounds onto activated carbons by the Dubinin–Radushkevich–Langmuir model. Journal of the Air & Waste Management Association. 2007. Vol. 57. P. 497–506. DOI: <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.57.4.497> (дата звернення: 15.10.2025).

21. Li L., Sun Z., Li H. et al. Effects of activated carbon surface properties on the adsorption of volatile organic compounds. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2012. Vol. 62. P. 1196–1202. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2012.700633> (дата звернення: 15.10.2025).
22. Lorimier C., Subrenat A., Le Coq L. et al. Adsorption of toluene onto activated carbon fibre cloths and felts: application to indoor air treatment. *Environmental Technology*. 2005. Vol. 26. P. 1217–1230. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09593332608618600> (дата звернення: 15.10.2025).
23. Balanay J. A. G., Floyd E. L., Lungu C. T. Breakthrough Curves for Toluene Adsorption on Different Types of Activated Carbon Fibers: Application in Respiratory Protection. *Annals of Occupational Hygiene*. 2015. Vol. 59, No. 4. P. 481–490. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/annhyg/meu105> (дата звернення: 15.10.2025).
24. Fournel L., Mocho P., Fanlo J. L. et al. External capillary condensation and adsorption of VOCs onto activated carbon fiber cloth and felt. *Environmental Technology*. 2005. Vol. 26. P. 1277–1287. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09593332608618598> (дата звернення: 15.10.2025).
25. Linders M. J., Mallens E. P., van Bokhoven J. J. et al. Breakthrough of shallow activated carbon beds under constant and pulsating flow. *AIHA Journal*. 2003. Vol. 64, No. 2. P. 173–180. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15428110308984806> (дата звернення: 15.10.2025).
26. Park H.-M., Jung H.-M., Yoon D.-H., Jeon D.-H. Assessing Adsorption and Desorption Performance in the Recovery of Volatile Organic Compounds: A Carbon Fiber Filter Design Perspective. *Tehnički glasnik*. 2024. Vol. 18. P. 581–587. DOI: <http://dx.doi.org/10.31803/tg-20231212075502> (дата звернення: 15.10.2025).
27. Yoon Y. H., Nelson J. H. Application of gas adsorption kinetics. I. A theoretical model for respirator cartridge service life. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1984. Vol. 45, No. 8. P. 509–516. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298668491400197> (дата звернення: 15.10.2025).

28. Linders M. J. G. Adsorption processes in gas mask filter canisters: practical aspects, new materials and modeling. In: Mota J. P., Lyubchik S. (eds.). *Recent Advances in Adsorption Processes for Environmental Protection and Security*. Dordrecht: Springer, 2008. P. 263–276. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6805-8_14 (дата звернення: 15.10.2025).

29. Jeon R., Kim S. H., Ko K., Kwon K., Park M., Seo I., Oh M., Lee C.-H. Advanced cartridge design for a gas respiratory protection system using experiments, CFD simulation and virtual reality. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 426. P. 139101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023> (дата звернення: 15.10.2025).

30. Rajendran A., Kariwala V., Farooq S. Correction procedures for extra-column effects in dynamic column breakthrough experiments. *Chemical Engineering Science*. 2008. Vol. 63, No. 10. P. 2696–2706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.02.023> (дата звернення: 15.10.2025).

31. Kaczmariski K., Przywara M., Lorenc-Grabowska E. Advanced modelling of adsorption process on activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. Vol. 181. P. 27–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.004> (дата звернення: 15.10.2025).

32. Yoro K. O., Amosa M. K., Sekoai P. T., Mulopo J., Daramola M. O. Diffusion mechanism and effect of mass transfer limitation during the adsorption of CO₂ by polyaspartamide in a packed-bed unit. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2019. Vol. 13, No. 1. P. 54–67. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2019.1592261> (дата звернення: 15.10.2025).

33. Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М., Чеберячко С. І. Дослідження впливу конструктивних параметрів протигазових фільтрувальних коробок на термін захисної дії респіраторів. *Social Development and Security*. 2024. No. 14(3). С. 180–194. URL: <http://www.paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/689> (дата звернення: 15.10.2025).

34. Li C. C. Aerodynamic behavior of a gas mask canister containing two

porous media. Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64(8). P. 1832–1843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.01.009> (дата звернення: 15.10.2025).

35. Jeon R., Ko K., Kwon K., Park M., Seo I., Oh M., Lee C.-H. Optimal Design of an Advanced Canister for a Next-Generation Gas Mask Using CFD Simulation and Virtual Reality. SSRN. 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4145268> (дата звернення: 15.10.2025).

36. Sedlář M., Krátký T., Langer J. Numerical and Experimental Investigation of Three-Dimensional Flow in Combined Protective Canister Filters. Fluids. 2022. Vol. 7(5). P. 171. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids7050171> (дата звернення: 15.10.2025).

37. Su Y.-C., Li C.-C. Computational fluid dynamics simulations and tests for improving industrial-grade gas mask canisters. Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7(8). DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814015596297> (дата звернення: 15.10.2025).

38. Li C.-C., Miao J. M., Wang C. C., Su Y. C., Lo T. Y. 3-D Numerical Simulation of Main Sieve Diaphragm with Three Types Passageway Design in a Gas Mask Canister. In: Choi H., Choi H. G., Yoo J. Y. (eds.). Computational Fluid Dynamics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-01273-0_45 (дата звернення: 15.10.2025).

39. Технічний регламент засобів індивідуального захисту : Постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 771. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.10.2025).

40. ДСТУ EN 14387:2021. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові та фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 24 с.

41. US Occupational Safety and Health Administration. Respiratory Protection. Code of Federal Regulations Title 29, Part 1910.134. 2014. P. 426–452. Режим доступу: <https://www.osha.gov/enforcement/directives/cpl-02-00-158> (дата звернення: 15.10.2025).

42. ДСТУ EN 529:2006. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, догляду і обслуговування. Настанова. Київ : Держспоживстандарт, 2007. 47 с.

43. Офіційний сайт компанії 3М. Режим доступу: https://www.3m.com/3M/en_US/worker-health-safety-us/ (дата звернення: 15.10.2025).

44. Офіційний сайт компанії Honeywell. Режим доступу: <https://sps-support.honeywell.com/s/article/Service-Life-of-North-Chemical-Cartridges-Service-Life-Estimator> (дата звернення: 15.10.2025).

45. Centers for Disease Control and Prevention. MultiVapor™ Version 2.2.5 Application. Режим доступу: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/multivapor/multivapor.html> (дата звернення: 15.10.2025).

46. Радчук Д. І., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В. Аналіз ефективності існуючих способів визначення часу захисної дії протигазових фільтрів. Науковий вісник ДонНТУ. 2023. № 2(11). С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-128-137> (дата звернення: 15.10.2025).

47. Скомбінований фільтр з системою індикації закінчення строку служби : пат. 159947 Україна. Заявл. 29.10.2024 ; опубл. 23.07.2025, Бюл. № 30.

48. Радчук Д. І., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М. Розробка скомбіновано фільтру з індикацією закінчення строку служби для протигазу. Електротехнічні та інформаційні системи. 2024. Вип. 106. С. 100–109. URL: <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-17> (дата звернення: 15.10.2025).

49. Noraini N., Zainol M. M., Alias A., Sulaiman N., Azmir N., Taib I., Damanhuri A., Osman B. Activated carbon for gas adsorption and its application in gas mask respirator filters: a review. International Journal of Environmental Science and Technology. 2024. Vol. 22(12). DOI:

<http://dx.doi.org/10.1007/s13762-024-06188-1> (дата звернення: 15.10.2025).

50. Jonas L. A., Rehrmann J. A. Predictive equations in gas adsorption kinetics. *Carbon*. 1973. Vol. 11, No. 1. P. 59–64. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(73\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0008-6223(73)90008-0) (дата звернення: 15.10.2025).

51. Greenberg M. I., Curtis J. A., Vearrier D. The perception of odor is not a surrogate marker for chemical exposure: a review of factors influencing human odor perception. *Clinical Toxicology*. 2013. Vol. 51(2). P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.3109/15563650.2013.767908> (дата звернення: 15.10.2025).

52. Amore J. E., Hautala E. Odor as an aid to chemical safety: odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. *Journal of Applied Toxicology*. 1983. Vol. 3(6). P. 272–290. DOI: <https://doi.org/10.1002/jat.2550030603> (дата звернення: 15.10.2025).

53. Barnard J. E., Scott S., Tennison S., Smith M. W., Harral M. W., Burrows A. D., Perera S., Chew Y. M. J. Design and optimisation of a multifunctional monolithic filter for fire escape masks. *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430(2). P. 132775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132775> (дата звернення: 15.10.2025).

54. Bessac B. F., Jordt S. E. Sensory detection and responses to toxic gases: mechanisms, health effects, and countermeasures. *Proceedings of the American Thoracic Society*. 2010. Vol. 7(4). P. 269–277. DOI: <https://doi.org/10.1513/pats.201001-004sm> (дата звернення: 15.10.2025).

55. Aqueveque P., Cortés M., Gómez B., Osorio R., Pastene F., Radrigan L., Morales A. Embedded Electronic Sensor for Monitoring of Breathing Activity, Fitting and Filter Clogging in Reusable Industrial Respirators. *Biosensors*. 2022. Vol. 12. P. 991. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12110991> (дата звернення: 15.10.2025).

56. Checky M., Frankel K., Goddard D., Johnson E., Thomas J., Zelinsky M., Javner C. Evaluation of a Passive Optical Based End of Service Life Indicator (ESLI) for Organic Vapor Respirator Cartridges. *Journal of Occupational and*

Environmental Hygiene. 2015. Vol. 13. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1091956> (дата звернення: 15.10.2025).

57. Bęś P., Strzałkowski P. Analysis of the Effectiveness of Safety Training Methods. Sustainability. 2024. Vol. 16(7). P. 2732. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072732> (дата звернення: 15.10.2025).

58. Estudillo B., Forteza F. J., Carretero-Gómez J. M. Effectiveness of training in reducing accidents in construction companies. Journal of Safety Research. 2025. Vol. 92. P. 283–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.12.005> (дата звернення: 15.10.2025).

59. Respiration, Respirators and Work Capacity. 3M JobHealth Highlights. 2001. Vol. 19(2). URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/143160O/respiration-respirators-and-work-capacity-2001.pdf> (дата звернення: 15.10.2025).

60. Agarwal R., Aggarwal S. G. Absorption Efficiency Assessment and Uncertainty Measurement of the Sodium Arsenite Method for Ambient NO₂ Determination. Aerosol and Air Quality Research. 2021. Vol. 21. P. 200583. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.200583> (дата звернення: 15.10.2025).

61. Zangmeister C. D., Radney J. G., Vicenzi E. P., Weaver J. L. Filtration efficiencies of nanoscale aerosol by cloth mask materials used to slow the spread of SARS-CoV-2. ACS Nano. 2020. Vol. 14. P. 9188–9200. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05025> (дата звернення: 15.10.2025).

62. Zhao M., Liao L., Xiao W., Yu X., Wang H., Wang Q., Lin Y. L., Balci F. S. K., Price A., Chu L., Chu M. C., Chu S., Cui Y. Household materials selection for homemade cloth face coverings and their filtration efficiency enhancement with triboelectric charging. Nano Letters. 2020. Vol. 20. P. 5544–5552. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02211> (дата звернення: 15.10.2025).

63. Zhang H., Zhang J., Hu Z., Quan L., Shi L., Chen J., Xuan W., Zhang Z., Dong S., Luo J. Waist-wearable wireless respiration sensor based on triboelectric effect. Nano Energy. 2019. Vol. 59. P. 75–83. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.063> (дата звернення: 15.10.2025).

64. Jennifer A. M., Gutierrez A., Galang M. D., Seva R. R., Lu M. C., Ty D. R. S. Designing an improved respirator for automotive painters. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2014. Vol. 44. P. 131–139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.004> (дата звернення: 15.10.2025).

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОГО ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА

5.1 Вплив дизайну фільтрувальної коробки на процес фільтрації

Корпуси протиаерозольних фільтрів зазвичай виготовляються круглої форми, що обумовлено історично з використанням складчастих фільтрів круглої форми та технологічно, оскільки виготовлення прес-форми для лиття таких корпусів набагато є простішим. Крім того поширеними є корпуси фільтрів для респіраторів типу РПА-ТД зі зміщеним вихідним отвором відносно центральної осі (рис. 5.1 а). Проте з постачанням на ринок фільтрів, що виготовлені по за межами України, з'явилась тенденція на використання фільтрів з корпусами з центральним розміщенням вихідного отвору відносно центральної осі (рис. 5.1 б).

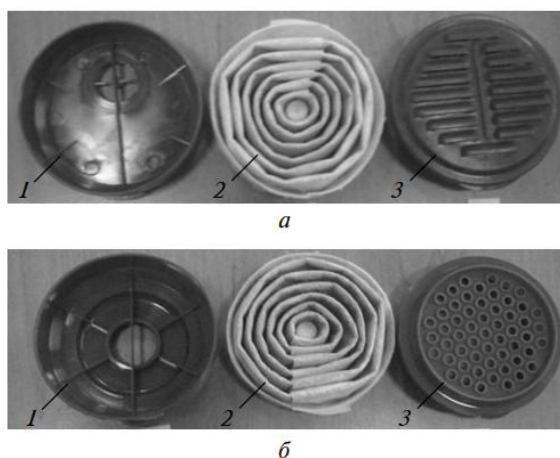


Рисунок 5.1 – Корпуси протиаерозольних фільтрів різного виконання:

1 – корпус фільтра, 2 - протиаерозольний фільтр, 3 – кришка фільтра

5.1.1 Опис методики дослідження зміни перепаду тиску на фільтрувальних коробках

Для пошуку раціонального розподілу перепаду тиску в корпусі фільтра було проведено дослідження з вимірювання величини перепаду тиску в коробці за її довжиною (рис. 5.2). Для цього по довжині корпусу робились

отвори, в яких вимірювався перепад тиску за постійної витрати повітря через фільтр 30 та 95 дм³/хв. [1].



Рисунок 5.2 – Зовнішній вигляд корпусу фільтра з отворами для вимірювання перепаду тиску

У проведеному дослідженні були отримані дані щодо розподілу перепаду тиску та швидкості повітряного потоку за фільтром. Ці показники вимірювалися шляхом переміщення трубки Піто з кроком 10 мм по діаметру задньої стінки фільтрувальної коробки. Для забезпечення точності вимірювань, всі вільні отвори тимчасово закривались пластичним матеріалом, що не пропускає повітря.

Корпус фільтра був надійно та герметично приєднаний до насадки. Витрата повітря через фільтр встановлювалася за допомогою ротаметра РМ-6,3ГУЗ та регулювалася аспіратором АПВ-М-3-220В-250. Для визначення перепаду тиску на досліджуваному фільтрі використовувався електронний мановакууметр Testo 512. Цей прилад має діапазон вимірювання від -2000 Па до 2000 Па з точністю 1 Па згідно паспортних даних. Перепад тиску на фільтрі ΔP розраховувався за формулою [2]:

$$\Delta P = P_{\phi} - P_{\text{поч}},$$

де P_{ϕ} – величина перепаду тиску випробувальної системи з фільтром, Па; $P_{\text{поч}}$ – величина перепаду тиску випробувальної системи без фільтра, Па.

Схема установки з визначення перепаду тиску показана на рисунку 5.3.

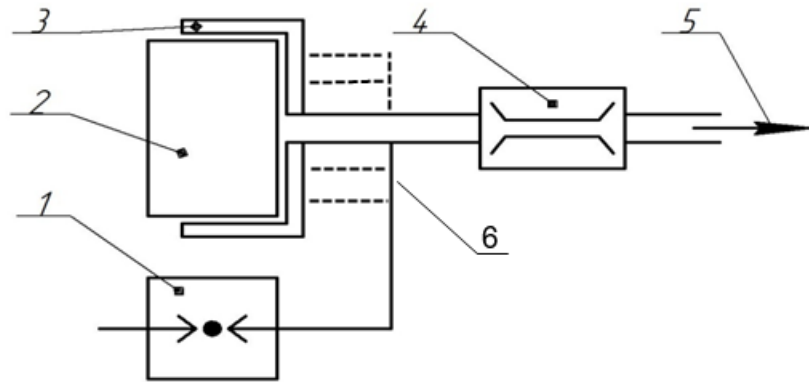
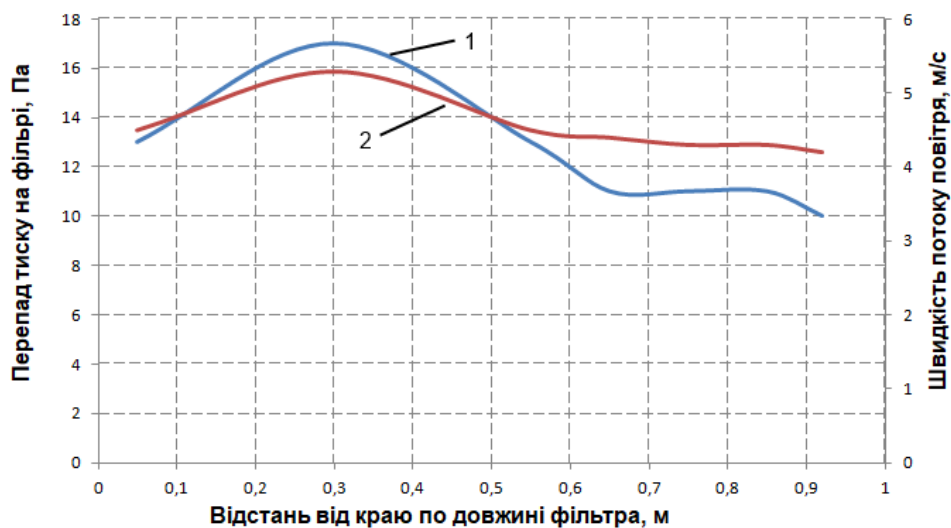


Рисунок 5.3 – Загальна схема установки з визначення перепаду тиску на фільтрах: 1 - електронний мановакууметр Testo 512, 2 – протигазовий фільтр, 3 – придатна насадка для приєднання фільтра, 4 – витратомір РМ-6,3ГУЗ, 5 – лінія руху повітря до аспіратора АПВ-М-3-220в-250; 6 – лінія приєднання електронного мановакууметра Testo 512

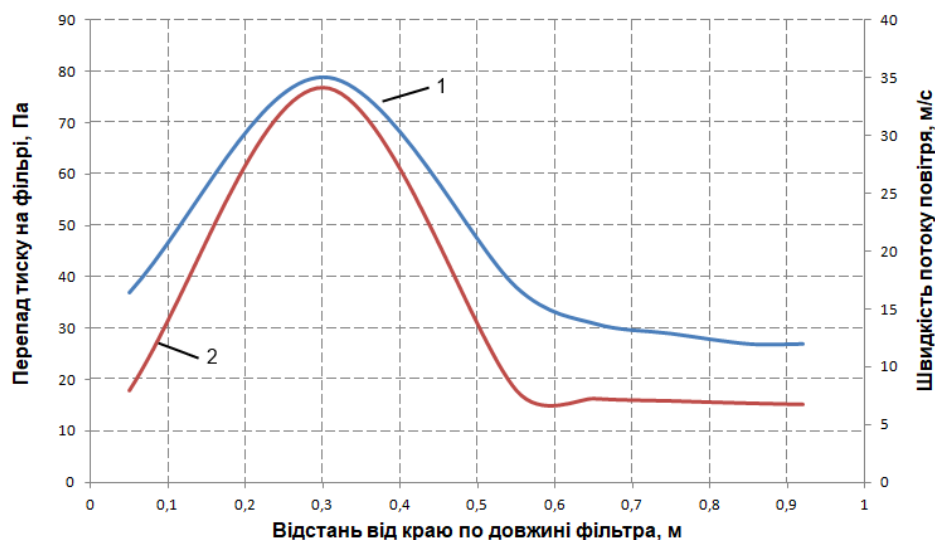
Обробку отриманих експериментальних даних та побудову графіків залежностей проводили в програмі Microsoft Excel 2019. Викиди були перевірені за допомогою Z-показників, і всі значення були в межах $0,05 < p \leq 2$.

5.1.2 Результати зміни перепаду тиску на фільтрах розміщених у різних фільтрувальних коробках

Аналіз отриманих даних показав, що у фільтрувальних коробок із центральним отвором сумарний опір повітряному потоку фільтра та самої коробки на майже на 20 % менший, ніж у коробки зі зміщеним вихідним отвором. Це пояснюється зменшенням площі “мертвої” зони, де майже відсутній рух повітря. При цьому для досягнення вихідного отвору коробки струменем повітря, який стикнеться із задньою стінкою, необхідно буде подолати опір декількох складок, розміщених на його шляху. І чим далі струмінь від вихідного отвору, тим більший опір йому необхідно подолати. Діаграми розподілу перепаду тиску та швидкостей руху повітря в коробках протиаерозольних фільтрів представлені на рис. 5.4.



а

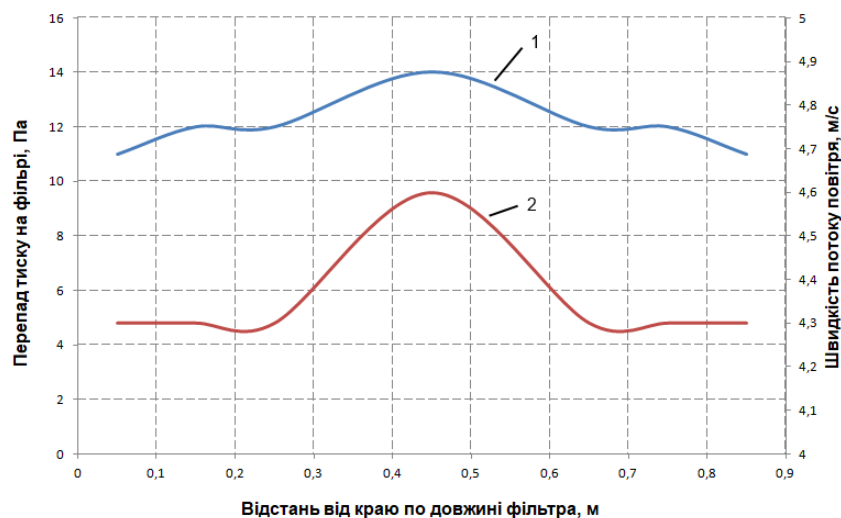


б

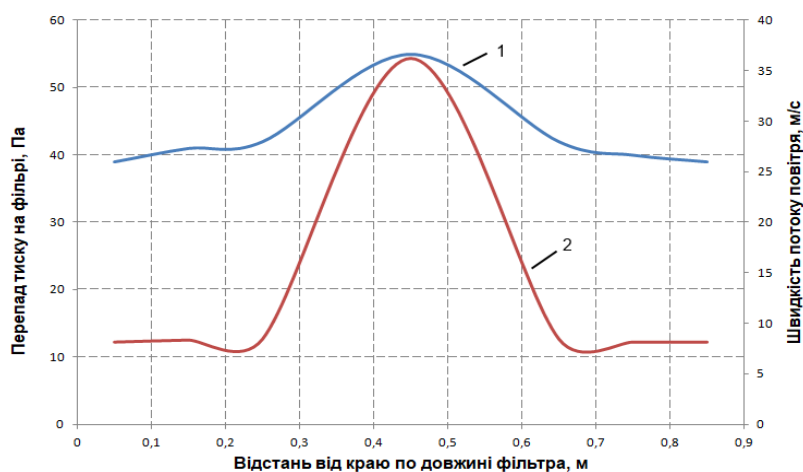
Рисунок 5.4 – Діаграма перепаду тиску (1) та швидкості повітряного потоку (2) в корпусі зі зміщеним вихідним отвором відносно центральної осі коробки за витрати $30 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ (а) та $95 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ (б)

У коробки з центральним вихідним отвором це явище менше виражене, і крайнім струменям повітря потрібно подолати меншу відстань до виходу (рис. 5.5). Однак різке звуження потоку призводить до появи втрат тиску на удар. При цьому виникає викривлення траєкторії повітряного потоку, внаслідок чого він продовжує за інерцією рух до середини отвору. Це

викликає скорочення площі струменя, що позначається на роботі тільки тієї частини фільтра, яка розміщена навпроти вихідного отвору.



а



б

Рисунок 5.5 – Діаграма перепаду тиску (1) та швидкості повітряного потоку (2) в корпусі з центральним розміщенням вихідного отвору відносно осі коробки за витрати 30 дм³/хв. (а) та 95 дм³/хв. (б)

5.1.3 Результати моделювання руху повітряних потоків в коробках з різним розміщенням вихідного отвору в програмному середовищі SolidWorks

Отримані емпіричні дані підтверджуються результатами моделювання руху повітряних потоків в коробках з різним розміщенням вихідного отвору відносно її центру.

Повітряні потоки в корпусах протиаерозольних фільтрів моделювали за допомогою програмного середовища SolidWorks задавали рух повітря з витратою, що змінювалася в межах від 30 до 95 дм³/хв. Також задавалася кількості ітерацій (до 165) з урахуванням достатнього рівня достовірності розрахунку. Ітераційний процес завершувався, коли величина кроку варіювання ставала меншою за допустиму похибку, що становила не більше 5 %.

У процесі розрахунків були побудовані епюри розподілу швидкостей повітряного потоку через корпуси протиаерозольних фільтрів (рис. 5.6).

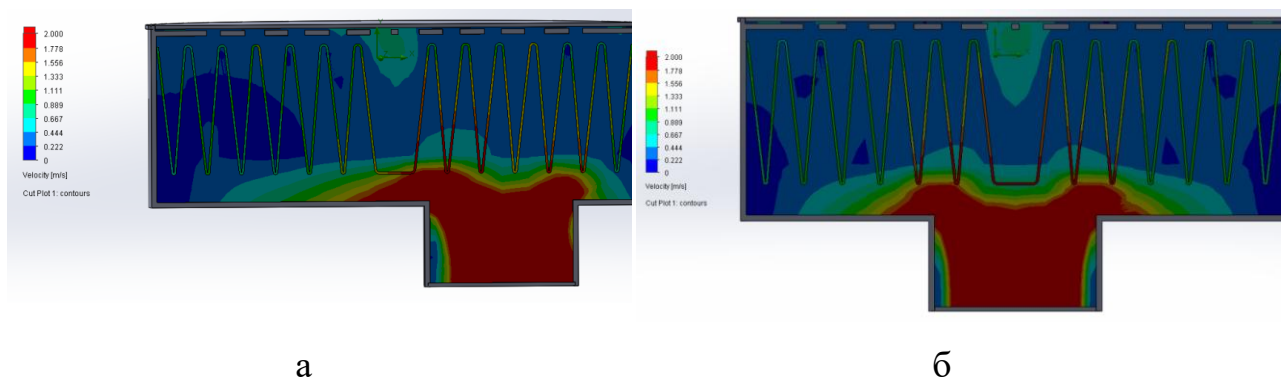


Рисунок 5.6 – Моделі руху повітряних потоків через коробки протиаерозольних фільтрів зі зміщеним вихідним отвором (а) та центральним розміщенням вихідного отвору (б) відносно осі коробки за витрати 95 дм³/хв.

Попри менший перепад тиску у конструкціях з центральним розміщенням вихідного отвором, за результатами не зафіксовано зниження захисної ефективності фільтра. Коефіцієнт проникнення залишався в межах нормативних значень, що свідчить про збереження ефективності навіть за зміненої траєкторії повітряного потоку (рис. 5.7).

Таким чином, конструкція з центральним отвором є доцільнішою для використання у фільтрувальних системах з обмеженим простором, де для користувача є пріоритетним використання фільтрів з низьким початковим опором диханню. Однак у системах з високими вимогами до рівномірності

фільтрації можливо знадобиться доопрацювання форми вихідного каналу для уникнення втрат повітряним потоком від ударних процесів.

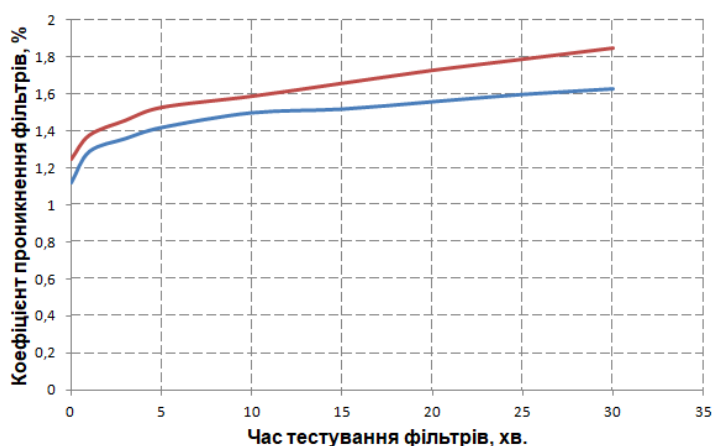


Рисунок 5.7 – Діаграми розвитку коефіцієнту проникання через фільтр в часі коробки протиаерозольних фільтрів зі зміщеним вихідним отвором (а) та центральним розміщенням вихідного отвору (б) відносно осі коробки за витрати $95 \text{ дм}^3/\text{хв.}$

5.2 Визначення параметрів конфігурації фільтрів

5.2.1 Аналіз теоретичних залежностей між параметрами конфігурації фільтрів та їх захисними властивостями

Протиаерозольні фільтри зазвичай виготовляються в двох виконаннях – пласкої форми та складчастої форми, усі інші варіації є проміжними етапами між цими двома виконаннями.

Головними характеристиками фільтрів, як готового до використання виробу, є перепад тиску та коефіцієнт проникнення, що залежать від параметрів фільтрувального матеріалу з якого їх було виготовлено та площі фільтрувальної поверхні.

Перепад тиску фільтра є важливою характеристикою, оскільки він впливає на енергетичні втрати процесу фільтрації, і його зміна з часом може спричинити проблеми з підтриманням постійної швидкості руху повітря та,

можливо, проблем з перепадом тиску, механікою процесу фільтрування, а також впливатиме на строк служби фільтра.

Основними математичними законами, за якими можна описати перепад тиску фільтра плоскої форми за умови відсутності забруднювача на його поверхні є наступні:

1. Закон Дарсі. Він зазвичай застосовується до фільтрації рідин, проте за умови низьких швидкостях (швидкість менше 0,5 м/с), коли рідину можна вважати середовищем, що не стискається, то він може бути застосований до фільтрації газів.

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot h \cdot V}{K_{\text{пр.ф.ш.}}}$$

де $K_{\text{пр.ф.ш.}}$ – проникність фільтруючого середовища, м^2 , μ — динамічна в'язкість повітря, $\text{Па} \cdot \text{с}$, h – товщина шару фільтрувального матеріалу, м ; V – швидкість руху повітря, м/с .

2. Закон Форхгеймера. Він застосовується до фільтрації газу для досить високих швидкостей, коли потік більше не є чисто в'язким; Таким чином, це розширення закону Дарсі, оскільки в такому випадку враховуються інерційні сили, що виникають при різких змінах напрямку руху основної частини повітряного потоку.

$$\Delta P = \left(\frac{\mu \cdot V}{K_{\text{пр.ф.ш.}}} + \frac{\rho \cdot V^2}{K_{\text{форх}}} \right) \cdot h$$

де $K_{\text{форх}}$ – проникність Форхгеймера, м

Багато авторів запропонували закони визначення перепаду тиску, що є застосовними до чистих фільтрів виготовлених з волокнистих фільтрувальних матеріалів [7, 8]. Більшість запропонованих математичних моделей походять із закону Дарсі, оскільки низькі фронтальні швидкості повітряних потоків є застосовними до цих фільтрів. В такому випадку закон Дарсі записується у вигляді:

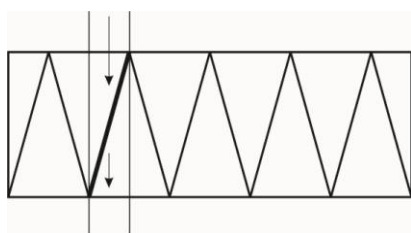
$$\Delta P = \mu \cdot h \cdot V \cdot \frac{f(\alpha)}{r_f^2}$$

Співвідношення $\frac{f(\alpha)}{r_f^2}$ дозволяє виразити проникність фільтра як функцію геометричних характеристик фільтрувального матеріалу. Функції $f(\alpha)$, запропоновані основними авторами, представлені в таблиці 5.1.

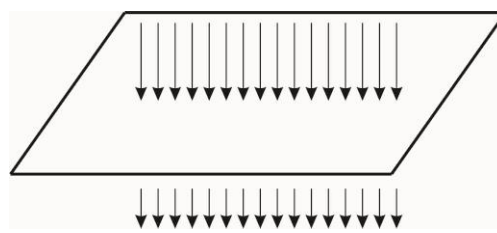
Таблиця 5.1 – Функції $f(\alpha)$

Автор	Davies (1952) [3]	Happel (1959) [4]	Kuwabara (1959) [5]	Фукс та Стечкина 1963 [6]
Тип моделі	Емпірична	Теоретичні моделі в'язкої течії потоку перпендикулярно до паралельних циліндрів		
$f(\alpha)$	$16\alpha^{3/2} \cdot (1 + 56\alpha^3)$	$\frac{8\alpha}{-\ln\alpha - (\frac{1-\alpha^2}{1+\alpha^2})}$	$\frac{8\alpha}{-\ln\alpha + 2\alpha - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{3}{2}}$	$\frac{8\alpha}{-\ln\alpha - \frac{3}{2}}$
Спрощення	$16\alpha^{3/2}$ для $\alpha < 0,1$		Нехтування моделлю Фукса та Стечкиної $2\alpha - \alpha^2/2$	
Примітка	Модель підтверджена численними експериментальними результатами	Моделі, що дають значення ΔP вище, ніж експериментальні дані Дейвіса		

Процес проходження повітря через складчасті фільтри відрізняється від фільтрування плоскими фільтрами оскільки положення складок відносно лінії руху повітря, що подається в напрямку фільтра, вже не є виключно перпендикулярним (рис. 5.8).



а



б

Рисунок 5.8 – Напрямок руху повітряних потоків в фільтрах плоскої та складчастої форми

Перше моделювання повітряних потоків у складчастих фільтрах було проведено Рабером [9]. У його дослідженні складчастий фільтр представлений у вигляді серії трикутних складок. Через симетричну

геометрію цієї структури аналіз виконується лише на половині фігури. Даний сегмент потім ділиться на кінцеві елементи, до яких застосовуються рівняння. Щоб виконати розрахунки, автори припустили рівномірний профіль швидкості на вході повітряного потоку та синусоїдальний рух повітря вниз по складці. Автори також вважали, що потік повітря є перпендикулярним до фільтруючої поверхні і задовольняє закону Дарсі.

В результаті математичних розрахунків та скорочень дійшли до наступної форми:

$$\frac{P_{I1} + P_{I2}}{2} - \frac{P_{E1} + P_{E2}}{2} = C_1 \cdot \frac{\mu}{g_c} \cdot \frac{W}{\rho \cdot A} + C_2 \cdot \frac{W^2}{2g_c \cdot \rho \cdot S_\phi^2}$$

де, $P_{I1,2}$ – величина статичного тиску перед фільтром на першій складці та поверхні складок, Па; $P_{E1,2}$ – величина статичного тиску за фільтром на першій складці та поверхні складки, Па; C_1 та C_2 – константи; μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с; g_c – прискорення сили тяжіння, м/с²; W – масова витрата рідини, кг/с; S_ϕ – площа фільтрувальної поверхні, м².

Проте даний підхід дозволяє тільки теоретично прогнозувати перепад тиску на фільтрі, що в реальному стані його важко перевірити.

Інший підхід було запропоновано дослідниками Ю та Гулдінгом [10]. Використовуючи аналітично-чисельний підхід вони моделювали складчастий фільтр як серію каналів. В такому випадку опис руху повітряного потоку у складковому просторі спрощується – він прирівнюється до потоку в каналі секції, висотою $2h$ за умови нагнітання і відводу повітряної маси стінками фільтруючого середовища, тобто без втрат. Рух повітряного потоку також вважається перпендикулярним до фільтрувальної поверхні (рис. 2.9).

Хоча потік у фільтрі не є рівномірним уздовж складки, автори вирішили розрізати висоту складки на нескінченно малі кінцеві елементи Δx . Тоді потік вважається рівномірним в кожному елементі. Таким чином, для Δx_{n+1} потік буде відрізнятися від Δx проходженням повітряного середовища через стінки.

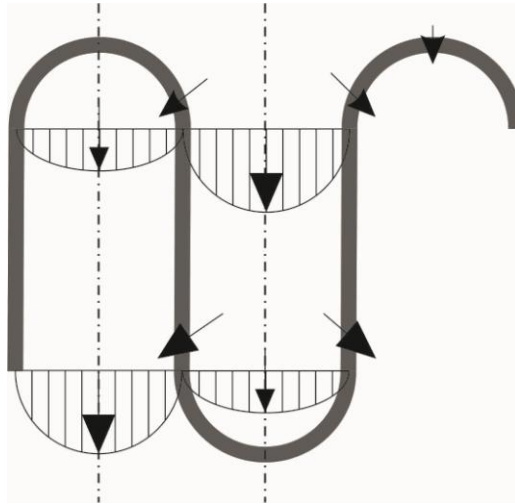


Рисунок 5.9 – Модель руху повітряного потоку через складки фільтру

Вираз для втрати тиску ΔP в елементі Δx у напрямку потоку стає наступним:

$$\Delta P = 96\chi(1 - 2Re_{\omega}\chi) \cdot \left(1 - \frac{Re_{\omega}}{5}\right)$$

де, χ - безрозмірна подовжня координата певної точки фільтрувального середовища; Re - число Рейнольдса.

Проста ітераційна схема використовується для отримання перепаду тиску та профілів швидкості в просторі складки вище та нижче за течією потоку та в середовищі від вершини складки до її низу. За словами авторів, дана модель дозволяє оптимізувати кількість хвиль складчастого фільтра для отримання мінімальних втрат тиску. Проте автори зазначають, що оптимальне число не залежить від використовуваної вхідної швидкості та модель дійсна лише для фільтрів з невеликою висотою складок.

Недоліком даного підходу є залежність від контролювання геометричних параметрів складчастого фільтра з метою встановлення величини перепаду тиску на певній ділянці або точці фільтрувальної поверхні. Крім того, математична модель розглядає ідеальну модель фільтра з чіткими гранями та правильними геометричними формами.

Перепад тиску складчастого фільтра досліджувалося в багатьох попередніх роботах. Деякі вчені розділили загальне падіння тиску на перепад

тиску складчастої геометрії та перепад тиску фільтруючого середовища [11, 12], тоді як інші ігнорували перше, вважаючи, що структурний опір є набагато меншим, ніж опір фільтрації при низькій швидкості фільтрації [13-15]. В роботі [16] автори знехтували структурним опором, а перепад тиску фільтруючого середовища вважалось загальним падінням тиску, яке можна розрахувати за законом Дарсі.

Розглянемо складку фільтра як плоску щілину, що особливо є актуальним при збільшенні кількості складок на одиницю поверхні. В такому випадку для оцінки руху повітря застосуємо закон Пуазейля для плоскої щілини. Для ламінарного потоку повітря в каналі між двома паралельними пластинами, який подібний до канал між хвилями складчастого фільтра, питома об'ємна витрата на один канал, тобто на одну складку, визначається за формулою:

$$Q = \frac{W_{\phi}^3 \cdot \Delta P \cdot h_{\text{скл}}}{12 \cdot \mu \cdot l_{\text{скл}}}$$

де W_{ϕ} – відстань між складками, м; ΔP – перепад тиску, Па; μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с; $l_{\text{скл}}$ – довжина складки, м; $h_{\text{скл}}$ – висота складки (глибина складки), м.

Якщо загальна довжина фільтра становить L_{ϕ} , а крок між складками W_{ϕ} , то кількість складок визначається як $N = \frac{L_{\phi}}{W_{\phi}}$

$$Q_{\phi} = \frac{L^2 \cdot \Delta P \cdot h_{\text{скл}} \cdot L_{\phi}}{12 \cdot \mu \cdot l_{\text{скл}}}$$

А довжина складки визначиться відповідно

$$l_{\text{скл}} = \frac{W_{\phi}^3 \cdot \Delta P \cdot h}{12 \cdot \mu \cdot Q_{\phi}}$$

Проте конструктивно складка не є рівною щілиною по всій довжині, а її ширина $W_{\phi}(x)$ змінюється лінійно вздовж висоти складки $h_{\text{скл}}$.

В роботі [17] автори запропонували рівняння, що описує перепад тиску на складчастому фільтрі:

$$\Delta P = (\varepsilon_{in} + \varepsilon_{out}) \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} + \frac{1}{K_{пр.ф.ш}} \cdot \mu V_f h + \frac{24 \cdot \mu \cdot V \cdot h_{скл}}{d_{кан}^2}$$

ε_{in} – коефіцієнт втрат на вході (звуження потоку); ε_{out} – коефіцієнт втрат на виході (розширення потоку); ρ – густина повітря, кг/м³; $K_{пр.ф.ш}$ – проникність фільтрувального матеріалу, м²; V – швидкість у каналі між складками, м/с; V_f – швидкість фільтрації через матеріал, м/с; h – товщина фільтрувального матеріалу, м; $d_{кан}$ – гідравлічний діаметр каналу між складками, $\approx L$; $h_{скл}$ – висота складки, м.

Перша частина рівняння описує вхідні та вихідні втрати енергії повітряним потоком і є пропорційною до V^2 . Для складчастих фільтрів він складає $\varepsilon_{in} \approx 0.5-1.2$, $\varepsilon_{out} \approx 0.8-1.5$

Друга частина рівняння описує втрати в фільтрувальному матеріалі, що відбуваються при проходженні повітряного потоку через нього.

Третя частина рівняння описує втрати в каналах між складками та представляє собою модифікований закон Пуазейля для некругових каналів. Наприклад пласкої щілини, якою можна представити проміжок між складками фільтра.

Швидкість фільтрації через бічні поверхні складок може бути визначена рівнянням

$$V_f = \frac{Q}{2 \cdot n \cdot h_{скл} \cdot l_{скл}}$$

Швидкість в каналі між складками

$$V = \frac{Q}{n \cdot h_{скл} \cdot l_{скл}}$$

Також враховується вплив висоти складки $h_{скл}$ до довжини каналу складки $l_{скл}$. Так, у вище зазначеному рівнянні саме цифровий коефіцієнт визначає дане співвідношення, яке найчастіше використовується в промисловій фільтрації, де висота складки набагато менше довжини. Відповідно, коефіцієнт впливу геометрії фільтра на процес фільтрації $K_{геом}$ визначається наступним чином:

$$K_{\text{геом}} = \frac{24}{\left(1 + \frac{12 \cdot h_{\text{скл}}}{l_{\text{скл}}}\right)} = \frac{24 \cdot l_{\text{скл}}}{(l_{\text{скл}} + 12 \cdot h_{\text{скл}})}$$

Тоді удосконалене рівняння перепаду тиску має вигляд:

$$\Delta P = (\varepsilon_{in} + \varepsilon_{out}) \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} + \frac{\mu \cdot V_f \cdot h}{K_{\text{пр.ф.ш}}} + \frac{K_{\text{геом}} \cdot \mu \cdot V \cdot h_{\text{скл}}}{W_{\phi}^2}$$

$$\Delta P = (\varepsilon_{in} + \varepsilon_{out}) \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} + \frac{\mu \cdot Q_{\phi} \cdot h}{2 \cdot n \cdot h_{\text{скл}} \cdot l_{\text{скл}} \cdot K_{\text{пр.ф.ш}}} + \frac{K_{\text{геом}} \cdot \mu \cdot V \cdot h_{\text{скл}}}{W_{\phi}^2}$$

В такому рівнянні враховуються втрати на вході та виході з каналів між складками, вони залежать від квадрата швидкості та є домінуючими при високих швидкостях. Враховуються втрати при проходженні через пористий матеріал, вони лінійно залежать від витрати Q_{ϕ} та визначаються проникністю матеріалу $K_{\text{пр.ф.ш}}$. Також містить модифіковану залежність розрахунку втрат Пуазейля з геометричним коефіцієнтом складки, враховується співвідношення $h_{\text{скл}}/l_{\text{скл}}$ та лінійно залежить від швидкості V .

Довжину складки $l_{\text{скл}}$ автори [17] пропонують визначати рівнянням

$$l_{\text{скл}} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot h \cdot d^2}{24 \cdot K_{\text{пр.ф.ш}}}} - a_1 *$$

Дане рівняння базується на лінійних втратах, але реальні втрати при проходженні повітря через складки фільтра можуть бути нелінійними. Тому рівняння може бути представлено наступним чином:

$$l_{\text{скл}} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot h \cdot d^2}{24 \cdot K_{\text{пр.ф.ш}}} \cdot (1 + \beta \cdot Re^{\lambda})} - a_1 *$$

де a_1 , a_1^* – коефіцієнти оптимізації; β , λ – коефіцієнти нелінійності; Re – число Рейнольдса в каналі.

Удосконалене рівняння з урахуванням коефіцієнта геометрії матиме наступний вигляд:

$$l_{\text{скл}} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot h \cdot d^2}{K_{\text{геом}} \cdot K_{\text{пр.ф.ш}}} \cdot (1 + \beta \cdot Re^{\lambda})} - a_1 *$$

Висоту складки авторами [17] пропонується визначати наступним чином:

$$h_{\text{скл}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{27 \cdot K_{\text{пр.ф.ш}} \cdot l_{\text{скл}}^2}{h}}$$

Удосконалене рівняння з урахуванням коефіцієнта геометрії матиме наступний вигляд:

$$h_{\text{скл}} = C_{\text{неодн}} \cdot \sqrt[3]{\frac{K_{\text{пр.ф.ш}} \cdot l_{\text{скл}}^2}{h} \cdot f(Re) \cdot g\left(\frac{L}{W}\right)}$$

де $C_{\text{неодн}}$ – коефіцієнт неоднорідності форми фільтра (1,5-2,5); $f(Re)$ – функція числа Рейнольдса для врахування режиму течії; $g(L/w)$ – функція відношення довжини до ширини фільтра.

Коефіцієнт неоднорідності форми C враховує геометричні відмінності реального фільтра від ідеалізованої моделі плоскої щілини, неоднорідність руху потоку повітря всередині каналу складки (нерівномірний профіль швидкості) та реальний опір фільтрувального матеріалу, який може частково порушувати ламінарність потоку. Ще один підхід з визначення параметрів складчастих фільтрів прямокутної форми засновано на лінійних величинах, що враховує товщину фільтрувального матеріалу h (рис. 5.10) [18]:

$$W_{\phi} = h_1 + h_2 + h$$

де h_1, h_2 – ширина вхідного і вихідного каналів складок фільтра.

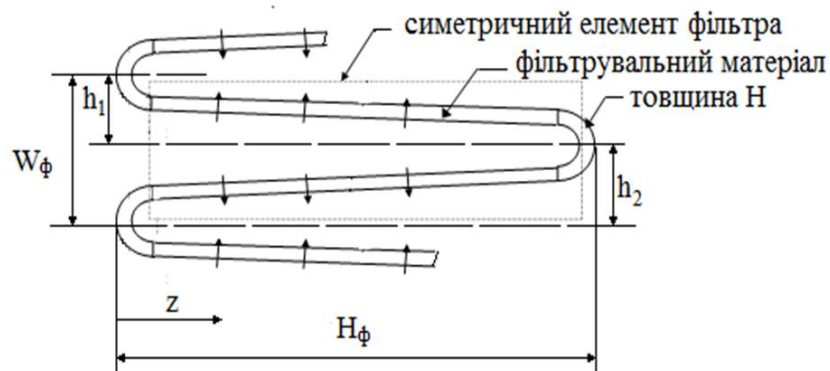


Рис. 5.10 – Схема елемента складки фільтра, що повторюється

Даний підхід дозволяє теоретично розрахувати параметри фільтрів, але не враховуються фізичний та технологічний впливи, тому рівняння набуває наступного вигляду:

$$W_{\phi} = (h_1 + h_2 + h \cdot \delta) \cdot (1 + \varepsilon_{\text{техн}})$$

де δ – коефіцієнт деформації фільтрувального матеріалу при формуванні в складку (0.95–1.2), залежить від матеріалу, температури, вологості;

$\varepsilon_{\text{техн}}$ – технологічна похибка або запас на зминання, яка враховує неточності згинання або зміщення складок (3-7 %);

Аеродинамічний поправочний коефіцієнт форми складки фільтра γ , який враховує зменшення ефективного просвіту через опір потоку:

$$W_{\text{еф}} = W\gamma \text{ де } \gamma \in (0.85 \div 0.98)$$

Інший підхід використовується для радіальних фільтрів (круглої форми), де співвідношення між висотою і шагом хвиль у складчастих фільтрів з різних матеріалів відрізняються одне від одного за однакової мінімальної величини опору диханню. Отже, і їх діаметр буде різним, оскільки його величина залежить від шагу складки і їх кількості:

$$2W_{\phi} = \frac{R_{\phi} - r}{n}$$

де R_{ϕ} – радіус фільтруючої коробки, мм; r – радіус ковпачка, мм; n – кількість складок фільтра.

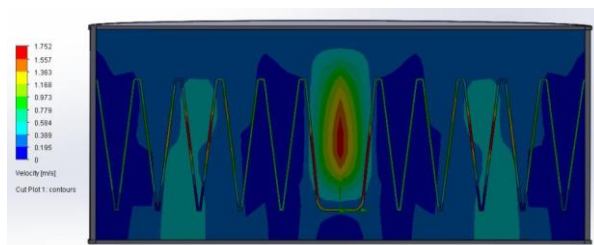
Для радіальних фільтрів критичним значенням є жорсткість фільтрувального матеріалу, що визначає його здатність тримати форму та не змикати складки. З урахуванням впливу жорсткості фільтрувального матеріалу, технологічних похибок та впливу товщини матеріалу може бути представлена наступним чином:

$$2W_{\phi} = \frac{(R_{\phi} - r) \cdot k_{\text{щ.скл}}}{n \cdot (1 - \varepsilon_{\text{техн}})}$$

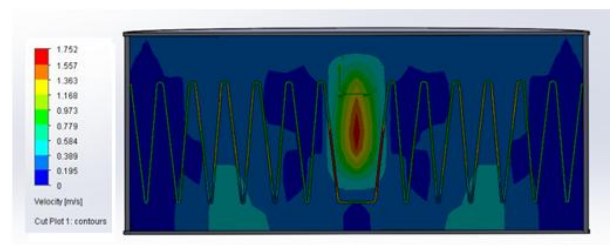
де $k_{\text{щ.скл}}$ – коефіцієнт щільності укладки складок, що враховує ступінь ущільнення при встановленні в корпус фільтра (0.9-1.1).

5.2.2 Результати моделювання зміни захисних властивостей фільтрів від впливу їх конфігурації в програмному середовищі SolidWorks

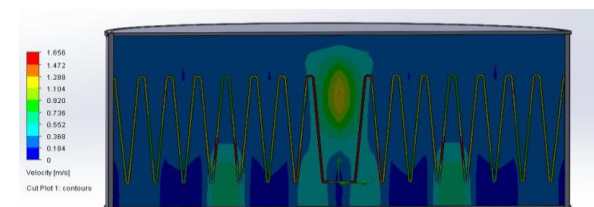
З використанням даних вище встановлених математичних залежностей в програмному середовищі SolidWorks було створено 3 моделі радіальних фільтрів з різною кількістю складок, а саме 5 (рис. 5.11 а), 6 (рис. 5.11 б) та 7 відповідно (рис. 5.11 в). Фільтр розміщувався в аеродинамічній трубі, що відповідає діаметру радіальної фільтрувальної коробки до фільтра ФРПА (92 мм). Довжину аеродинамічної труби задавали, виходячи з трьохкратного перевищення довжини фільтрувальної коробки ≈ 150 мм. Загальна площа симуляції – склала 300 см^2 , що охоплює загальну площу труби. Розміри Local Mesh Refinement складали 1 мм. В трубі відварювалось рух повітряного потоку, який проходив через фільтр з витратою повітря, що змінювалася в межах 90 - 95 $\text{дм}^3/\text{хв}$. Також задавалась кількість ітерацій (до 165) з урахуванням достатнього рівня достовірності розрахунку.



а)



б)



в)

Рисунок 5.11 – Епюри руху повітря через складчасті радіальні фільтри:

а) 5 складок; б) 6 складок; в) 7

складок

За результатами моделювання було визначено лінії току за якими розраховувалась нерівномірність повітряного потоку через фільтр АВ, яка викликається кількістю складок (рис. 5.12). Для цього встановлювали

відношення середньої швидкості до різниці максимальної швидкості до мінімальної:

$$AV = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{сер}}$$

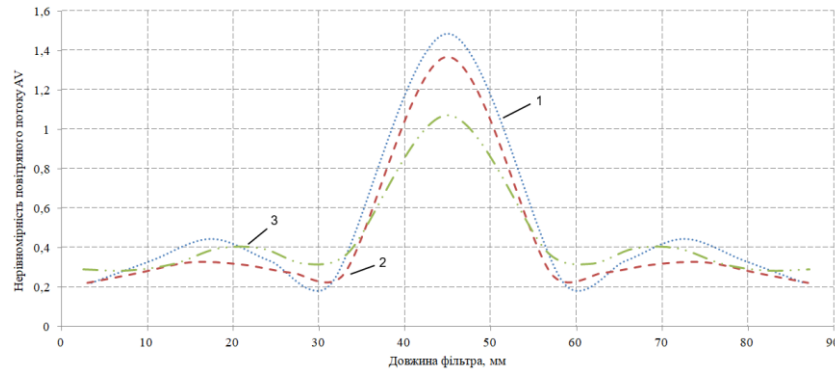


Рисунок 5.12 – Залежність нерівномірності повітряного потоку через фільтр за довжиною від кількості складок

Графік демонструє хвильовий характер розподілу нерівномірності вздовж довжини фільтра, що зумовлено геометрією складчастої структури. Найвищі значення нерівномірності спостерігаються в центральній частині фільтра, де відбувається максимальна концентрація турбулентних зон.

Залежність показує, що збільшення кількості складок призводить до більш рівномірного ламінарного потоку повітря через фільтр, що пояснюється зменшенням лінійної швидкості проходження потоку через одиницю фільтрувальної площі та усунення турбулентних проявів в просторі між складками. Так, для фільтра з 5 складками коефіцієнт нерівномірності перевищує 1,4, що вказує на значну неоднорідність потоку. У варіанті з 6 складками максимальне значення зменшується до близько 1,2. Найбільш рівномірний розподіл досягається при 7 складках, де коефіцієнт не перевищує 1,0, а коливання вздовж фільтра мінімальні.

Для забезпечення необхідної ефективності фільтрів з однаковою кількістю складок необхідно виготовляти фільтрувальні коробки респіратора різних розмірів. Виходячи з цього, у кожного виробника повинен бути конструктивний ряд фільтрувальних коробок, які б змогли забезпечити

ефективне використання фільтрів з різних фільтрувальних матеріалів. Вважаємо недоцільним виготовляти фільтрувальні коробки різних розмірів, оскільки це ускладнить експлуатацію респіратора і збільшить його собівартість. Отже, необхідно розробити такі конструкції фільтрів, з врахуванням параметрів фільтрувальних матеріалів, щоб їх розміри відповідали габаритам однієї фільтрувальної коробки єдиного типорозміру.

5.2.3 Результати лабораторних досліджень впливу конфігурації фільтра на захисні та експлуатаційні його властивості

Для проведення дослідження використовувались фільтри пласкої і складчастої форми, виготовлені з поліпропіленового фільтрувального матеріалу щільністю 50 г/м² з діаметром волокон у межах 1–3 мкм і товщиною фільтрувального шару 0,6 мм. Складчасті фільтри мали U-подібну форму в одній площині (рис. 5.13) і виготовлялися у п'яти варіантах, кожен з яких відрізнявся площею фільтрації залежно від кількості складок (від 5 до 30).

Відстань між складками W_{ϕ} обчислювали відповідно до формули [19]:

$$W_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{n} - 2h$$

де L_{ϕ} — загальна довжина фільтра, м; h — товщина фільтрувального матеріалу, м; n — кількість складок, од.

Для збереження форми складок з обох боків фільтра по довжині приклеювали смужки з щільного картону (2 мм завширшки, щільністю 180 г/м²), що підтримували конфігурацію складки. Висота складки становила 10 мм та обмежена вертикальними розмірами фільтрувальної коробки. Ширину фільтра встановлювали відповідно до ширини експериментального зразка коробки.

Для оцінювання зміни аеродинамічного опору створених протитипових фільтрів за допомогою 3D друку виготовили фільтрувальну коробку

прямокутної форми розміром $50 \times 100 \times 15$ мм із вихідним отвором під стандартне різблення $R_d 40 \times 1/7$ (рис. 5.14). Корпус було надруковано з пластику ABS (нитка діаметром 1,75 мм, Plexiwire, Україна).

Експериментальний зразок фільтра щільно встановлювали всередину фільтрувальної коробки. Для герметизації зазорів між фільтром та фільтрувальною коробкою по периметру застосовували прозорий силіконовий герметик Ceresit Silicoflexx марки CS 25. Перепад тиску визначали згідно зі стандартизованою процедурою ДСТУ EN 13274-3:2001 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 3. Визначення опору диханню» [2], з використанням постійного повітряного потоку з витратами $30 \text{ дм}^3/\text{хв}$ та $95 \text{ дм}^3/\text{хв}$.



Рисунок 5.13 – Загальний вигляд експериментального зразка складчастого фільтра з 30 U-подібними складками

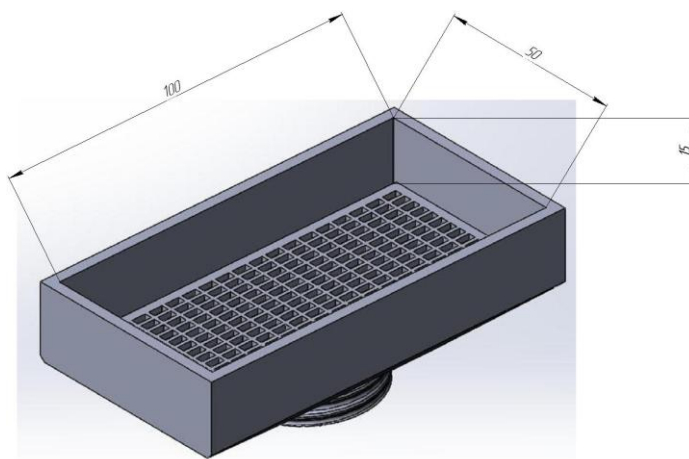


Рисунок 5.14 – Фільтрувальна коробка, яка виготовлена з матеріалу ABS, діаметр нитки 1,75 мм (Plexiwire, Україна), розмір вихідного отвору 40 мм

Корпус фільтра щільно встановлювався на прийнятній насадці з різьбовим з'єднанням, що забезпечувало міцне та герметичне приєднання.

Використовуваний фільтрувальний матеріал «Елефлен 5Р» є гомогенним за структурою та технологічно виготовляється таким чином, що усі його ділянки характеризуються однаковими параметрами в межах допустимих відмінностей від середнього встановленого значення. Для процесу формування складок однорідність матеріалу дозволяє встановити коефіцієнт конфігурації $K_{\text{конфіг}}$, що представляє собою додатковий опір повітряному потоку, який виникає через утворення каналів між складками. Коефіцієнт конфігурації можна визначити емпіричним шляхом за формулою:

$$K_{\text{конфіг}} = \frac{\Delta P}{R_{\phi} Q_{\phi}^{n_{\text{пот}}}} \quad (5.1)$$

де Q_{ϕ} – витрата повітря через фільтр, $\text{дм}^3/\text{хв}$; R_{ϕ} – аеродинамічний опір пористого фільтрувального матеріалу, $\text{Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$; $n_{\text{пот}}$ - коефіцієнт потоку (для ламінарного потоку $n=1$, для турбулентного $n>1$); ΔP – перепад тиску на фільтрі, Па.

За результатами експериментальних досліджень залежності перепаду тиску на фільтрах від кількості складок, було визначено характеристики аеродинамічного опору фільтрувального матеріалу та розраховано коефіцієнт конфігурації фільтрів. Також було враховано, що площі крайній складок, які контактують зі стінками фільтрувальної коробки були виключені з розрахунків коефіцієнта конфігурації, оскільки через дану поверхні не відбувався рух повітряного потоку. Результати представлені в табл. 5.2 і 5.3.

Таблиця 5.2 – Експериментальні дані зміни перепаду тиску на фільтрах за витрати повітряного потоку 30 дм³/хв. з різною кількістю складок

Кількість складок n	Параметри фільтра			Аеродинамічний опір фільтрувального матеріалу R_f , Па•с ² /м ⁶	Перепад тиску на фільтрі ΔP , Па	Коефіцієнт конфігурації $K_{\text{конфіг}}$
	Площа фільтрування S_f , см ²	Відстань між складками W_f , мм	Висота складки $h_{\text{скл}}$, мм			
30	375	2,8	10	1,4	16	0,3810
28	350	3,0	10	1,4	15	0,3571
26	325	3,2	10	1,4	11	0,2619
24	300	3,5	10	1,4	9	0,2143
22	275	3,8	10	1,4	8	0,1904
20	250	4,2	10	1,4	9	0,2142
18	225	4,6	10	1,4	10	0,2380
16	200	5,2	10	1,4	11	0,2619
14	175	6,0	10	1,4	14	0,3333
12	150	6,9	10	1,4	15	0,3571
10	125	8,3	10	1,4	19	0,4523
8	100	10,4	10	1,4	25	0,5952
5	75	16,7	10	1,4	33	0,7857
0	50	0	0	-	42	1

Таблиця 5.3 – Експериментальні дані зміни перепаду тиску на фільтрах за витрати повітряного потоку 95 дм³/хв. з різною кількістю складок

Кількість складок n	Параметри фільтра			Аеродинамічний опір фільтрувального матеріалу R_f , Па•с ² /м ⁶	Перепад тиску на фільтрі ΔP , Па	Коефіцієнт конфігурації $K_{\text{конфіг}}$
	Площа фільтрування S_f , см ²	Відстань між складками W_f , мм	Висота складки $h_{\text{скл}}$, мм			
30	375	2,8	10	1,42	35	0,2593
28	350	3,0	10	1,42	31	0,2296
26	325	3,2	10	1,42	22	0,1630
24	300	3,5	10	1,42	17	0,1259
22	275	3,8	10	1,42	13	0,0962
20	250	4,2	10	1,42	22	0,1629
18	225	4,6	10	1,42	37	0,2740
16	200	5,2	10	1,42	41	0,3037
14	175	6,0	10	1,42	45	0,3333
12	150	6,9	10	1,42	48	0,3555
10	125	8,3	10	1,42	49	0,3629
8	100	10,4	10	1,42	74	0,5481
5	75	16,7	10	1,42	106	0,7851
0	50	0	0	-	135	1

За даними таблиць 5.2 і 5.3 були побудовані залежності між коефіцієнтом конфігурації і кількістю складок у фільтрі, а також залежність зміни перепаду тиску від кількістю складок у фільтрі при різних витратах

повітря (рис. 5.15, 5.16). Аналіз отриманих даних чітко показує на те, що збільшення площі фільтрації завдяки складчастій формі ефективно знижує перепад тиску на фільтрах.

Зокрема, мінімальний перепад тиску в 13 Па при витраті повітря 30 дм³/хв зафіксовано при коефіцієнті конфігурації 0,096, що відповідає 22 складкам на фільтрі та загальній площі фільтрації в 275 см². Однак, подальше збільшення площі фільтра призводить до зростання перепаду тиску. Починаючи з загальної площі фільтрації в 300 см², перепад тиску поступово підвищується. Це явище пояснюється нерівномірним розподілом швидкості руху повітря в складчастому каналі, де повітря не рухається через деякі ділянки складок або воно є ускладненим.

Отже оптимальне значення коефіцієнта конфігурації фільтра та його вплив на величину перепаду тиску для фільтра прямокутної форми, що виготовлений з поліпропіленових матеріалів з щільністю 50 г/м² та товщиною фільтрувального шару 0,6 мм за висоти складок фільтра 10 мм можна визначити за емпіричною формулами:

$$\text{за витрати } 30 \text{ дм}^3/\text{хв. } \kappa_{\text{конфіг}} = 0,0023 \cdot n^2 - 0,0958 \cdot n + 1,2021 \quad (5.2)$$

$$\text{за витрати } 95 \text{ дм}^3/\text{хв. } \kappa_{\text{конфіг}} = 0,0019 \cdot n^2 - 0,0845 \cdot n + 1,1198 \quad (5.3)$$

де, n – кількість складок фільтра, од.

На основі наведених формул (5.2) та (5.3) встановлено раціональну відстань між складками фільтра прямокутної форми, яка знаходиться у межах 3-4 мм, тобто 2,5-3,3 складки/см.

В загальному вигляді формула визначення коефіцієнту конфігурації для прямокутного фільтра може бути подана у наступному вигляді:

$$\kappa_{\text{конфіг}} = a_k \cdot n^2 - b_k \cdot n + c_k \quad (5.4)$$

де a_k , b_k і c_k – коефіцієнти, які визначають експериментально і залежать від властивостей фільтрувального матеріалу (гідродинамічного опору, діаметру волокон та щільності їх упакування) та параметрів конфігурації (висоти складки).

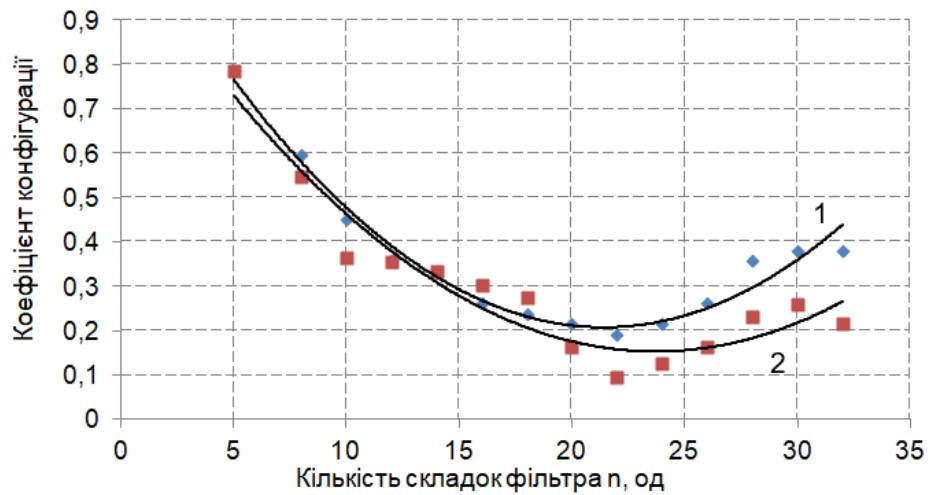


Рисунок 5.15 – Залежність коефіцієнту конфігурації від кількості складок фільтра з поліпропіленового фільтрувального матеріалу за витрати 30 дм³/хв (1) і 95 дм³/хв (2).

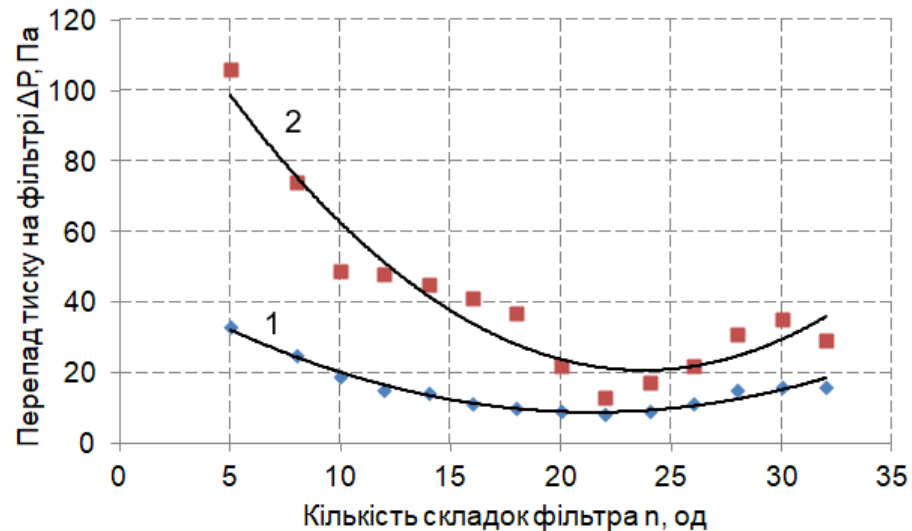


Рисунок 5.16 – Залежність зміни перепаду тиску від кількістю складок у фільтрі з поліпропіленового фільтрувального матеріалу за витрати 30 дм³/хв. (1) і 95 дм³/хв. (2)

Коефіцієнт b_k визначається як відношення кількості складок (n) до загальної площі фільтрування (S_ϕ)

$$b_k = \frac{n}{S_\phi}$$

Коефіцієнт c_k – характеризує мінімальну кількість складок, що може бути в фільтрі (для фільтра плоскої форми $c = 1$).

Використовуючи рівняння (5.4) можна прогнозувати параметри складчастих фільтрів, в залежності від запланованих параметрів. Так, в разі

використання коефіцієнтів a_k зі значенням 0,002, b_k зі значенням 0,08 та c_k зі значенням 1 отримуємо наступну залежність (рис. 5.17).

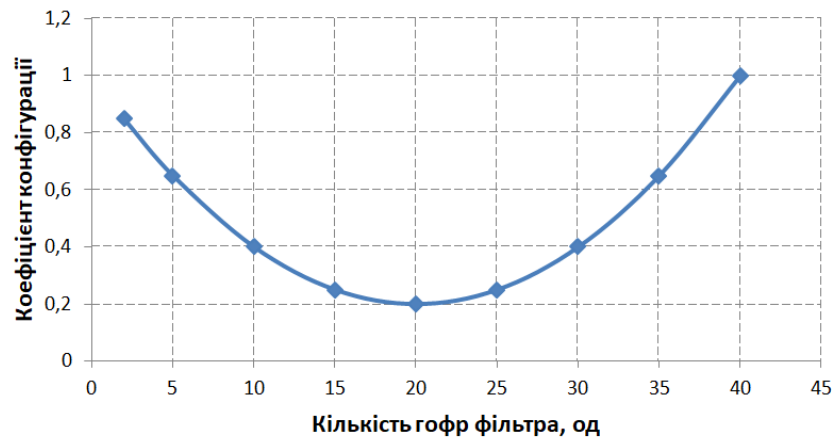


Рисунок 5.17 – Залежність теоретично розрахованого коефіцієнту конфігурації від кількості складок для поліпропіленового фільтрувального матеріалу

З урахуванням залежностей (5.1) та (5.4) вплив коефіцієнта конфігурації на перепад тиску складчастого фільтра може бути представлено наступним чином

$$\Delta P = (a_k \cdot n^2 - b_k \cdot n + c_k) \cdot R_f Q_f^{n_{\text{пот}}} \quad (5.5)$$

Для визначення коефіцієнта конфігурації фільтрів, які виготовляються з різних фільтрувальних матеріалів необхідно дотримуватись наступного алгоритму:

- на першому етапі проводиться визначення початкового перепаду тиску на фільтрі плоскої конфігурації. На основі цих даних розраховується аеродинамічний опір використаного фільтрувального матеріалу;
- на другому етапі визначається площа фільтра з урахуванням висоти фільтрувальної коробки та раціональної відстані між складками. Для поліпропіленових матеріалів оптимальна відстань між складками становить 3–4 мм;
- на третьому етапі розраховується коефіцієнт конфігурації фільтра згідно з формулою (5.3). Отримане значення порівнюється з раціональним

значенням, визначеним за формулою (5.1), для верифікації отриманих параметрів.

Отримані результати пояснюються тим, що використання в конструкції фільтрів правильних геометричних фігур (коло для радіальних фільтрів або прямокутник для плоских фільтрів; трикутник або прямокутник для складчастих фільтрів) дозволяє математично прогнозувати поведінку рухів повітряних потоків та їх розподіл по фільтрувальній поверхні. Це забезпечує передбачуваність аеродинамічних характеристик системи.

Однак, у реальних умовах експлуатації або під час виробничого процесу складки можуть бути частково деформовані або видозмінені. Такі зміни впливають на математичні залежності, що описують рух повітряних потоків, і вимагають введення додаткових коригувальних коефіцієнтів для забезпечення точності розрахунків та прогнозування характеристик фільтра.

Представлений підхід є новаторським, оскільки не був раніше досліджений науковцями. Хоча загальні тенденції, що зі збільшенням кількості складок перепад тиску спочатку зменшується, а потім зростає, були відомі, але математичного опису у вигляді рівнянь не пропонувалося. Наприклад, у роботі [20] автори використовували загальний термін "коефіцієнт опору", проте це питання більш глибоко не розглядалося.

У роботі [21] встановлено, що оптимальна кількість складок становить $2,15 \text{ см}^{-1}$ з точки зору мінімізації перепаду тиску. Однак для досягнення найкращого коефіцієнта захисту складчастий фільтр повинен мати 2,65 складок на 1 см. Дослідження [22] визначило оптимальний діапазон кількості складок фільтра від 2,22 до 3,7. Проте дані висновки стосувалися фільтрувальних матеріалів, призначених для промислової вентиляції. Це є відмінним від фільтрації ЗІЗ, що мають набагато нижчі значення об'ємної витрати повітря, яка проходить через фільтр.

Важливо зазначити, що представлені залежності були перевірені виключно з використанням поліпропіленових фільтрувальних матеріалів. Отже, поведінка скловолоконних або інших типів фільтрувальних матеріалів

у подібних умовах залишається невивченою. Це вказує на необхідність подальших досліджень для узагальнення отриманих результатів на ширший спектр фільтруючих середовищ.

У проведеному дослідженні існують технічні обмеження щодо максимальної кількості складок у фільтрі, що не перевищувала 30 одиниць. Це обумовлено шириною використовуваного фільтрувального матеріалу. Питання про можливість з'єднання двох смуг фільтрувального матеріалу по довжині для збільшення кількості складок не розглядалося в рамках цього дослідження [23].

Розташування складок фільтра фіксувалося спеціальними речовинами. З одного боку, це могло призвести до нещільностей, що потенційно занижувало фактичні значення показників. З іншого боку, ці речовини зменшують ефективну фільтрувальну поверхню, що, у свою чергу, може призводити до збільшення перепаду тиску.

Крім того, експериментально не було перевірено нижню межу потенційно можливої кількості складок, коли вони вже будуть заважати одна одній [24].

В подальшому дані дослідження можуть бути розширені шляхом пошуку коефіцієнту крутизни (швидкості) зміни коефіцієнту конфігурації a , який змінюється від неоднорідності матеріалу та лінійного коефіцієнту b , який саме визначає оптимальну кількість складок.

У подальших дослідженнях отримані дані можуть бути розширені шляхом визначення коефіцієнта крутизни (швидкості) зміни коефіцієнта конфігурації a_k . Цей коефіцієнт варіюється залежно від неоднорідності матеріалу. Також планується визначення лінійного коефіцієнта b_k , який безпосередньо впливає на оптимальну кількість складок. Ці параметри дозволять створити більш точну та універсальну модель для оптимізації характеристик фільтрів.

У поточному дослідженні методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) не застосовувалися. Було б доцільно порівняти емпіричні та теоретичні дані з

результатами комп'ютерного моделювання. У роботі [25] автори використовували елементи проектування, що дозволило отримати параметри фільтрів, близькі до фактичних. Порівняно з CFD, емпіричне рівняння простіше у використанні та вимагає менше часу на розрахунки. Емпіричні рівняння та оптимізовані процедури проектування є корисними інструментами при розробці нових конструкцій фільтрів.

Дослідження [26] представило числовий CFD-код для розрахунку опору потоку та ефективності фільтрації складчастих структур різних розмірів. Точність цієї моделі була підтверджена експериментами, показавши максимальні відносні похибки для опору потоку 3,43 % та для ефективності фільтрації 11,09 %. На основі цієї моделі було досліджено ефективність фільтрації складчастих фільтрів із прямокутною та трикутною структурами. Результати CFD-моделювання демонструють, що зменшення ширини складки збільшує опір потоку повітря всередині складчастої конструкції. Це призводить до нерівномірного розподілу швидкості газу як по висоті, так і по глибині складки.

5.3 Вплив конструкції вхідних отворів фільтрувальних коробок на процес руху повітря через корпус фільтра

Для аналізу впливу конструкції фільтрувальної коробки на аеродинамічні характеристики повітряного потоку, який надходить до фільтра використовували числове моделювання у тривимірній декартовій системі координат на основі рівняння непереривності потоку

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (5.6)$$

де $\frac{du}{dx}; \frac{dv}{dy}; \frac{dw}{dz}$ – частинні похідні швидкості руху повітряного потоку, які показують, як змінюється величина швидкості за певним напрямком.

Рахуючи, що процес дихання характеризується певним прискоренням, то використаємо рівняння Нав'є-Стокса для опису руху повітряного потоку за різними осями координат:

Ось X

$$\frac{du}{dt} + \frac{d(u^2)}{dx} + \frac{d(uv)}{dy} + \frac{d(uw)}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \nu \left[\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right] \quad (5.7)$$

Ось Y

$$\frac{dv}{dt} + \frac{d(uv)}{dx} + \frac{d(v^2)}{dy} + \frac{d(vw)}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dy} + \nu \left[\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2v}{dz^2} \right] \quad (5.8)$$

Ось Z

$$\frac{dw}{dt} + \frac{d(uw)}{dx} + \frac{d(vw)}{dy} + \frac{d(w^2)}{dz} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} + \nu \left[\frac{d^2w}{dx^2} + \frac{d^2w}{dy^2} + \frac{d^2w}{dz^2} \right] \quad (5.9)$$

де p – тиск повітряного потоку, Па; ρ – щільність повітряного потоку, кг/м³; t – час, с; x, y, z – координати.

Використовуючи закон збереження енергії запишемо результуюче рівняння

$$\frac{dT}{dt} + \frac{d(uT)}{dx} + \frac{d(vT)}{dy} + \frac{d(wT)}{dz} = \alpha \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) + \frac{q}{\rho C_p} \quad (5.10)$$

де q – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); α – теплопровідність повітря, м²/с; C_p – питома теплоємність повітря при сталому тиску, Дж/(кг·К).

Після інтегрування за об'ємом рівняння маси, енергії та імпульсу рідини можна перетворити на алгебраїчні рівняння наступним чином

$$\frac{d}{dt} \int_V (\rho \phi) dV + \int_A \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{V}) dA = \oint_A \vec{n} \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) dA + \int_V S_\phi \cdot dV \quad (5.11)$$

де $\int_A \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{V}) dA$ – конвективний член рівняння; $\oint_A \vec{n} \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) dA$ – дифузійний член рівняння; $\int_V S_\phi \cdot dV$ – член рівняння, що генерується; $\frac{d}{dt} \int_V (\rho \phi) dV$ – нестационарний член рівняння.

На основі зазначених вище рівнянь було проведено моделювання руху повітряного потоку у фільтрувальних коробках (рис. 5.18) для визначення

рівномірності розподілу його швидкості за площею перерізу в програмному середовищі SolidWorks за допомогою модуля Flow Simulation.

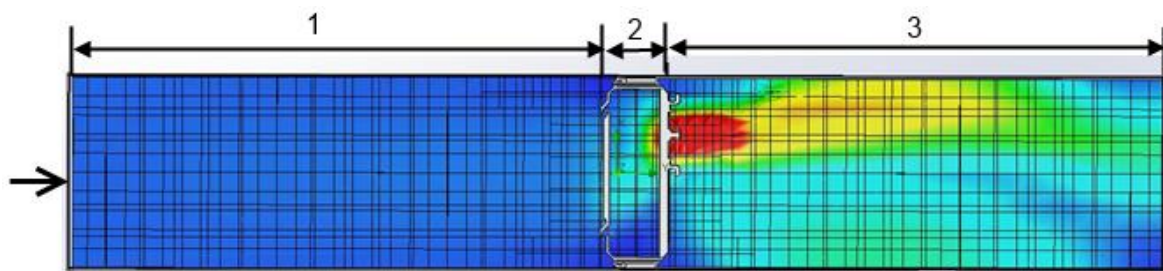


Рисунок 5.18 – Розрахункова схема моделювання руху повітряного потоку через фільтрувальну коробку: 1 – вхідна ділянка повітропроводу із заданою витратою повітря Q , 2 – протиаерозольний фільтр, 3 – вихідна ділянка повітропроводу

Таблиця 5.4 – Граничні умови моделювання і припущення

№	Умови	Характеристика
1	Вхідна гранична умова	Умова на вході до фільтрувальної коробки, що використовується для початкового розрахунку, приймається нормальний атмосферний тиск P_0 .
2	Вихідна гранична умова	Потік, що генерується легеннями людини під час процесу вдихання, є імітованим потоком у напрямку навколишнього середовища, також приймається вихідна гранична умова нормального атмосферного тиску P_0
3	Гранична умова біля стінок фільтрувальної коробки	Окрім умови непроникності стінок, задається умова не ковзання, тобто $u = v = w = 0$. Значення коефіцієнтів k та ϵ задаються, виходячи з емпіричних досліджень.
4	Припущення, зроблене для зменшення складності розрахунку поля потоку	Поле потоку знаходиться в стаціонарному стані, а рідина це повітря, що не стискається. Вплив сили тяжіння не враховувався. Пов'язані властивості рідини, такі як в'язкість, густина та питома теплоємність, є постійними величинами. Відносна швидкість між твердою поверхнею та повітряним потоком дорівнює нулю, що є умовою без ковзання. Фізичні властивості повітряного потоку не змінюються з температурою.

Цей модуль призначений для тривимірного комп'ютерного моделювання руху рідини та газу, ґрунтуючись на рівняннях Нав'є-Стокса та енергії. Розрахункова сітка була автоматично генерована модулем з рівнем деталізації 3. Згідно з конфігурацією моделі, загальна кількість елементарних комірок склала приблизно 15 000, що є прийнятним для вирішення задач середньої складності. Граничні умови моделювання наведені в таблиці 5.4. Межа виходу мала рівномірний тиск 1 атм.

Було змодельований розподіл швидкості повітряного потоку у внутрішньому об'ємі коробки фільтра. На основі отриманих результатів побудовано відповідні епюри полів, що дозволило візуально представити динаміку зміни параметрів у просторі.

Для дослідження використали цифрові копії трьох типів кришок фільтрувальних коробок до протипилових респіраторів, які наведені на рис. 5.19

- з жалюзьями, які забезпечують ламінарність потоку та захищають фільтрувальний елемент від прямого потрапляння вологи й бруду на нього;
- круглими отворами по всій поверхні кришки, які зменшують опір диханню, надають прямий розподілений доступ забрудненого повітря до фільтрувального елемента та не містять виступів, якими можна зачепитись в робочому процесі; та
- центральним круглим отвором з розподільною сіткою, який надає прямий доступ забрудненого повітря до фільтрувального елемента та не містить виступів, якими можна зачепитись в робочому процесі, а сітка забезпечує рівномірне розподілення повітря по фільтрувальному об'єму.

Основною метою даного дослідження було встановити динаміку руху повітряних мас при проходженні коробок фільтрів з урахуванням вхідного та висхідного каналів, що в подальшому допоможе розробити рекомендації для зменшення опору повітряному потоку та більш рівномірному розподілу за об'ємом.



Рисунок 5.19 – Вигляд кришок фільтрувальних коробок до протипилових респіраторів з вхідними отворами жалюзі (а), круглі отвори за всією площею (б); решітка (отвір) по центру кришки (в)

Конструктивні дані кришок фільтрувальних коробок наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Конструктивні дані кришок фільтрувальних коробок

Тип кришки	Загальна площа, см ²	Площа вхідних отворів, см ²	Співвідношення вхідного отвору до загальної площі, %
Жалюзі	60,8	22,0	36
Отвори рівномірні	60,8	43,2	71
Центральний отвір	95,0	28,3	30
Жалюзі	2,7	5,72	3,8
Отвори рівномірні	2,7	5,72	7,54
Центральний отвір	3,5	9,61	2,94

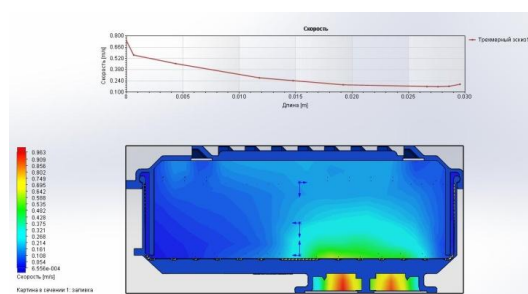
На рис. 5.20 та 5.21 наведені приклади результатів моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках з різною формою отвору на кришці. В таблиці 5.6 та 5.7 наведені розрахункові дані результатів числового моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках протипилового респіратору.

Таблиця 5.6 – Розрахункові дані результатів числового моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках протипилового респіратору зі зміщеним вихідним отвором

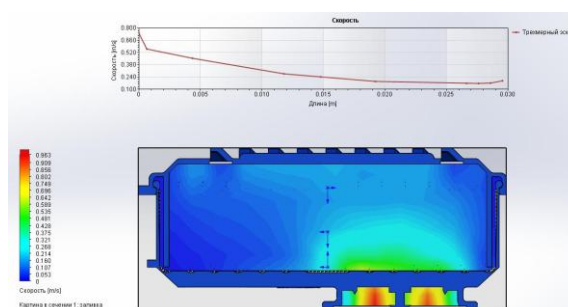
Тип кришки	Коефіцієнт варіації швидкості потоку повітря, %, при об'ємній витраті повітря		Коефіцієнт варіації тиску в середні фільтрувальної коробки, %, при об'ємній витраті повітря	
	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.
Жалюзі	16	11	14	9
Отвори рівномірні	11	7	9	6
Центральний отвір 38 мм (2:1)	25	19	22	17
Центральний отвір 46 мм (3:1)	21	16	19	14
Центральний отвір 54 мм (4:1)	18	14	16	12

Таблиця 5.7 – Розрахункові дані результатів числового моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках протипилового респіратору зі центральним вихідним отвором

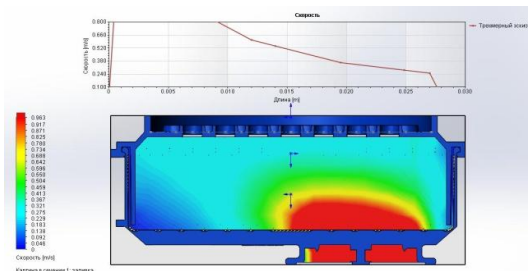
Тип кришки	Коефіцієнт варіації швидкості потоку повітря, %, при об'ємній витраті повітря		Коефіцієнт варіації тиску в середні фільтрувальної коробки, %, при об'ємній витраті повітря	
	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.
Жалюзі	18	12	16	10
Отвори рівномірні	12	8	10	7
Центральний отвір 38 мм (2:1)	27	22	25	19
Центральний отвір 46 мм (3:1)	23	18	20	16
Центральний отвір 54 мм (4:1)	20	15	18	14



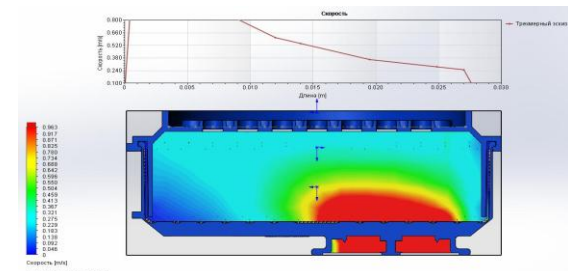
30 дм³/хв. жалюзі



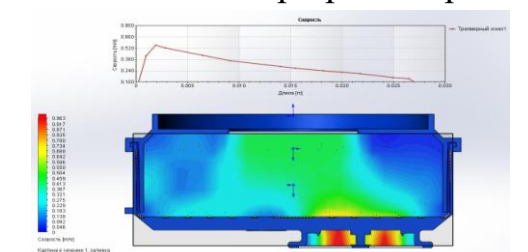
95 дм³/хв. жалюзі



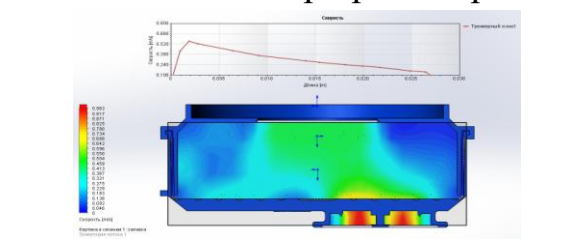
30 дм³/хв. отвори рівномірні



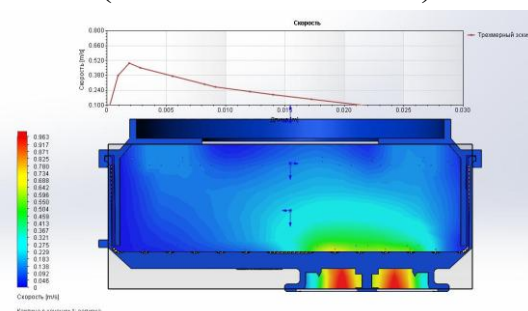
95 дм³/хв. отвори рівномірні



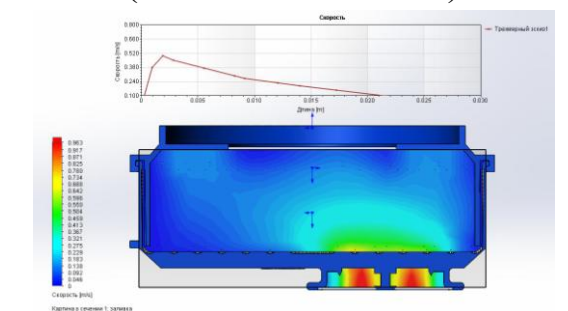
30 дм³/хв. центральний отвір 38 мм
(співвідношення 2:1)



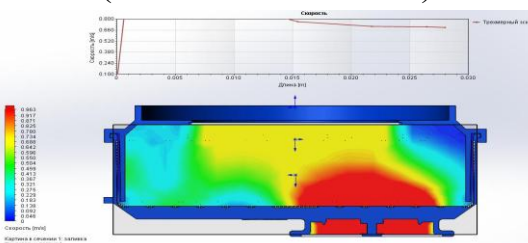
95 дм³/хв. центральний отвір 38 мм
(співвідношення 2:1)



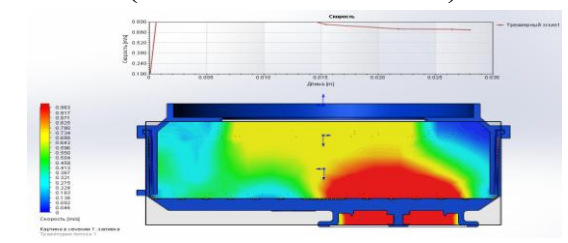
30 дм³/хв. центральний отвір 46 мм
(співвідношення 3:1)



95 дм³/хв. центральний отвір 46 мм
(співвідношення 3:1)

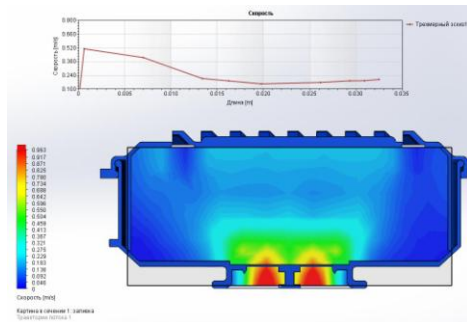


30 дм³/хв. центральний отвір 54 мм
(співвідношення 4:1)

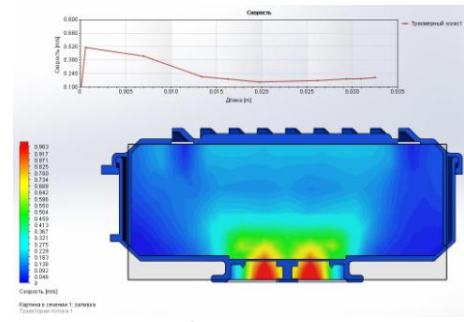


95 дм³/хв. центральний отвір 54 мм
(співвідношення 4:1)

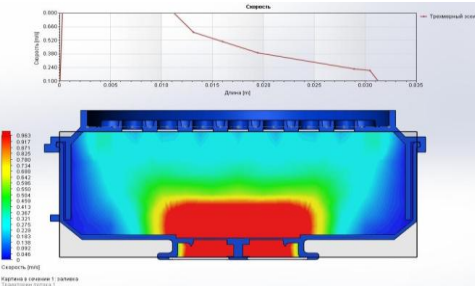
Рисунок 5.20 – Результати моделювання швидкості повітряного потоку
фільтрувальних коробок зі зміщеним вихідним отвором



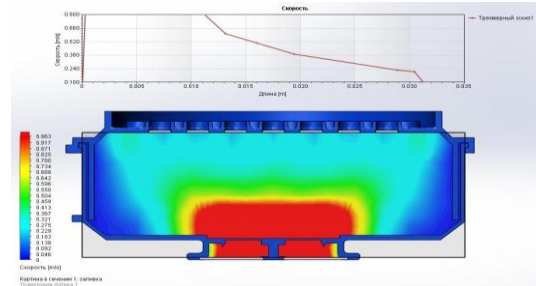
30 дм³/хв. жалюзі



95 дм³/хв. жалюзі



30 дм³/хв. отвори рівномірні



95 дм³/хв. отвори рівномірні

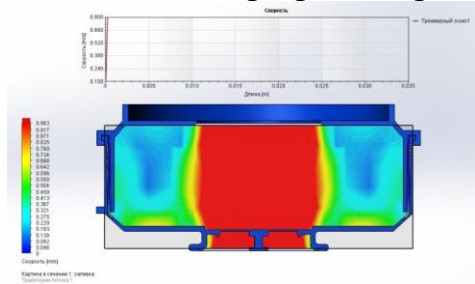
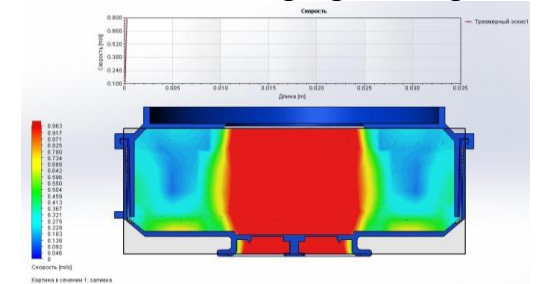
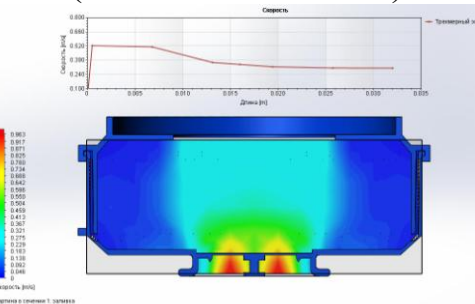
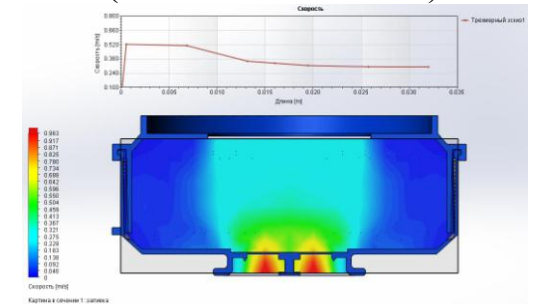
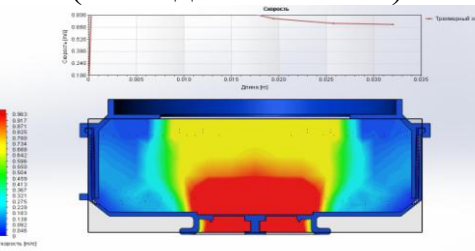
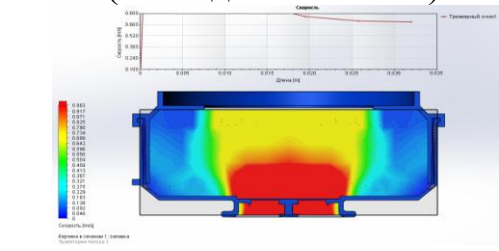
30 дм³/хв. центральний отвір 38 мм
(співвідношення 2:1)95 дм³/хв. центральний отвір 38 мм
(співвідношення 2:1)30 дм³/хв. центральний отвір 46 мм
(співвідношення 3:1)95 дм³/хв. центральний отвір 46 мм
(співвідношення 3:1)30 дм³/хв. центральний отвір 54 мм
(співвідношення 4:1)95 дм³/хв. центральний отвір 54 мм
(співвідношення 4:1)

Рисунок 5.21 – Результати моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках з центральним вихідним отвором

Аналіз отриманих даних показав, що коефіцієнт варіації швидкості на 10 % більший, а коефіцієнт варіації тиску на 15 % у фільтрувальних коробок з центральним вихідним отвором ніж у фільтрувальних коробок зі зміщеним вихідним отвором. Це можна пояснити тим, що у фільтрувальних коробках з центральним отвором повітря швидко затягується через центральний отвір, воно прагне рухатися по найкоротшому шляху від периметру фільтра до центру. Це створює більш виражений «воронкоподібний» потік. Швидкість повітря буде максимальною біля центру отвору і значно меншою на віддалених краях фільтра. Така нерівномірність призводить до більшого діапазону швидкостей і, відповідно, до більшого коефіцієнта варіації. У випадку фільтрувальної коробки зі зміщеним вихідним отвором, загальний розподіл швидкості повітряного потоку по площі перерізу є менш «екстремальним».

Зростання витрати повітря з $30 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ до $95 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ призводить до зменшення коефіцієнта варіації швидкості повітряного потоку до 25 %, тоді як коефіцієнт варіації тиску зменшується до 30 %. Це пояснюється тим, що при невисокій витраті повітря, на швидкість впливає шлях, який пройде повітря від вхідного отвору до вихідного. При цьому, чим далше будуть знаходитись певні ділянки фільтрувальної коробки від вихідного отвору, тим повітря крізь них буде проходити з меншою швидкістю. Це призводить до різниці між мінімальною та максимальною швидкістю, і, відповідно, до високого коефіцієнта варіації.

Найменший коефіцієнт варіації швидкості та тиску спостерігається при однакових розмірах вхідного і вихідного отворів. Це пояснюється тим, що потік повітря зазнає найменших змін у своїй динаміці. Немає різкого звуження або розширення, що могло б призвести до формування зон підвищеної чи зниженої швидкості, турбулентності, вихрових потоків або "мертвих зон". Разом з тим, в такому випадку до частини площі перерізу фільтрувальної коробки повітряний потік не потрапляє. Це призведе, до виключення з процесу фільтрування деякої площі фільтра, що зменшить час

його захисної дії, тому виникає потреба у пошуку такого відношення між вхідним і вихідним отвором, який дозволить забезпечити мінімальний коефіцієнт варіації швидкості при максимальному розподілу повітряного потоку по всій площі перерізу фільтрувальної коробки. Проведене дослідження показує, що таке відношення вхідного до вихідного отвору повинно бути в межах 3:1. Менше значення відношення не забезпечить достатнього проходження повітряного потоку в корпус фільтра, через що збільшиться опір повітряного потоку та утворюються зони з низькою швидкістю фільтрації. Перевищення цього значення зменшить опір повітряного потоку, але з'являється чітка лінія руху повітря через центр корпусу фільтрувальної коробки. Цікаво, у фільтрувальних коробках з центральним вихідним отвором і зміщеним при застосуванні кришки із жалюзі різниця між коефіцієнтами варіації швидкості повітряного потоку мінімальна.

Отримані результати моделювання наштовхнули на необхідність визначити вплив геометрії вхідного отвору, на коефіцієнт варіації швидкості повітряного потоку. Був розглянутий розподіл повітряного потоку у середній фільтрувальної коробки з кришками в яких вхідні отвори були виготовлені у вигляді еліпсу чи квадрату, площа яких відповідала площі вихідного отвору. На рис. 5.22 та 5.23 наведені результати моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках з еліптичною та квадратною формою отворів на кришці. Розміри площі вхідних отворів нестандартної форми є ідентичними до площі відповідного центрального круглого вхідного отвору, які наведені в табл. 5.6 та 5.7. Результати проведеного моделювання швидкості повітряного потоку наведені в таблиці 5.8 та 5.9 наведені розрахункові дані результатів числового моделювання у фільтрувальних коробках протипилового респіратору.

Таблиця 5.8 – Розрахункові дані результатів числового моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках протипилового респіратору зі зміщеним вихідним отвором

Тип кришки	Коефіцієнт варіації швидкості потоку повітря, %, при об'ємній витраті повітря		Коефіцієнт варіації тиску в середні фільтрувальної коробки, %, при об'ємній витраті повітря	
	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.
Центральний отвір еліпс (2:1)	38	40	32	35
Центральний отвір еліпс (3:1)	55	57	48	52
Центральний отвір еліпс (4:1)	35	37	30	33
Центральний отвір квадрат (2:1)	58	60	50	53
Центральний отвір квадрат (3:1)	42	45	35	38
Центральний отвір квадрат (4:1)	48	50	42	44

Таблиця 5.9 – Розрахункові дані результатів числового моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках протипилового респіратору зі центральним вихідним отвором

Тип кришки	Коефіцієнт варіації швидкості потоку повітря, %, при об'ємній витраті повітря		Коефіцієнт варіації тиску в середні фільтрувальної коробки, %, при об'ємній витраті повітря	
	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.	30 дм ³ /хв.	95 дм ³ /хв.
Центральний отвір еліпс (2:1)	45	52	32	37
Центральний отвір еліпс (3:1)	35	40	24	28
Центральний отвір еліпс (4:1)	50	57	36	42
Центральний отвір квадрат (2:1)	42	48	30	36
Центральний отвір квадрат (3:1)	48	55	35	41
Центральний отвір квадрат (4:1)	40	45	28	33

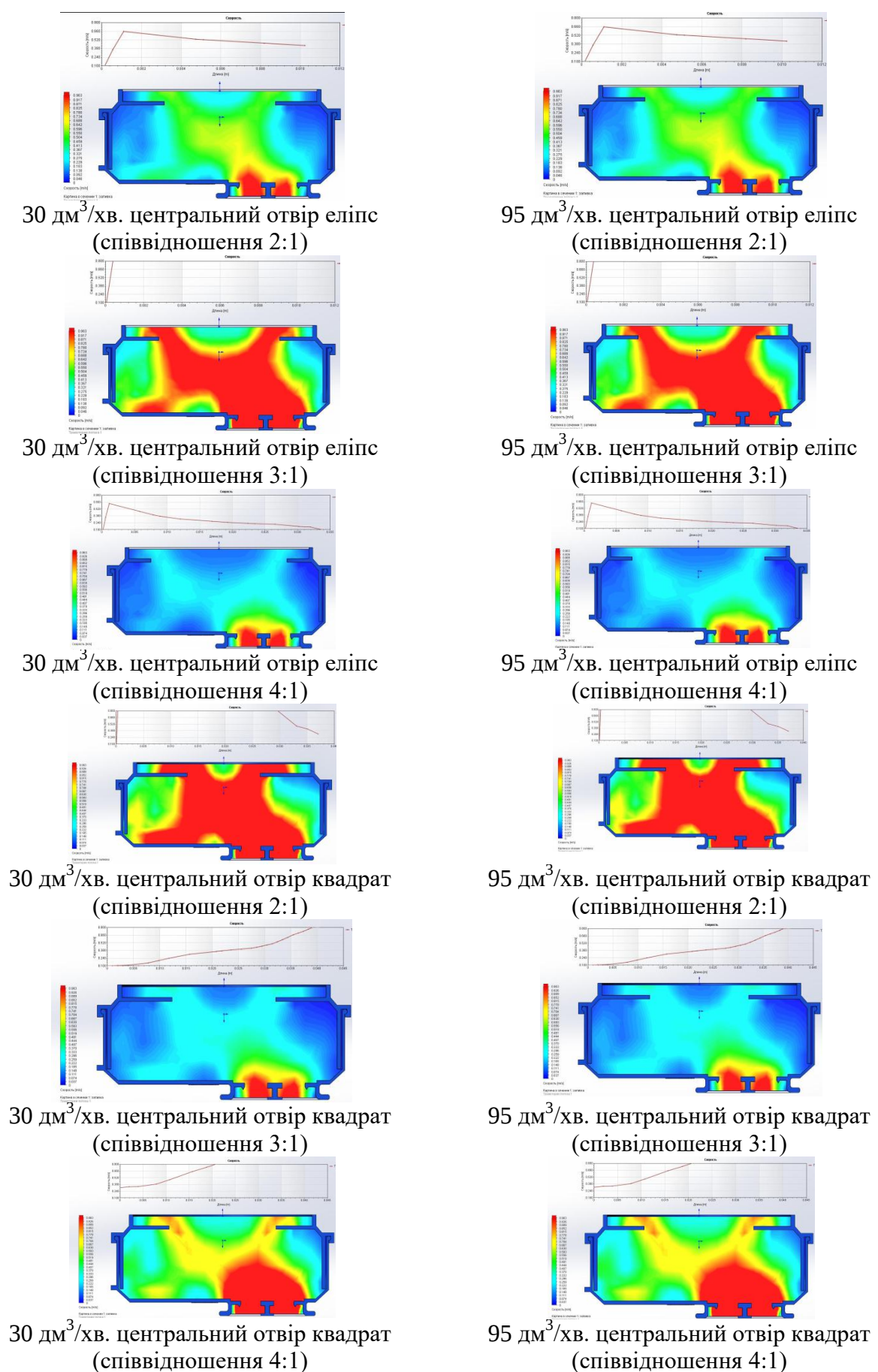


Рисунок 5.22 – Результати моделювання швидкості повітряного потоку

фільтрувальних коробок зі зміщеним вихідним отвором

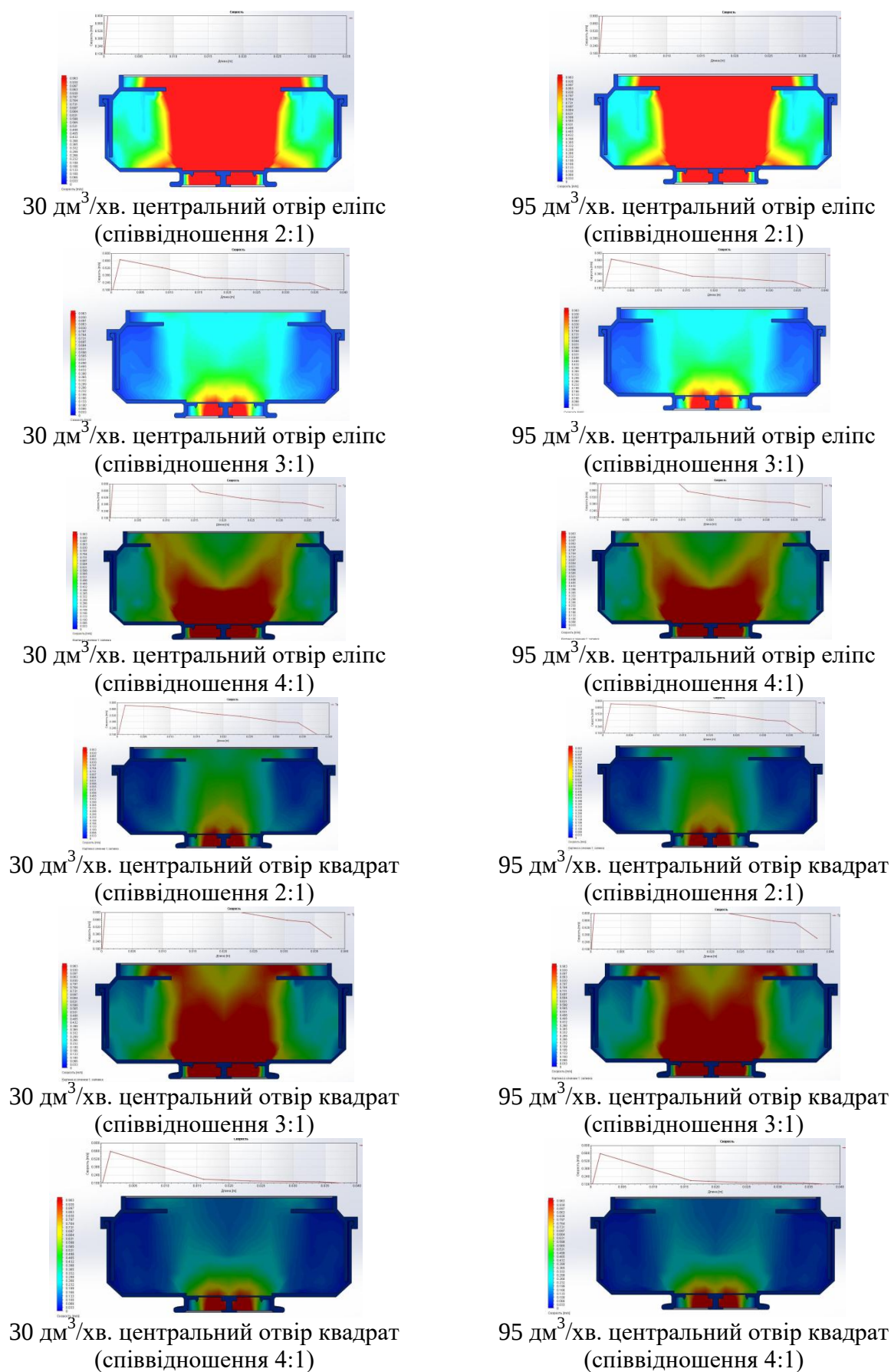


Рисунок 5.23 – Результати моделювання швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках з центральним вихідним отвором

Отримані результати показують, що при еліпсоїдних і квадратних формах вхідного отвору коефіцієнт варіації швидкості у фільтрувальних коробках збільшується від 30 % до 50 % ніж при круглих вхідних отворах. Це пояснюється тим, що у круглому вхідному отворі потік повітря, що надходить до фільтрувальної коробки, має симетричний і рівномірний розподіл тиску навколо центру.

Кожна точка на периферії вхідного отвору приблизно однаково віддалена від центру, що сприяє рівномірному «розтіканню» повітря по площі отвору. Це мінімізує різницю в довжині шляху, який долає повітря до вихідного отвору. Еліпсоїдна чи квадратна форма вихідного отвору створює більш складну геометрію для формування повітряного потоку.

На «гострих» або більш вигнутих ділянках еліпса чи квадрата (ближче до кінців великої осі), можуть виникати зони зі значним прискоренням або, навпаки, застоєм повітря. Це може призводити до сепарації потоку або утворення великих вихорів, які порушують рівномірність розподілу швидкості всередині фільтра. Цікаво, що у еліпсоїдній формі вхідного отвору коефіцієнт варіації швидкості збільшується зі зростанням витрати повітря, а при круглій навпаки – зменшується. Це пояснюється тим, що при низьких витратах повітря потік через еліпсоїдний отвір може бути відносно ламінарним або мати контрольовані вихори. Однак, коли витрата повітря зростає, швидкість потоку також зростає.

Еліпсоїдна форма та, в більшій мірі, квадратна форма стає місцем, де потік повітря схильний до відриву або формування сильних турбулентних вихорів. Чим вища швидкість через більшу витрату повітря, тим інтенсивнішими стають ці явища.

Вплив конструкції кришки фільтра на ергономічні показники є суттєвим, що продемонстровано результатами чисельного моделювання. Форма та площа вхідного отвору впливає на опір диханню, швидкість руху та розподіл повітряного потоку в середині фільтрувальної коробки. Рациональною, з точки зору аеродинаміки є кругла форма отвору. Вона

забезпечує найменший опір потоку повітря серед усіх форм з однаковою площею поперечного перерізу, створює рівномірний розподіл швидкості та сприяє ламінарному (спокійному) руху повітря, що особливо важливо для комфортного дихання [27].

Еліптичні отвори також можуть бути ефективними, особливо в умовах обмеженого простору, оскільки дозволяють збільшити площу входу при зменшенні висоти конструкції. Проте при невдалому розташуванні відносно напрямку потоку опір у них може бути дещо вищим, ніж у круглих [28]. Прямокутні або щілинні форми отворів, хоча й зручні для компактної інженерії, зазвичай мають вищий опір [29]. Це пов'язано з тим, що на їхніх краях часто виникає турбулентність, яка створює нерівномірний розподіл повітря та підвищує навантаження на окремі ділянки фільтрувального матеріалу.

З фізичної точки зору, ламінарність потоку та мінімальний опір забезпечуються при плавних, симетричних формах входу. Це підтверджується законами гідродинаміки, зокрема рівняннями Бернуллі та Нав'є-Стокса. Гострі краї отворів спричиняють високі градієнти швидкості й турбулентність через непропорційне збільшення в'язкої компоненти. Крім того підвищення швидкості або динамічного тиску призводить збільшення втрат через турбулентність повітряних потоків [30, 31]. Коефіцієнт місцевих втрат тиску (ζ) також вказує на перевагу круглих та плавних форм: для заокругленого круглого входу ζ може становити лише 0.04–0.1, тоді як для прямокутного з гострими краями – до 0.5–1.0 [32, 33].

В результаті моделювання було встановлено, що центральне розміщення вихідного отвору у фільтрувальній коробці дозволяє забезпечити кращу рівномірність потоку та зниження перепадів тиску у порівнянні з фільтрувальними коробками зі зміщеним вихідним отвором. Схожі результати були отримані у роботі [34], де автор показав, що респіраторів з фільтрами, які розміщені у коробках з симетричними отворами вищий термін захисної дії ніж у фільтрах з прямокутними коробками з

несеміричними вхідним і вихідним отворами. Також існують дослідження, які демонструють наявність мертвих зон у фільтрувальних коробках, які виникають через нерівномірність повітряних потоків, які виникають через несиметричність конфігурації фільтрувальних коробок [35, 36].

Отже, дане дослідження, а також проаналізовані показують, що конструктивні елементи фільтрувальної коробки, зокрема зовнішньої кришки, яка може бути виконана у вигляді жалюзі чи розсіювальні отвори однакового чи різного діаметру, дозволяють забезпечити рівномірну швидкість фільтрувального потоку в середні, що сприяє рівномірному відпрацюванню фільтра.

5.4 Розробка системи контролю за часом захисної дії фільтрів

Високий рівень захисту користувачів ЗІЗОД під час їх експлуатації забезпечується через постійний контроль за кількома ключовими аспектами:

1. Зміна ефективності фільтра. Важливо відстежувати, як змінюється ефективність фільтра під час використання. Це дозволяє точно визначити момент, коли фільтр вичерпав свій ресурс і потребує заміни [37].

2. Щільність прилягання лицевої частини. Необхідно контролювати, наскільки щільно лицеві частини фільтрувальних респіраторів прилягають до обличчя користувача. Це допомагає виявити утворення щілин, які можуть виникнути через сповзання лицевої частини або ослаблення натягу стрічок наголів'я [38, 39].

3. Своєчасне та постійне застосування респіратора. Регулярне та безперервне використання фільтрувального респіратора дає змогу визначити час ефективного захисту користувача. Ця інформація необхідна для розрахунку експозиційної дози шкідливої речовини, що потрапила до легень, наприклад, для оцінки пилового навантаження [40].

Ці вимоги щодо контролю за ефективністю експлуатації ЗІЗОД, як правило, вирішуються шляхом додавання до їх конструкції різноманітних індикаторів, які надають дані в реальному часі.

Останнім часом з'явилися конструкції протипилових фільтрів, які оснащені приладами контролю перепаду тиску [42]. Це нововведення дозволяє визначити термін захисної дії фільтра в міру накопичення пилового осаду на його поверхні (рис. 5.24).

Принцип роботи полягає у встановленні граничної величини опору повітряному потоку, яка є комфортною для користувача. Тобто, коли перепад тиску досягає певного граничного значення, що не викликає значних додаткових фізичних зусиль користувачем під час дихання, це слугує сигналом про необхідність заміни фільтра. Такий підхід забезпечує не лише ефективний захист, а й комфортну експлуатацію для людини.

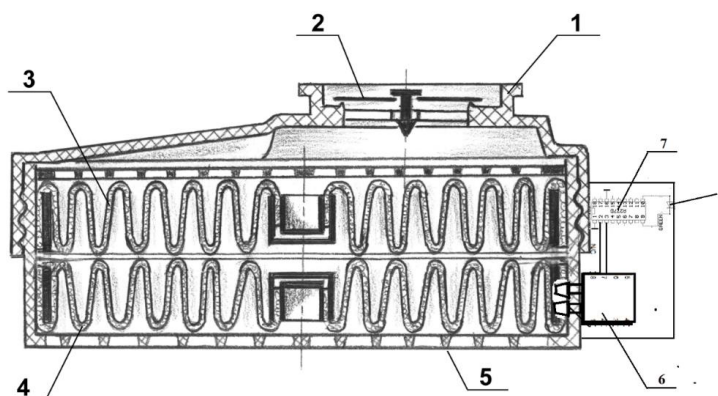


Рисунок 5.24. – Схема протипилового фільтра з датчиком тиску для визначення терміну захисної дії через встановлення граничної величини опору повітряному потоку: 1 – захисний екран, 2 – корпус, 3 – форфільтр, 4 – перегородка, 5 – абсолютний фільтр, 6 – кільцева прокладка, 7 – блок вимірювання тиску, 8 – датчик тиску, 9 – блок управління, 10 – індикатору тиску [41]

Датчик тиску, що використовується в системі, має два входи: один підключений до підмаскового простору, а інший — до атмосферного повітря.

Вихід цього датчика з'єднаний з входом блоку управління та обробки інформації, який, у свою чергу, передає дані до блоку сигналізації.

У блоці управління та обробки інформації містяться дані про мінімально та максимально можливий початковий опір дихання фільтрів респіратору.

Якщо система фіксує менше значення перепаду тиску, ніж мінімальне, це свідчить про ймовірне неправильне одягання респіратору або його сповзання, що призвело до підсмоктування повітря за смугою обтюрації. У такій ситуації необхідні відповідні коригувальні дії.

При перевищенні граничного опору диханню фільтрами під час експлуатації респіратору також буде подано сигнал про необхідність заміни фільтрів.

Дана система забезпечує постійний контроль за коректністю використання респіратору та своєчасне інформування користувача про необхідність заміни фільтрів для підтримання належного рівня захисту.

Удосконалення конструкції багаторазової змінної фільтрувальної коробки для респіраторів досягається шляхом інтеграції додаткових конструктивних елементів. Це дозволяє здійснювати оперативний контроль за часом захисної дії фільтра та забезпечувати своєчасну його заміну, а також прогнозувати необхідну кількість фільтрів залежно від умов експлуатації. Зазначена оптимізація реалізується завдяки встановленню важільної системи та інтегрованого блоку контролю й обробки інформації, призначеного для визначення залишкового часу захисної дії протиаерозольних фільтрів.

Для контролю терміну захисної дії фільтра на внутрішній стінці фільтрувальної коробки додано кільцевий фіксатор з важільною системою. Дана важільна система включає рухому нижню перегородку, яка через жорстко зафіксовану шарнірну опору з'єднана з важелем. Важіль контактує з інтегрованим блоком контролю й обробки інформації. Останній розташований на зовнішньому боці фільтрувальної коробки та складається з мікроконтролера, пристрою зберігання/запису даних, тонкоплівкового

резистивного датчика тиску (ТРДТ), опорної консолі, елементів живлення та дисплея (рис. 5.25).



Рисунок 5.25 – Загальний вигляд фільтрувальної коробки з фільтром та важільною системою для виміру опору дихання ТРДТ

Розроблена конструкція фільтру схематично представлена на рисунку 5.26.

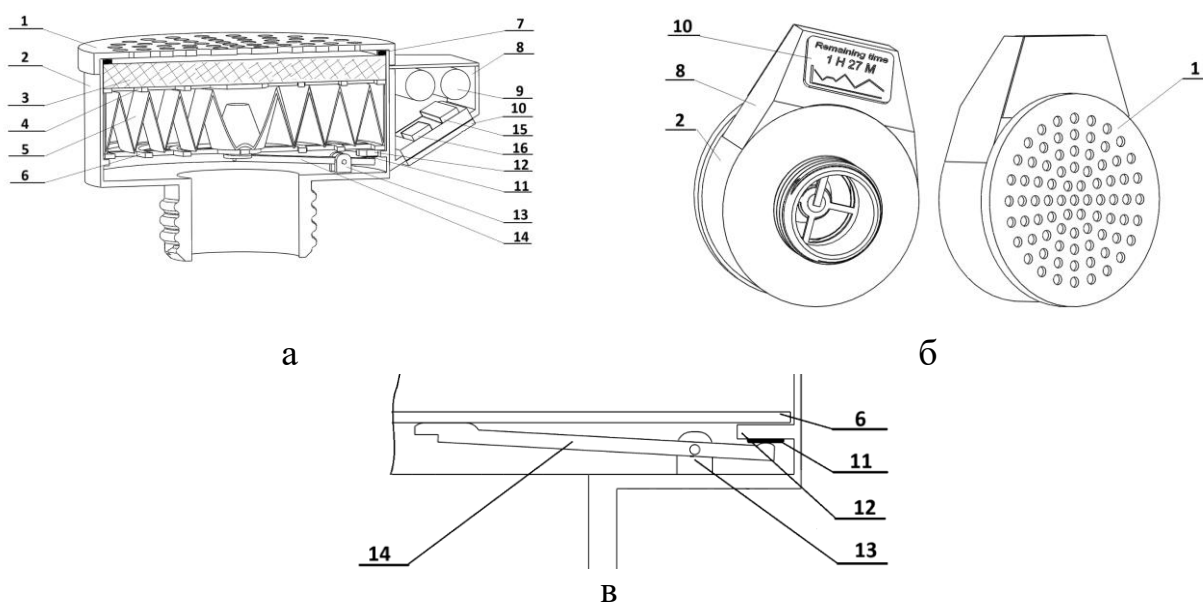


Рисунок 5.26 – Схема конструкції фільтрувальної коробки з фільтром (а, б) та важільною системою (в): 1 – захисний екран, 2 – корпус коробки фільтра, 3 – форфільтр, 4 – фіксує верхня перегородка, 5 – складчастий протиаерозольний фільтр, 6 – рухома нижня перегородка, 7 – кільцева прокладка, 8 – інтегрований блок контролю та обробки інформації, 9 – елементи живлення, 10 – дисплей, 11 – тонкоплівковий резистивний датчик тиску (ТРДТ), 12 – опорна консоль, 13 – шарнірна опора, 14 – важіль, 15 – мікроконтролер, 16 – пристрій зберігання/запису даних

Запропонована багаторазова змінна фільтрувальна коробка для респіраторів працює наступним чином. Перед початком експлуатації здійснюється активація живлення шляхом дотику користувача до дисплею. Після подачі живлення на дисплеї негайно відображається інформація щодо поточного перепаду тиску на форфільтрі та основному фільтрі.

Далі, при під'єднанні фільтрувальної коробки до лицевої частини респіратора, розпочинається контроль процесу дихання. Під час вдиху, забруднене повітря надходить крізь захисний екран, який герметично закріплений на корпусі фільтрувальної коробки за допомогою кільцевої прокладки. Забруднений потік повітря спочатку проходить через форфільтр, розташований у корпусі фільтрувальної коробки, де відбувається його очищення від крупнодисперсних частинок пилу. Потім повітря прямує крізь фіксуючу верхню перегородку, яка забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку по всій площі фільтра, де здійснюється очищення повітря від дрібнодисперсного пилу.

Накопичення пилового осаду на форфільтрі та основному фільтрі призводить до збільшення перепаду тиску. Цей тиск пропорційно змінює навантаження від веденого плеча важеля на шарнірній опорі на ТРДТ, що розміщений на опорній консолі. Фактично, зміна положення рухомої нижньої перегородки перетворюється на електричний сигнал від ТРДТ. Цей сигнал надходить до інтегрованого блоку контролю та обробки інформації, де він обробляється мікроконтролером. Після відповідних розрахунків інформація про перепад тиску на фільтрі та залишковий час захисної дії виводиться на дисплей, а дані реєструються на пристрої зберігання/запису. Після цього цикл операцій повторюється.

Для визначення залежності зміни опору ТРДТ від величини перепаду тиску на фільтрах використовувався лабораторний диференційний манометр Testo 512-1 (Testo AG, Німеччина). Цей прилад має діапазон вимірювання ± 200 гПа та точність 0,1 Па в діапазоні до ± 25 гПа.

Зміна витрати повітря, що проходить крізь фільтри та впливає на перепад тиску, досягалася шляхом регулювання швидкості обертання крильчатки вентилятора. Це відбувалося за рахунок зміни значень ширини імпульсів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які подавалися на електронний контролер швидкості.

На першому етапі для калібрування обладнання використовувався стенд, схема якого представлена на рисунку 5.27. Зміна витрати повітря що проходить крізь фільтри та впливає на перепад тиску на цих фільтрах, виконувалась за рахунок зміни швидкості обертання крилатки вентилятора через значення ширини імпульсів ШІМ, які подаються на електронний контролер швидкості.

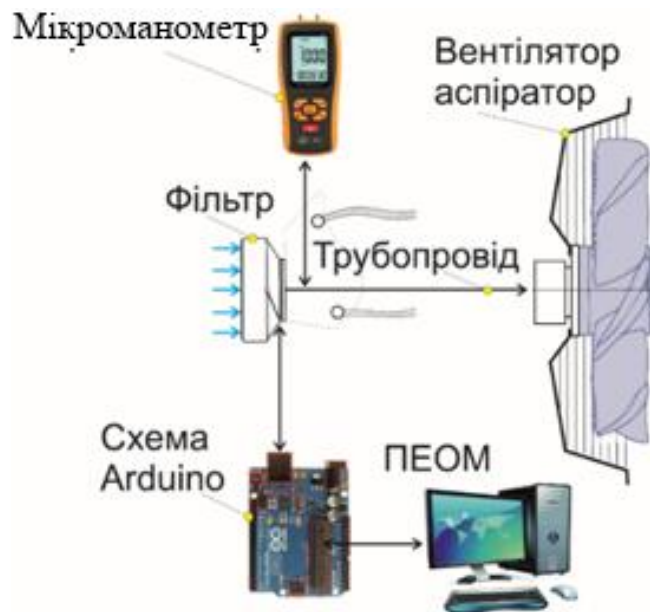


Рисунок 5.27 – Схема стенду для калібрування датчика вимірювання опору повітряному потоку фільтра

На другому етапі до експериментального зразка фільтрувальної коробки з фільтром й важільною системою приєднувався електронний диференційний манометром Testo 512-1 та встановлювалась постійна витрата повітря через фільтр (рис. 5.28). Постійна витрата повітря регулювалась в діапазоні від $15 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ до $140 \text{ дм}^3/\text{хв.}$ Даний етап проводився з метою верифікації запропонованої конструкції датчика. Тестування проводилось в

акредитованій випробувальній лабораторії, тому використовуване обладнання було відкаліброваним та мало відповідні сертифікати щодо достовірності отримуваних даних.

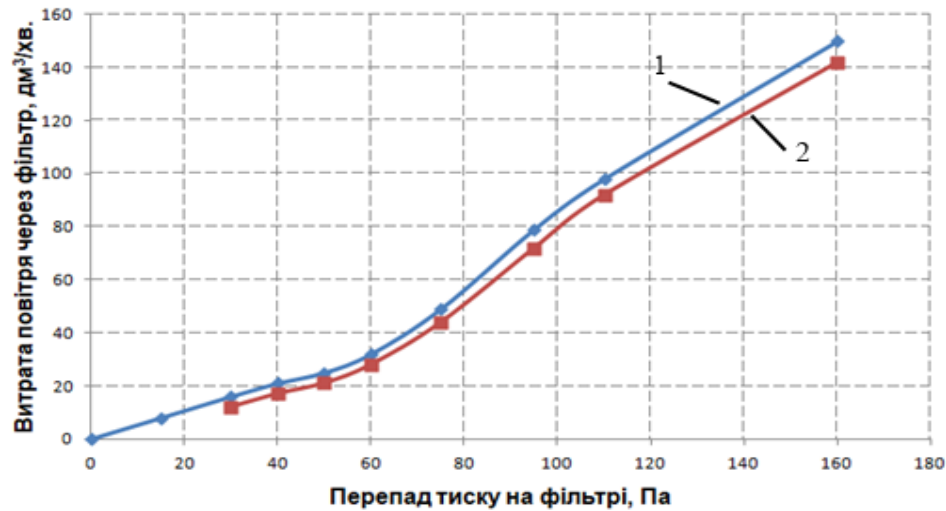


Рисунок 5.28 – Залежності величини перепаду тиску від витрати повітря через фільтр: 1 – дані отримані з дифманометра Testo 512-1, 2 – дані з датчика ТРДТ

Обробка даних щодо зміни перепаду тиску на фільтрах здійснювалась мікроконтролером з урахуванням поточного циклу вдих/видих, забезпечуючи моніторинг рівня запиленості як форфільтра, так і основного фільтра. Збільшення маси осілого пилу призводить до зростання перепаду тиску, що фіксується зміною електричного опору ТРДТ. Дані зміни перепаду тиску, отримані з ТРДТ протягом циклів вдиху/видиху, усереднюються. На основі цього усередненого значення даних з ТРДТ застосовується модель лінійної регресії для подальшого аналізу. Основною метою представленого дослідження є визначення оптимальної кількості фільтрів, необхідних для забезпечення ефективного захисту користувачів в умовах високої запиленості з урахуванням специфіки експлуатаційного режиму. Цей результат досягається шляхом імплементації алгоритму розрахунку часу заміни фільтрів, що ґрунтується на даних моніторингу в реальному часі змін перепаду тиску, які виникають внаслідок накопичення пилу на поверхні фільтра.

Реалізація цієї мети передбачає кілька ключових аспектів:

1. Ідентифікація критичного рівня забруднення фільтра здійснюється шляхом фіксації зміни механічного положення важільної системи, що кінематично пов'язана з рухомою перегородкою.
2. Обробка даних про тиск на ТРДТ виконується за допомогою алгоритму лінійної регресії, який враховує цикли дихання, що суттєво підвищує точність прогнозування залишкового ресурсу фільтра.
3. Відображення інформації про залишковий ресурс багаторазової змінної фільтрувальної коробки на дисплеї, а також її збереження для подальшого аналізу та уточнення моделі.
4. Оптимізація експлуатаційних витрат досягається за рахунок своєчасної заміни як основного фільтра, так і форфільтра, а також раціонального планування їх необхідної кількості.

Представлена технологічне рішення забезпечує непрямий контроль маси пилу, що осів на фільтрі, за допомогою механіко-електронної взаємодії. Це дозволяє точно визначити оптимальний час для заміни фільтра у фільтрувальній коробці респіраторів, усуваючи необхідність у прямому зважуванні накопичених забруднень.

Результати обчислень, що відображаються на дисплеї у форматі залишкового часу до необхідної заміни фільтра, зберігаються у внутрішній пам'яті пристрою. Це надає користувачам чіткі та зрозумілі дані для ефективного планування робочих процесів, тоді як організації отримують статистичні відомості, необхідні для точного розрахунку потреби у фільтрах [43]. Такий підхід не тільки зменшує експлуатаційні витрати, але й запобігає несподіваним відмовам фільтрів під час їх використання. Завдяки автоматизованому контролю мінімізується вплив людського фактора, а прогнозування, що ґрунтується на накопичених даних, значно підвищує загальну надійність системи захисту [44]. Зазначена технологія набуває особливої актуальності у галузях з високим рівнем запиленості, таких як гірничодобувна, металургійна та будівельна промисловість, де створення

безпечних умов праці та користування якісними ЗІЗОД є критично важливим аспектом безпеки праці [45].

Висновки до розділу 5

1. Встановлено, що існуючі конструкції фільтрувальних коробок впливають на перепад тиску респіратора через невикористання значної поверхні фільтрів (утворення мертвих зон, у яких повітря не рухається) і тим самим збільшують опір диханню. Конструкції фільтрувальних коробок до сучасних респіраторів потребують відповідного доопрацювання з метою зменшення опору диханню, збільшення строку захисної дії та пиломісткості за рахунок рівномірного обтікання поверхні фільтра повітряним потоком за всією площею. Перспективою подальших досліджень є пошук конструктивних рішень фільтрувальних коробок респіраторів, які забезпечать роботу всієї поверхні фільтра, що збільшить строк захисної дії респіратора та зменшить його початковий опір диханню.

2. Визначено залежність зміни перепаду тиску на складчастому фільтрі від площі фільтрації, ширини складчастого каналу та висоти фільтра, що дозволило встановити коефіцієнт конфігурації фільтрів при якому фіксуються мінімальний опір повітряному потоку. Для прямокутних фільтрів, які виготовлені з поліпропіленового матеріалу з щільністю упаковки волокон 50 г/м^2 , товщиною фільтрувального шару 0,6 мм з висотою складки 10 мм раціональна відстань між складками знаходиться у діапазоні 3-4 мм, тобто 2,5-3,3 складки/см.

3. Запропоновано алгоритм з розрахунку коефіцієнту конфігурації для фільтрувальних матеріалів з різною щільністю упаковки волокон, який складається з визначення початкового перепаду тиску на фільтрі пласкої форми, розрахунку площі фільтра з визначеною відстанню між складками (W_ϕ) і їх висотою, з метою потрапляння площі фільтрації, розрахунку

коефіцієнта конфігурації та порівняння його з визначеним раціональним значенням.

4. Встановлено, що найкращим рішенням для зменшення опору повітряного потоку у фільтрувальній коробці протипилового респіратору є застосування кришок з круглою формою вхідного отвору з плавними краями та гладкою внутрішньою поверхнею, що забезпечує рівномірний повітряний потік.

5. Визначено, що коефіцієнт варіації швидкості на 10 % більший, а коефіцієнт варіації тиску на 15 % у фільтрувальних коробках з центральним вихідним отвором ніж у фільтрувальних коробках зі зміщеним вихідним отвором, що пояснюється тим, що у фільтрувальних коробках з центральним отвором повітря швидко затягується через центральний отвір, воно прагне рухатися по найкоротшому шляху від периметру фільтра до центру.

6. Встановлено, що зростання витрати повітря з 30 дм³/хв. до 95 дм³/хв. призводить до зменшення коефіцієнта варіації швидкості повітряного потоку до 25 %, тоді як коефіцієнт варіації тиску зменшується до 30 %, що пояснюється тим, що при невисокій витраті повітря, на швидкість впливає шлях, який пройде повітря від вхідного отвору до вихідного.

7. Встановлено, що при еліпсоїдних і квадратних формах вхідного отвору фільтрувальних коробок, коефіцієнт варіації швидкості збільшується від 30 % до 50 % ніж при круглих вхідних отворах, що пояснюється тим, що у круглому вхідному отворі потік повітря, що надходить до фільтрувальної коробки, має симетричний і рівномірний розподіл тиску навколо центру.

8. Доведено, що конструктивні елементи фільтрувальної коробки, зокрема зовнішня кришка дозволяють забезпечити рівномірний розподіл швидкості повітряного потоку в середній фільтрувальній коробці, що сприяє ефективному використанню всієї фільтрувальної поверхні фільтра.

9. Встановлено взаємозв'язок між зміною перепаду тиску фільтрів респіратору і залишковим часом захисної дії, який визначається за допомогою алгоритму лінійної регресії для розрахунку критичної величини

перепаду тиску шляхом введення додаткових конструктивних елементів задля оперативного контролю часу захисної дії та подальшої вчасної заміни фільтра з прогнозуванням необхідної їх кількості, виходячи з умов експлуатації за рахунок встановлення важільної системи та інтегрованого блоку контролю та обробки інформації для визначення залишкового часу захисної дії протиаерозольних фільтрів.

10. Запропоновано підхід для визначення критичного рівня забруднення фільтра через зміну механічного положення важільної системи, пов'язаної з рухомою перегородкою, яка дозволяє на основі збору даних про тиск за допомогою алгоритму лінійної регресії з урахуванням циклів дихання підвищити точність прогнозу часу захисної дії.

11. Запропоновано рішення для визначення необхідної кількості фільтрів, щоб забезпечити захист користувача в умовах високої запиленості з урахуванням режиму експлуатації використовувати алгоритм з розрахунку часу заміни фільтрів, який базується на даних моніторингу в реальному часі шляхом моніторингу зміни перепаду тиску через накопичення пилу на поверхні фільтра.

Результати досліджень представлені в даному розділі опубліковані в [1], [37-40], [42].

Література до розділу 5

1. Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності конструкцій фільтрувальних коробок. Наукові вісті НТУ «Київський політехнічний інститут». 2017. № 2. С. 114–118. URL: <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551> (дата звернення: 15.10.2025).
2. ДСТУ EN 13274-3:2005 Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 3. Визначення опору диханню (EN 13274-3:2001, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 10 с.

3. Davies C. N. The separation of airborne dust and mist particles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1952. Vol. 1, No. 185.
4. Happel J. Viscous flow to arrays of cylinders. *AIChE Journal*. 1959. Vol. 5. P. 175–181.
5. Kuwabara S. The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in viscous flow at small Reynolds numbers. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1959. Vol. 14. P. 527–532.
6. Fuchs N. A., Stechkina I. B. A note on the theory of fibrous filters. *The Annals of Occupational Hygiene*. 1963. Vol. 6. P. 27–30.
7. Sedlář M., Krátký T., Langer J. Numerical and Experimental Investigation of Three-Dimensional Flow in Combined Protective Canister Filters. *Fluids*. 2022. Vol. 7, No. 5. Article 171. URL: <https://doi.org/10.3390/fluids7050171> (дата звернення: 15.10.2025).
8. Théron F., Joubert A., Le Coq L. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter. *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 182. P. 69–77. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.034> (дата звернення: 15.10.2025).
9. Raber R. R. Pressure drop optimization and dust capacity estimation for a deep-pleated industrial air filter using small sample data. *Proceedings of the 3rd World Filtration Congress*. 1982. P. 52.
10. Yu H. H. S., Goulding C. H. Optimized ultra high efficiency filter for high efficiency industrial combustion turbines. *Proceedings of the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. Cologne, Germany. ASME, 1992.
11. Chen D.-R., Pui D. Y. H., Liu B. Y. H. Optimization of Pleated Filter Designs Using a Finite-Element Numerical Model. *Aerosol Science and Technology*. 1995. Vol. 23, No. 4. P. 579–590. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786829508965339> (дата звернення: 15.10.2025).

12. Caesar T., Schroth T. The influence of pleat geometry on the pressure drop in deep-pleated cassette filters. *Filtration & Separation*. 2002. Vol. 39, No. 9. P. 48–54. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(02\)80247-6](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(02)80247-6) (дата звернення: 15.10.2025).
13. Kim J. S., Lee M.-H. Measurement of effective filtration area of pleated bag filter for pulse-jet cleaning. *Powder Technology*. 2019. Vol. 343. P. 662–670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.080> (дата звернення: 15.10.2025).
14. Li S., Hu S., Xie B., Jin H., Xin J., Wang F., та ін. Influence of pleat geometry on the filtration and cleaning characteristics of filter media. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 210. P. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.002> (дата звернення: 15.10.2025).
15. Tanabe E. H., Barros P. M., Rodrigues K. B., Aguiar M. L. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. *Separation and Purification Technology*. 2011. Vol. 80, No. 2. P. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.031> (дата звернення: 15.10.2025).
16. Rosti M. E., Pramanik S., Brandt L., Mitra D. The breakdown of Darcy's law in a soft porous material. *Soft Matter*. 2020. Vol. 16, No. 4. P. 936–944. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9SM01678C> (дата звернення: 15.10.2025).
17. Li L., Yin J., Sun T., Chen J., Fu S., Zhou Y., Sun Z. Optimization design of pleated filter structure based on a simple theoretical model. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 360, No. 2. P. 131067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131067> (дата звернення: 15.10.2025).
18. Fabbro L. D., Brun P., Laborde J. C., Lacan J., Renoux A., Ricciardi L. Contribution to the modelling of industrial pleated filters by solid particles. *American Journal of Environmental Science*. 2012. Vol. 8, No. 4. P. 385–395 (дата звернення: 15.10.2025).
19. Fong D., Sanaei P. Optimization of pleated filters. *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36, No. 9. Article 093352. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0227372> (дата звернення: 15.10.2025).

20. Teng G., Shi G., Zhu J., Qi J. A numerical simulation method for pressure drop and normal air velocity of pleated filters during dust loading. *PLoS One*. 2023. Vol. 18, No. 2. P. e0282026. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282026> (дата звернення: 15.10.2025).
21. Chen C.-W., Huang S.-H., Chiang C.-M., Hsiao T.-C., Chen Ch.-Ch. Filter quality of pleated filter cartridges. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2008. Vol. 52, No. 3. P. 207–212. DOI: <https://doi.org/10.1093/annhyg/men008> (дата звернення: 15.10.2025).
22. Persaud D., Smirnov M., Fong D., Sanaei P. Modeling of the Effects of Pleat Packing Density and Cartridge Geometry on the Performance of Pleated Membrane Filters. *Fluids*. 2021. Vol. 6, No. 6. P. 209. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids6060209> (дата звернення: 15.10.2025).
23. Liu X., Zhang X., Liu S., Liu J., Chen Q. Optimization of multi-V filter design for airliner environmental control system using an empirical model. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 257. P. 117966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117966> (дата звернення: 15.10.2025).
24. Shukla A. K., Kumar A., Kumar R., та ін. Investigation of pleated air filters: effects of various shapes and design parameters on flow patterns and pressure drop. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2024. Vol. 18. P. 5057–5075. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01523-1> (дата звернення: 15.10.2025).
25. Li L., Zhou Y., Wang Zh., Gu H., Sun Zh., Li Y., Ma S. Research on the filtration performance of pleated filters with rectangular and triangular structures through developed CFD code. *Progress in Nuclear Energy*. 2022. Vol. 153. P. 104413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104413> (дата звернення: 15.10.2025).
26. Teng G., Shi G., Zhu J., Qi J., Zhao C. Research on the influence of pleat structure on effective filtration area during dust loading. *Powder Technology*. 2022. Vol. 395. P. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.062> (дата звернення: 15.10.2025).

27. Mortensen N. A., Okkels F., Bruus H. Reexamination of Hagen–Poiseuille flow: Shape dependence of the hydraulic resistance in microchannels. *Physical Review E*. 2005. Vol. 71, No. 5. P. 057301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.057301> (дата звернення: 15.10.2025).

28. Kansal S., Waghe K. K. Performance analysis of elliptical cross sectioned bends of HVAC duct for less pressure drop. *International Journal of Technical Research and Engineering*. 2014. Vol. 1, No. 10. P. 1142–1145.

29. Pirozzoli S. On turbulent friction in straight ducts with complex cross-section: the wall law and the hydraulic diameter. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 846. P. R1. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.303> (дата звернення: 15.10.2025).

30. Sharma A., Sen N., Singh K. K. Axial dispersion in laminar flow through a pipe with single and multiple twisted tape inserts: a CFD study. *Chemical Engineering Communications*. 2025. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986445.2025.2492033> (дата звернення: 15.10.2025).

31. Kim T. Y. Analytical solution for laminar entrance flow in circular pipes. *Journal of Fluid Mechanics*. 2024. Vol. 979. P. A51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2023.1060> (дата звернення: 15.10.2025).

32. Sadri R. M., Floryan J. M. Accurate Evaluation of the Loss Coefficient and the Entrance Length of the Inlet Region of a Channel. *ASME Journal of Fluids Engineering*. 2002. Vol. 124, No. 3. P. 685–693. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1493813> (дата звернення: 15.10.2025).

33. Turecky P., Mrozek L., Tajc L., Kolovratnik M. Analysis of pressure losses in the diffuser of a control valve. *EPJ Web of Conferences*. 2017. Vol. 143. P. 02135. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714302135> (дата звернення: 15.10.2025).

34. Noh M., Tahir M. A. M., Shafie K. A. Plant Factory Airflow Distribution Analysis with Different Inlet Configuration. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*. 2021. Vol. 2, No. 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.36877/aafjr.a0000242> (дата звернення: 15.10.2025).

35. Feng Z., Long Z., Chen Q. Assessment of various CFD models for predicting airflow and pressure drop through pleated filter system. *Building and Environment*. 2014. Vol. 75. P. 132–141. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.022> (дата звернення: 15.10.2025).

36. Badretdinov I. D., Mudarisov S. G., Khaliullin D. T. Examination of the airflow uneven distribution over the combine harvester cleaning system. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. Vol. 9, No. 2. P. 371–378. DOI: <https://doi.org/10.18280/mmep.090210> (дата звернення: 15.10.2025).

37. Голінько В. І., Дубенчук М. Є., Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Яворська О. О. Дослідження захисних властивостей півмаски РПА з протиаерозольними фільтрами різних виробників. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. № 55. С. 342–350. URL: <http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/ua-2018-55> (дата звернення: 15.10.2025).

38. Колесник В. Є., Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Нестерова О. Ю. Експериментальна перевірка ізолювальних властивостей легких протипилових півмасок. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности*. 2018. Вип. 105. С. 166–173.

39. Cheberyachko S., Yavors'ka O., Stolbchenko O., Radchuk D. Protective Efficiency of Filtering Respirators. *Advanced Engineering Forum*. 2017. Vol. 25. P. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.25.88> (дата звернення: 15.10.2025).

40. Чеберячко С. І., Радчук Д. І., Чеберячко Ю. І., Наумов М. М. Оцінка надійності протипилових респіраторів. *Геотехнічна механіка*. 2013. Вип. 112. С. 72–82. URL: <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/87389> (дата звернення: 15.10.2025).

41. Патент України № 113768, МПК А62В 23/02 (2006.01). Фільтруючий патрон до респіратора / Еннан А. А., Чеберячко С. І., Абрамова Н. М., Галак А. В.; заявник – Еннан А. А. № u201608953; заявл. 22.08.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 16. 4 с.

42. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В., Клімов Д. Г., Шароватова О. П., Грідяєв В. В. Засоби індивідуального захисту органів дихання: інновації щодо зниження ризику професійних захворювань. Комунальне господарство міст. 2023. Т. 1, № 175. С. 221–228. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6100/6017> (дата звернення: 15.10.2025).

43. Gogo V. B., Podkopaiev S. V., Chernykh N. S. Justification of complex labor protection measures for miners based on the quality of mine air. Scientific Bulletin of DonNTU. 2023. Vol. 1(100). P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-40-52> (дата звернення: 15.10.2025).

44. Cheberyachko S., Tretiakova L., Kolosnichenko M., Ostapenko N. Designing filtering half-masks. Fibres and Textiles (Vlákna a Textil). 2020. Vol. 27, No. 3. P. 82–89. URL: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2020_3.html (дата звернення: 15.10.2025).

45. Broznitsky N., Shum S., Kinniburgh D., Lichty D., Tiu S., Toic T., та ін. A field investigation of 3 masks proposed as respiratory protection for wildland firefighters: A randomized controlled trial in British Columbia, Canada. Annals of Work Exposures and Health. 2024. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae073> (дата звернення: 15.10.2025).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науково-дослідною роботою, вирішена важлива для охорони праці наукова проблема створення теоретичних засад з вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном на основі визначених закономірностей між зміною перепаду тиску фільтрів респіраторів та залишковим часом захисної дії з урахуванням впливу геометричних параметрів фільтрувальних коробок респіраторів, що відображається на енерговитратах користувача та ефективності роботи фільтрів.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному.

1. Встановлено науково обґрунтований взаємозв'язок між геометричними параметрами фільтрувальних коробок респіраторів (форма, розміри, розташування отворів) та перепадом тиску, що визначає опір диханню користувача. Це дозволило обґрунтувати конструктивні рішення для зменшення енерговитрат користувача та підвищення ефективності фільтрації.

2. Виявлено закономірності утворення «мертвих зон» у фільтрувальних елементах, які знижують ефективність використання фільтрувального матеріалу. Це стало підґрунтям для вдосконалення конструкцій фільтрів з метою забезпечення рівномірного обтікання повітря та підвищення пиломісткості.

3. Розроблено алгоритм розрахунку коефіцієнта конфігурації складчастих фільтрів, що враховує площу фільтрації, висоту та відстань між складками. Це дозволило визначити оптимальні параметри для мінімізації опору повітряному потоку та підвищення ефективності фільтрації.

4. Науково обґрунтовано вплив форми та розташування вхідних і вихідних отворів фільтрувальних коробок на рівномірність розподілу повітряного потоку, що забезпечує максимальне використання площі фільтрувального матеріалу та зменшує локальні перевантаження.

5. Встановлено нелінійну залежність між енерговитратами користувача, концентрацією шкідливих речовин та ефективністю роботи фільтрів, що дозволило враховувати фізичне навантаження при прогнозуванні строку захисної дії респіратора.

6. Розроблено програмний комплекс для прогнозування терміну захисної дії фільтрів, який враховує розподіл повітряного потоку, режим дихання та енерговитрати користувача. Це дозволило зменшити похибку розрахунків до 10 % у порівнянні з лабораторними даними.

7. Удосконалено конструкцію комбінованого фільтра шляхом інтеграції ароматичного індикатора в хлоридно-натрієву капсулу, що забезпечує можливість органолептичного контролю закінчення сорбційної ємності без використання спеціального обладнання.

8. Запропоновано концепцію лицевої частини респіратора у формі капюшона, яка забезпечує покращену герметизацію, рівномірний розподіл зусиль наголовного гарнітуру та підвищений комфорт користувача при тривалому носінні в умовах високої запиленості або токсичного середовища.

9. Доведено відсутність когнітивних ризиків при короткостроковому використанні респіраторів, а також встановлено вплив форми півмаски на чіткість мовлення. Запропоновано методику оцінки розбірливості слів при використанні мобільного телефону, що може бути використана під час сертифікаційних випробувань.

10. Сформовано концепцію конструкції моторизованого фільтрувального респіратора (МФР) з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою, що забезпечує високий рівень захисту, надійності та ергономічності.

11. Проведено оцінку ризиків функціонування системи МФР методом FMEA, що дозволило виявити потенційні відмови, оцінити їх наслідки та впровадити коригувальні заходи для зниження ризиків до прийнятного рівня.

12. Розроблено математичну модель роботи МФР, яка описує зміну тиску та витрати повітря в системі «вентилятор – фільтр – повітропровід – капюшон». Отримана передавальна функція підтвердила стабільність та ефективність роботи системи за різних режимів вентиляції.

13. Обґрунтовано раціональні конструктивні параметри фільтрів (форма, об'єм сорбенту, структура шарів) залежно від режиму дихання користувача та типу небезпечної речовини, що дозволяє підвищити ефективність фільтрації та зменшити опір диханню.

14. Результати дослідження впроваджено у навчальний процес підготовки фахівців з охорони праці, ергономіки та промислової безпеки, що сприяє підвищенню якості освітнього процесу та формуванню компетентностей у сфері безпеки праці.

15. Розроблений експериментальний зразок моторизованого фільтрувального респіратора (МФР) відповідає технічним вимогам та готовий до сертифікації і впровадження у виробництво, з можливістю застосування в умовах хімічних, біологічних, радіаційних та техногенних загроз.

Додаток А



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна

тел./tel.: +38 (056) 744 62 19,

e-mail: rector@ntnu.org.ua

+38 (098) 001 25 25;

ntnu@ntnu.org.ua;

факс/fax: +38 (056) 744 62 11

<http://ntnu.org.ua>06.10.2025 № 13-3-44/102

на № _____

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

Дмитра РАДЧУКА на тему «Наукове обґрунтування та вдосконалення
конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном»

Наукові та науково-практичні результати дисертаційного дослідження на тему «Наукове обґрунтування та вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном», що виконувалися протягом 2018-2025 рр., впроваджено в 2024/2025 навчальному році у навчальному процесі на кафедрі охорони праці та цивільної безпеки при викладанні дисциплін «Сучасні засоби індивідуального захисту працюючих» для бакалаврів спеціальності 263 «Цивільна безпека» та «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих» для магістрів спеціальності 263 «Цивільна безпека».

Перший проректор

Національного технічного університету

«Дніпровська політехніка»,

доктор технічних наук, професор

Артем ПАВЛИЧЕНКО

Додаток Б

Результати оцінювання ризику

Функція продукту	Опис можливої невідповідності	Опис можливої причини	Опис наслідків	Розрахунок числа пріоритетності ризику				Запобіжні заходи
				S	O	D	RPN	
Функція з блоком примусової подачі повітря	1. Нестабільна робота вентиллятора	- значний опір потоку повітря; - невеликі розміри повітряних каналів; - роботи на підвищених обертах; - зниження рівня заряду акумулятор.	- зменшення фільтрувальної здатності пристрою; - нерівномірність подавання повітря в підмасковий простір.	9	7	5	315	- додавання блоку контролю за параметрами повітряного потоку; - додавання багатифункціональної системи датчиків, встановлених в корпусі пристрою; - регулювання основних параметрів повітряного потоку в підмасковому просторі
	2. Невідповідна робота системи керування	- недостатній тиск повітря в мережі подачі повітря; - підвищення витрати повітря (більше 300 л/хв.); - утворення під маскою від'ємного (негативного) тиску.	- зменшення ефективності фільтрування повітря; - виникнення можливості пошкодження фільтра або ліній подачі повітря; - поява нещільностей по шмузі обтюраторі лицевой частини.	8	7	6	336	
	3. Низька всмоктувальна спроможність	- через швидке забруднення фільтру; - через значний термін експлуатації; - через низький об'єм повітряного потоку.	- втрата захисних властивостей пристрою; - поява важкості дихання у користувача.	10	7	5	350	

Додаток В

Програмний код керування контролером Arduino блоку подачі повітря моторового фільтрувального респіратора

```
#include <Servo.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

Servo esc;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

const int pressureSensorPin = A3;
const int pulsePin = 2;
volatile int pulseCount = 0;

const float k = 497.95 * 2;
const float b = -1345.90 * 2;

float pressureOffset = 0;

const int minThrottle = 1100;
const int idleThrottle = 1200;
const int maxThrottle = 1600;

unsigned long lastUpdate = 0;
unsigned long lastRadiationCountTime = 0;
unsigned long fanStartTime = 0;
bool fanStarted = false;

float lastRadiationLevel = 0;

void countPulse() {
    pulseCount++;
}

void setup() {
    esc.attach(10);
    Serial.begin(9600);

    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.clear();
    lcd.print("Calibrating...");

    esc.writeMicroseconds(minThrottle);
    delay(5000);

    int sensorValue = analogRead(pressureSensorPin);
    float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
    pressureOffset = k * voltage + b;

    lcd.clear();
    lcd.print("Ready!");
    delay(1000);
    lcd.clear();

    esc.writeMicroseconds(idleThrottle);
    delay(2000);

    pinMode(pulsePin, INPUT);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pulsePin), countPulse, FALLING);

    lastRadiationCountTime = millis();
```

```

}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Радіація: оновлюємо кожні 2000 мс
    if (currentMillis - lastRadiationCountTime >= 2000) {
        lastRadiationCountTime = currentMillis;
        lastRadiationLevel = pulseCount * 0.0092;
        pulseCount = 0;
    }

    // Загальне оновлення дисплея та вентилятора кожні 500 мс
    if (currentMillis - lastUpdate >= 500) {
        lastUpdate = currentMillis;

        int sensorValue = analogRead(pressureSensorPin);
        float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
        float pressure = k * voltage + b - pressureOffset;

        int throttle;
        if (pressure <= 300) {
            throttle = idleThrottle;
        } else {
            throttle = map(pressure, 301, 2000, idleThrottle + 10, maxThrottle);
            throttle = constrain(throttle, idleThrottle, maxThrottle);
        }
        esc.writeMicroseconds(throttle);

        if (throttle > idleThrottle && !fanStarted) {
            fanStarted = true;
            fanStartTime = millis();
        }

        // Час роботи вентилятора
        unsigned int minutes = 0;
        unsigned int seconds = 0;
        if (fanStarted) {
            unsigned long runTime = (currentMillis - fanStartTime) / 1000;
            minutes = runTime / 60;
            seconds = runTime % 60;
        }

        // Вивід на екран
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Pressure: ");
        lcd.print(pressure, 0);
        lcd.print(" Pa");

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Rad: ");
        lcd.print(lastRadiationLevel, 3);
        lcd.print(" uSv/h");

        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print("Run: ");
        lcd.print(minutes);
        lcd.print("m ");
        lcd.print(seconds);
        lcd.print("s");
    }
}

```

Додаток Г

Титульний лист розробленої методики для визначення загального коефіцієнту проникання респіраторів з капюшоном

ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ	ІСМ-6.4/03	
Інструкція	Визначення коефіцієнту проникання і загального коефіцієнту проникання (МФР з капюшоном)	Титульний аркуш	Сторінок 7
		Версія № 07	Дата 09.2025

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «СКІ»



Олександра БУРЦЕВА

«16» Вересня 2025 р.

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ

ІНСТРУКЦІЯ

Визначення коефіцієнту проникання і загального коефіцієнту проникання
(моторові фільтрувальні пристрої з капюшоном)

ІСМ-6.4/24

☒ Контрольний

☐ Робоча копія

№ копії	Місце знаходження
1	НААУ

УЗГОДЖЕНО

Завідувач ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»

Дмитро РАДЧУК

«16» Вересня 2025 р.

РОЗРОБИВ

Керівник з якості ВЛ ТОВ ЗІЗ «СКІ»

Валентина БОЛЬШАКОВА

«16» Вересня 2025 р.

Додаток Д

Протокол лабораторних випробувань моторового фільтрувального респіратора з капюшоном

ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ	ФСМ-7.8/01	
	Протокол випробувань № ВЗ-28/2025 від 15.10.2025р. випробного зразка респіратора	Сторінка 1 Версія № 07	Сторінок 4 Дата 03.2023

**Випробувальна лабораторія засобів індивідуального захисту
ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ»
(ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»)**

Юридична адреса: 49051, м. Дніпро, вул. Дніпросталівська, 1
Місцезнаходження ООВ: 49051, м. Дніпро, вул. Дніпросталівська, 1
тел. (056) 747-03-67, e-mail: skidnipro@i.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»
Д.І. Радчук
15 жовтня 2025 р.

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ № ВЗ-28/2025 від 15.10.2025

Замовник: Кафедра охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро)

Об'єкт випробувань та виробник: Зразок моторового фільтрувального респіратора з капюшоном. Виробник: кафедра охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка»

Випробування здійснювались на підставі: Листа-запиту на випробування б/н, зареєстрованого у ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ» за № 30/2025 від 15.09.2025, заявки на проведення випробувань ВЗ-28/2025 від 09.10.2025 р. та договору № 06/02-22 від 11 лютого 2022 р. про співпрацю між ТОВ «СКІ» та НТУ «ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА».

Зразки відібрані: Зразок відібрано та надано на випробування замовником.

Дата отримання зразків: 09.10.2025 р.

Дата проведення випробувань: 09.10.2025-15.10.2025 р.

Випробування проводилися: На відповідність ДСТУ EN 12941:2004 (EN 12941:1998) Засоби індивідуального захисту органів дихання. Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом та капюшоном. Вимоги, випробування, маркування».

Методи випробування: ДСТУ EN 12941:2004 (EN 12941:1998) «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом та капюшоном. Вимоги, випробування, маркування» п. 7.13 «Рівень шуму»; ДСТУ EN 13274-1:2005 (EN 13274-1:2001, IDT) «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнта проникання» метод 2В; ДСТУ EN 13274-2:2005 (EN 13274-2:2001, IDT) «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 2. Експлуатаційні випробування»; ДСТУ EN 13274-3:2005 (EN 13274-3:2001, IDT) «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 3. Визначення опору диханню» метод 2; ДСТУ EN 13274-6:2005 (EN 13274-6:2001, IDT) «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 6. Визначення вмісту діоксиду

Примітка. Результати випробувань розповсюджуються лише на зразки, що пройшли випробування. Протокол вважається дійсним тільки після затвердження. Забороняється частково або повністю передруківувати протокол, а також будь-яким іншим способом використовувати без дозволу випробувальної лабораторії

ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ	ФСМ-7.8/01	
	Протокол випробувань № В3-28/2025 від 15.10.2025р. випробного зразка респіратора	Сторінка 2 Версія № 07	Сторінок 4 Дата 03.2023

Опис виробу

вуглецю у вдихуваному повітрі);
ДСТУ EN 14387:2021 (EN 14387:2021, IDT) «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові та скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування» п. 6.2 «Програма випробування».

Моторний фільтрувальний респіратор складається з лицевої частини у вигляді капюшону. Лицева частина містить шолом для захисту голови від механічних ударів та оглядове скло для захисту очей й обличчя від зовнішніх чинників. Нагнітальний моторний блок, розроблений для носіння користувачем і який постачає відфільтроване навколишнє повітря до лицевої частини через гнучкий шланг, що приєднується спеціальними з'єднувачами. Носіння моторного блоку виконується за допомогою плечової системи з поясным ремнем. Моторний блок містить з'єднання для встановлення одного або двох фільтрів зі стандартним різьбленням R40x1/7. Передбачено вихідний отвір для надлишкового повітря манжетного типу з системою регулювання щільності прилягання.



Загальний вигляд експериментального зразка
моторного фільтрувального респіатора з капюшоном

Стан та
ідентифікація
виробу

Зразку респіатора на основі роботи пристрою оперативного контролю перепаду тиску фільтрувальної коробки було надано номер:
№ В3-28/2025 №1

Результати стосуються винятково тих зразків, що отримала лабораторія.



Примітка. Результати випробувань розповсюджуються лише на зразки, що пройшли випробування. Протокол вважається дійсним тільки після затвердження. Забороняється частково або повністю передруківувати протокол, а також будь-яким іншим способом використовувати без дозволу випробувальної лабораторії

ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ	ФСМ-7.8/01	
	Протокол випробувань № ВЗ-28/2025 від 15.10.2025р. випробного зразка респіратора	Сторінка 3 Версія № 07	Сторінок 4 Дата 03.2023

Результати випробувань

Вимоги ДСТУ EN 12941:2004	Фактично отримані дані
6.4 Коефіцієнт підсмоктування Під час випробовування з визначеною виробником мінімальною об'ємною швидкістю потоку коефіцієнт підсмоктування випробовувальної речовини для кожної із вправ не повинен перевищувати 10 % для ТН1, 2 % для ТН2, 0,2 % для ТН3 для кожного із 10 випробовувачів	0,916 ± 0,001 %
6.5 Опір диханню Позитивний тиск всередині шолома або капюшона не повинен перевищувати 5 мбар	0,28± 0,01 мбар
6.12 Рівень шуму Створюваний пристроєм шум не повинен перевищувати 75 дБ (А)	48-51 дБ (А)
6.13 Вміст діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі Середній вміст діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі (шкідливий простір) не повинен перевищувати 1 % (об'ємна частка)	0,696 ± 0,004 об %
6.16 Маса Загальна маса пристрою не повинна перевищувати 5 кг, з яких не більше ніж 1,5 кг можуть створювати навантагу на голову	Загальна маса пристрою – 2,529 кг. Маса моторового блоку – 1,321 кг Маса лицевої частини зі шлангом – 1,208 кг
6.17 Експлуатаційні випробовування Випробовують експлуатаційні властивості повністю укомплектованого пристрою за умов, наближених до реальних. Метою цих випробовувань є перевірити пристрій на наявність недоліків, які не можуть бути визначені будь-якими іншими випробовуваннями	4,5 бали з 5 (Додаток 1)



Примітка. Результати випробувань розповсюджуються лише на зразки, що пройшли випробування. Протокол вважається дійсним тільки після затвердження. Забороняється частково або повністю передруківувати протокол, а також будь-яким іншим способом використовувати без дозволу випробувальної лабораторії

ВЛ ЗІЗ ТОВ «СКІ»	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ	ФСМ-7.8/01	
	Протокол випробувань № ВЗ-28/2025 від 15.10.2025р. випробного зразка респіратора	Сторінка 4 Версія № 07	Сторінок 4 Дата 03.2023

Додаток 1

Результати експлуатаційних випробувань МФР з капюшоном

Показник, що оцінювався	Позначення випробувача та отримані бали					Середнє за показником
	ПО	ЛА	БМ	РД	АА	
ЗГГ	5	5	5	4	5	4,8 ± 0,45
ЗПС	4	4	5	4	4	4,2 ± 0,45
ЛЗН	3	4	4	4	3	3,6 ± 0,55
НК	5	5	5	5	4	4,8 ± 0,45
ДЗК	4	4	5	4	4	4,2 ± 0,45
ЧПЗ	5	5	5	4	5	4,8 ± 0,45
ЛЧС	5	5	5	5	4	4,8 ± 0,45
РВА	4	5	5	4	5	4,6 ± 0,55
РПП	4	5	5	5	4	4,6 ± 0,55
СРГ	4	4	4	5	5	4,4 ± 0,55
Середнє за показником	4,3±0,67	4,6±0,52	4,8±0,42	4,4±0,52	4,3±0,67	

Примітка: ЗГГ – зручність головного гарнітуру; ЗПС – зручність підвісної системи; ЛЗН – легкість знімання та надягання; НК – надійність кріплень; ДЗК – доступність засобів контролювання; ЧПЗ – чіткість і поле зору, охоплюючи запотівання; ЛЧС – легкість та чіткість спілкування; РВА – зберігання рівноваги під час використання апарата; РПП – розсіювання повітря та швидкість повітряного потоку; СРГ – свобода рухів головою.

Додаток 2

Результати визначення загального коефіцієнту проникання МФР

Номер випробувача	Ходіння	Рухи головою ліво/право	Рухи головою вгору/вниз	Промовляння	Ходіння мовчки	Середнє значення
ПО	0,567	0,491	0,217	0,684	0,631	0,518
ЛА	0,316	0,587	0,792	0,732	0,818	0,649
БМ	0,546	0,730	0,645	0,819	0,643	0,677
РД	0,417	0,328	0,446	0,398	0,435	0,405
АА	0,678	0,594	0,832	0,916	0,840	0,772
Середнє значення	0,505	0,546	0,586	0,710	0,673	
Максимальне значення	0,678	0,730	0,832	0,916	0,840	

КІНЕЦЬ ПРОТОКОЛУ

Примітка. Результати випробувань розповсюджуються лише на зразки, що пройшли випробування. Протокол виходить з експлуатації після затвердження. Забороняється частково або повністю передруківувати протокол, а також будь-яким іншим способом використовувати без дозволу випробувальної лабораторії.

Додаток Е

Код програми «Розрахунок часу захисної дії фільтра» на Python 3.9

```

import tkinter as tk
from tkinter import ttk
from PIL import Image, ImageTk
import io
import base64
from embedded_images import embedded_images
from utils import format_number, convert_input_to_float, load_json,
get_air_flow, calculate_result, format_time
from filter_params import get_filter_params

# Завантаження даних з JSON файлів
try:
    substances_filters = load_json('substances_filters.json')
    work_types = load_json('work_types.json')['work_types']
except FileNotFoundError as e:
    print(f"Критична помилка: {e}")
    print("Перевірте, що файли JSON знаходяться в тій же директорії, що и скрипт.")
    exit(1)
except json.JSONDecodeError as e:
    print(f"Критична помилка при читанні JSON: {e}")
    exit(1)

def update_units(*args):
    substance_name = operation_var.get()
    filter_type = substances_filters['substances'][substance_name]['filter']
    unit_dropdown['values'] = substances_filters['filters'][filter_type]
    unit_dropdown.set(unit_dropdown['values'][0])

def calculate_C0_C(event=None):
    substance_name = operation_var.get()
    substance_data = substances_filters['substances'][substance_name]
    mu = substance_data['mu']

    X1 = convert_input_to_float(entry_a.get())
    X2 = convert_input_to_float(entry_c.get())

    C0 = (X1 * mu) / 24.05526
    C = (X2 * mu) / 24.05526

    C0_value_label.config(text=f"{C0:.2f} мг/м3")
    C_value_label.config(text=f"{C:.2f} мг/м3")

def calculate():
    try:

```

```

substance_name = operation_var.get()
substance_data = substances_filters['substances'][substance_name]

Q = get_air_flow(work_type_var.get(), work_types)
unit = unit_var.get()

We, W, rv, Kv = get_filter_params(substance_data['filter'], unit)

result = calculate_result(We, W, float(C0_value_label.cget("text")[:-5]), Q, rv, Kv, float(C_value_label.cget("text")[:-5]))

formatted_time = format_time(result)
result_label.config(
    text=f"Прогнозований час захисної дії фільтра {unit} становить {formatted_time}"
)

except ValueError as e:
    result_label.config(text=f"Помилка: {str(e)}")
except Exception as e:
    result_label.config(text=f"Неочікувана помилка: {str(e)}")

BG_COLOR = "#E8F5E9"

root = tk.Tk()
root.title("FilterLife v.2.0")
root.geometry("500x400")
root.configure(bg=BG_COLOR)

def create_input_row(parent, label_text, default_value, unit_text):
    frame = tk.Frame(parent, bg=BG_COLOR)
    frame.pack(pady=5, fill="x")

    label_before = tk.Label(frame, text=label_text, anchor="w", width=30,
bg=BG_COLOR)
    label_before.grid(row=0, column=0, padx=5, sticky="w")

    entry = tk.Entry(frame, width=15)
    entry.insert(0, default_value)
    entry.grid(row=0, column=1, padx=5, sticky="w")

    label_after = tk.Label(frame, text=unit_text, anchor="w", width=10,
bg=BG_COLOR)
    label_after.grid(row=0, column=2, padx=5)

    return entry

# Work type selection
frame_work_type = tk.Frame(root, bg=BG_COLOR)
frame_work_type.pack(pady=5, fill="x")

```

```

tk.Label(frame_work_type, text="Виберіть тип роботи:", anchor="w", width=30,
bg=BG_COLOR).grid(row=0, column=0, padx=5, sticky="w")
work_type_var = tk.StringVar(value=list(work_types.keys())[0])
ttk.Combobox(frame_work_type, textvariable=work_type_var,
values=list(work_types.keys())).grid(row=0, column=1, padx=5, sticky="w")

# Substance selection
frame_substance = tk.Frame(root, bg=BG_COLOR)
frame_substance.pack(pady=5, fill="x")

label_substance = tk.Label(frame_substance, text="Виберіть тип речовини:",
anchor="w", width=30, bg=BG_COLOR)
label_substance.grid(row=0, column=0, padx=5, sticky="w")

operations = list(substances_filters['substances'].keys())
operations.sort()
operation_var = tk.StringVar()
operation_dropdown = ttk.Combobox(frame_substance,
textvariable=operation_var, values=operations)
operation_dropdown.grid(row=0, column=1, padx=5, sticky="w")
operation_dropdown.set(operations[0])

# Filter selection
frame_filter = tk.Frame(root, bg=BG_COLOR)
frame_filter.pack(pady=5, fill="x")

label_filter = tk.Label(frame_filter, text="Виберіть тип фільтра:",
anchor="w", width=30, bg=BG_COLOR)
label_filter.grid(row=0, column=0, padx=5, sticky="w")

unit_var = tk.StringVar()
unit_dropdown = ttk.Combobox(frame_filter, textvariable=unit_var)
unit_dropdown.grid(row=0, column=1, padx=5, sticky="w")

operation_var.trace('w', update_units)

# Concentration inputs (moved after filter selection)
frame_input = tk.Frame(root, bg=BG_COLOR)
frame_input.pack(pady=10, fill="x")

label_a = tk.Label(frame_input, text="Концентрація речовини в повітрі:",
anchor="w", width=30, bg=BG_COLOR)
label_a.grid(row=0, column=0, padx=5, sticky="w")
entry_a = tk.Entry(frame_input, width=15)
entry_a.grid(row=0, column=1, padx=5, sticky="w")
entry_a.bind("<KeyRelease>", calculate_C0_C)
label_a_unit = tk.Label(frame_input, text="ppm", anchor="w", width=5,
bg=BG_COLOR)
label_a_unit.grid(row=0, column=2, padx=5, sticky="w")

```

```

C0_value_label = tk.Label(frame_input, text="0.00 мг/м3", anchor="w",
width=15, bg=BG_COLOR)
C0_value_label.grid(row=0, column=3, padx=5)

label_c = tk.Label(frame_input, text="Концентрація речовини під маскою:",
anchor="w", width=30, bg=BG_COLOR)
label_c.grid(row=1, column=0, padx=5, sticky="w")
entry_c = tk.Entry(frame_input, width=15)
entry_c.grid(row=1, column=1, padx=5, sticky="w")
entry_c.bind("<KeyRelease>", calculate_C0_C)
label_c_unit = tk.Label(frame_input, text="ppm", anchor="w", width=5,
bg=BG_COLOR)
label_c_unit.grid(row=1, column=2, padx=5, sticky="w")
C_value_label = tk.Label(frame_input, text="0.00 мг/м3", anchor="w",
width=15, bg=BG_COLOR)
C_value_label.grid(row=1, column=3, padx=5)

calculate_button = tk.Button(root, text="ПОЗПАХУВАТИ", command=calculate)
calculate_button.pack(pady=5)

result_label = tk.Label(root, text="Результат: ", justify=tk.LEFT,
bg=BG_COLOR)
result_label.pack()

images_frame = tk.Frame(root, bg=BG_COLOR)
images_frame.pack(side=tk.BOTTOM, fill=tk.X, pady=5)

def load_image(image_data, width, height):
    img_data = base64.b64decode(image_data)
    img = Image.open(io.BytesIO(img_data))
    img = img.resize((width, height), Image.LANCZOS)
    return ImageTk.PhotoImage(img)

image1 = load_image(embedded_images['logo_ntu'], 90, 60)
label_image1 = tk.Label(images_frame, image=image1, bg=BG_COLOR)
label_image1.image = image1
label_image1.pack(side=tk.LEFT, padx=10)

copyright_label = tk.Label(images_frame, text="Created by D. Radchuk, 2024",
padx=5, pady=5, bg=BG_COLOR)
copyright_label.pack(side=tk.LEFT, expand=True)

image2 = load_image(embedded_images['standart'], 115, 40)
label_image2 = tk.Label(images_frame, image=image2, bg=BG_COLOR)
label_image2.image = image2
label_image2.pack(side=tk.RIGHT, padx=10)

update_units()

root.mainloop()

```