

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



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»

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Дніпро – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі охорони праці та цивільної безпеки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: **Чеберячко Юрій Іванович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: **Глива Валентин Анатолійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури;

Бочковський Андрій Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цивільної безпеки та охорони праці Національного університету «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України;

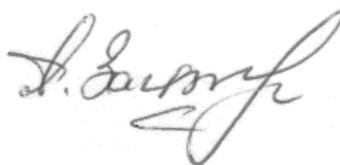
Костенко Тетяна Вікторівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри пожежної і техногенної безпеки об'єктів та технологій навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України ДСНС України (м. Черкаси).

Захист дисертації відбудеться «18» червня 2026 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

Реферат розісланий «18» травня 2026 р.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради**



Аліна ЗАГРИЦЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування теми дослідження. У сучасних умовах розвитку промисловості, медицини та систем цивільного захисту працівники постійно зазнають впливу різноманітних шкідливих чинників, що негативно впливають на їх здоров'я. Найбільш небезпечними вважаються такі, що проникають через органи дихання. Небезпечні пилові, хімічні, біологічні та радіаційні аерозолі, віруси та бактерії змушують шукати відповідні інженерні рішення для захисту людини в антропогенному середовищі. Одним з таких рішень є застосування ефективних засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД).

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

Науковий прогрес дозволяє використовувати інноваційні матеріали та технології для підвищення ефективності респіраторів. Наноструктуровані адсорбенти в скомбінованих фільтрах 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 стану фільтрів, дозволяють контролювати ефективність респіратора в реальному часі, підвищуючи рівень безпеки та оптимізуючи процес їх експлуатації. Звідси виникає необхідність у поєднанні трьох ключових аспектів для розробки нових ефективних комплексних ЗІЗОД: забезпечення захисту від багатокomпонентних забруднень у промислових, медичних та цивільних сценаріях; використання інноваційних технологій та матеріалів для підвищення ефективності фільтрувальних елементів; впровадження ергономічних рішень для комфортного та безпечного використання. Такий системний підхід дозволить створювати універсальні респіратори, що здатні ефективно захищати користувача в умовах техногенних надзвичайних ситуацій, забезпечуючи одночасно безпеку та комфорт.

Моторові фільтрувальні респіратори є одним із успішних прикладів комплексного рішення, здатного забезпечити одночасний захист від пилу, газів та біологічних агентів за умови мінімальних фізичних навантажень на організм користувача. Для цього розробниками ЗІЗОД була вирішена низка важливих наукових аеродинамічних задач із забезпечення стабільної та ефективної роботи компонентів моторових респіраторів. Зокрема, проведено CFD-моделювання гідродинаміки внутрішніх потоків повітря, що дозволяє визначити ключові параметри фільтрів, розподілу повітряних каналів у корпусах повітродувок, типів вентиляторів та інших елементів для створення стабільного позитивного тиску за мінімального енергоспоживання батареї та при низькому рівні шуму. Разом з тим, попри успішне розв'язання низки

аеродинамічних задач, залишається невирішеною ключова проблема – ефективне управління тепловим станом користувача в ізольованому підкапюшонному просторі та накопиченням діоксиду вуглецю в лицевих частинах моторових респіраторів. Її подолання потребує розробки нових чи вдосконалення існуючих математичних моделей з визначення захисної ефективності ЗІЗОД для реальних динамічних сценаріїв (рухи користувача, зміна інтенсивності дихання, зовнішня температура, фізичне навантаження та інше). Наявність цієї проблеми обмежує широке застосування ЗІЗОД у медицині, гарячих цехах, гірничодобувній промисловості та надзвичайних ситуаціях тривалої дії. У цьому контексті перспективною альтернативою традиційним лицевим частинам є моторові фільтрувальні респіратори (МФР) з капюшоном, конструктивні особливості яких забезпечують значно більший внутрішній об'єм та інтенсивніший повітрообмін. Це дозволяє зменшити теплове навантаження на користувача, знизити концентрацію діоксиду вуглецю в зоні дихання та підвищити комфорт і тривалість безперервного використання ЗІЗОД у складних та тривалих умовах експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до пріоритетних напрямків наукових досліджень, пов'язаних із Концепцією реформування системи управління охороною праці в Україні, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р., а також в рамках виконання 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» (№ ДР 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» (№ ДР 0125U002025 з 2025 року), у яких автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження - 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.

Для досягнення даної мети вирішені наступні задачі:

1. виконано аналіз сучасного стану розробки та експлуатації фільтрувальних ЗІЗОД для обґрунтування необхідності створення універсальних адаптивних систем капюшонного типу з мінімізацією впливу факторів, що обмежують їх енергоефективність та ергономічність при змінних фізичних навантаженнях.

2. обґрунтовано 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. науково обґрунтовано конструкцію моторового фільтрувального респіратора з капюшоном та автоматичним регулюванням подачі повітря шляхом створення математичної моделі системи «фільтр – вентилятор – повітропровід – капюшон» для адаптації режиму роботи пристрою до поточних енерговитрат користувача.

4. визначено залежності часу захисної дії скомбінованих фільтрів від інтенсивності енерговитрат користувача та умов навколишнього середовища для розробки математичної моделі та програмного забезпечення щодо прогнозування залишкового ресурсу і своєчасного інформування користувача.

5. встановлено закономірності впливу геометричних параметрів фільтрувальних коробок та конфігурації складчатих 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 – параметри моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном та фільтрами, що відповідають концепції універсальності та нормативним вимогам щодо технічних, ергономічних і експлуатаційних характеристик.

Основна ідея роботи полягає у підвищенні захисної ефективності користувачів засобів індивідуального захисту органів дихання за рахунок удосконалення конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном додатковими системами, які забезпечують 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 протягом усього терміну роботи з підтриманням належного рівня захисних властивостей пристрою.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи застосовано системно-структурний підхід для аналізу наукових праць провідних світових учених щодо вимог нормативно-правових актів з охорони праці, державних стандартів в області застосування засобів індивідуального захисту органів дихання; перевірка адекватності запропонованої математичної моделі виконана методами математичної статистики при обробці натурних експериментів з визначення основних показників респіраторів за допомогою сучасних вимірювальних приладів за методиками, які відповідають чинним державним стандартам. Додатково у роботі застосовано комп’ютерне моделювання в програмному середовищі SolidWorks з використанням вбудованих модулів SolidWorks Flow Simulation для дослідження та вдосконалення конструкції моторового фільтрувального респіратора з капюшоном, конструктивних

елементів фільтрів, аналізу руху повітряних потоків у внутрішньому об'ємі капюшона, а також вивчення розподілу та динаміки повітряних мас у системі МФР під час конструювання каналів, якими подається повітря. Для аналізу надійності моторового фільтрувального респіратора 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.

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 ($V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$) 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, що 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 проектування.

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 респіратора 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 плаского, 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 створенні підґрунтя для розробки нових фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання, зокрема алгоритму розрахунку коефіцієнта конфігурації, що може бути використаний при проектуванні нових фільтрів різних типів для забезпечення оптимальних параметрів повітропроникності; розробці програмного комплексу для прогнозування часу захисної дії фільтрів, який враховує розподіл повітряного потоку, режим дихання та енерговитрати користувача, забезпечуючи похибку не більше 10 % від реальних даних; створенні системи контролю перепаду тиску та залишкового ресурсу фільтра, що забезпечує оперативне визначення моменту заміни фільтрувальних елементів і підвищує безпеку користувача; розробці методики оцінювання розбірливості мовлення у респіраторах, що може бути використана під час сертифікаційних випробувань нових моделей засобів індивідуального захисту.

Розроблено 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 відповідно до режиму дихання та енерговитрат користувача.

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 є визначальними у діапазоні концентрації шкідливої речовини більше 300 ppm, тоді як у діапазоні до 300 ppm визначальною являється саме концентрація шкідливої речовини, що дозволяє прогнозувати ефективний час роботи фільтрів, а й характеристики режиму дихання та повітрообміну в підмасковому просторі, які істотно впливають на реальні умови експлуатації ЗІЗОД.

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», 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» (№ ДР 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 (магістерським) рівнем вищої освіти.

Обґрунтування і достовірність наукових положень, висновків рекомендацій підтверджується репрезентативним об'ємом експериментальних досліджень; використанням сучасного, апробованого математичного апарату та програмних продуктів зокрема CAD/CAE комплексу SolidWorks; збігом результатів теоретичних і експериментальних досліджень щодо визначення опору диханню, часу захисної дії та захисної ефективності скомбінованих фільтрів за розрахованої невизначеності вимірювань, що не перевищує 15%; результатами дослідно-конструктивних розробок лицьових частин та фільтрувальних коробок, досвідом практичного втілення пропозицій з розробки конструкцій ЗІЗОД; результатами експериментальних випробувань удосконалених конструкцій респіраторів та нових, що пропонуються, наявністю ясного фізичного трактування отриманих результатів та впровадженням результатів роботи у практичну діяльність.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій викладено підхід та пропозиції автора до наукового обґрунтування та вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном на основі адаптивного регулювання повітряного потоку в капюшонний простір, урахування фізіологічних характеристик

користувача та оптимізації параметрів фільтрувальних елементів. Внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві, конкретизовано в списку публікацій.

Апробація 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», м. Дніпро); X Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності в ХХІ 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 роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (331 найменування) і 6 додатків на 393 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 251 сторінка, у тому числі 119 рисунків та 75 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами, темами та планами. Визначена мета і сформульовано задачі досліджень. Обґрунтовано наукову новизну і практичне значення винесених на захист положень, подано відомості про апробацію та публікацію результатів досліджень, а також надано загальну характеристику дисертації.

У першому розділі здійснено комплексний системний аналіз сучасного стану розробки, виробництва та експлуатації фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД), зокрема моторових респіраторів зі скомбінованими (газопилезахисними) фільтрами, що застосовуються в умовах підвищеної концентрації пилу, газів та аерозолів різного походження.

Встановлено, що основними причинами недостатнього рівня захисту користувачів у фільтрувальних ЗІЗОД є: конструктивні недоліки, недосконалість нормативної бази, застосування невідповідних композицій фільтрувальних матеріалів для виготовлення фільтрів, що не відповідають умовам експлуатації, а також помилки з вибору ЗІЗОД, обслуговування та їх експлуатації. Також існують прогалини у нормативних вимогах щодо чіткого визначення терміну захисної дії фільтрів, особливо протигазових, що призводить до значної ймовірності погіршення захисту користувачів. В таблиці 1 наведено фрагмент оцінювання пріоритетного числа ризику невідповідності конструкції ЗІЗОД за методом FMEA згідно до вимог стандарту ДСТУ EN IEC 60812:2022 «Аналізування видів відмов і наслідків (FMEA і FMECA)». До основних конструктивних недоліків ЗІЗОД належать дефекти матеріалів корпусу моторового блоку та окремих деталей, деформації лицевих частин, а також складність рівномірного розподілу повітряного потоку всередині фільтрувальних елементів (утворення так званих «мертвих зон»), що призводить до неповного використання активного об'єму фільтра. Крім того, зазначені конструктивні недоліки посилюються відсутністю адаптації зміни опору повітряному потоку фільтрів до режимів роботи системи подавання повітря у підмасковий простір моторових респіраторів. Усунення зазначеного недоліку дозволить, зокрема, забезпечити подачу відповідної кількості повітря у підмасковий простір, що відповідає глибині і частоті дихання користувача.

Над вирішенням зазначених питань тривалий час працюють провідні науковці та дослідницькі центри світу. Серед них фахівці Національного інституту охорони праці США (NIOSH), зокрема Ronald Shaffer, Ziqing Zhuang та Samy Rengasamy, які здійснили фундаментальні дослідження фільтраційних властивостей, коефіцієнтів захисту та повторного використання респіраторів, а також розробили сучасні методи випробувань. Значний внесок зробили

дослідники Центрального інституту охорони праці Польщі, науковці компаній-виробників 3M, Honeywell, Dräger та MSA, а також європейські центри (INRS, з Франції, HSE з Великої Британії), які сформували основу сучасних міжнародних стандартів (EN 12941, EN 14387, NIOSH 42 CFR 84).

Таблиця 1. Фрагмент оцінювання пріоритетного числа ризику ЗІЗОД

Невідповідності конструкції	Опис можливої причини невідповідності	Опис наслідків настання невідповідності	Пріоритетне число ризику			
			S	O	D	RPN
Невідповідна фактура матеріалу повітропроводу	знижений тиск повітря в системі подачі; порушення температурного режиму при виготовленні матеріалу	недостатній тиск в повітропроводі; виникнення можливості пориву елементів респіратора; зменшення захисної ефективності фільтра	8	5	1	40
Пошкодження матеріалу або брак	механічний вплив при виготовленні матеріалу людський чинник; дія зовнішніх небезпечних чинників на готовий матеріал	втрата захисних властивостей фільтрів, адсорбенту	10	7	5	350
Деформація лицевої частини респіратора	невідповідна фактура матеріалу або процедура зберігання чи кліматичні умови	зниження фільтрувальних властивостей	4	7	6	168
Дефекти фактури корпусу моторового блоку	невідповідність властивостей матеріалу, який обрано для використання; брак постачальника;	погіршення експлуатаційних властивостей респіратора; зменшення продуктивності виготовлення	7	2	5	70
Дефекти деталей	наявність зазорів матриці в прес-формі; відхилення від температурного режиму лиття	розрив матеріалу Елефлен, втрата захисних властивостей; поранення користувача	6	5	5	150

Примітка: S – тяжкість наслідків, бал; O – ймовірність виникнення відмови чи інциденту, бал; D – можливість виявлення небезпечного стану, бал; RPN – значення пріоритетного ризику, бал.

В Україні проблемою удосконалення конструкцій фільтрувальних моторових ЗІЗОД, розробки нових фільтрувальних матеріалів та методів розрахунку часу захисної дії протигазових фільтрів активно займається наукова школа д.х.н. Енанна А.А., до якої входять д.х.н. Хома Р.Є., к.т.н. Кіро С.А., к.т.н. Сахаров О.В., Абрамова Н.М., Книш І.М. Також над удосконаленням конструкції ЗІЗОД працювали д.т.н. Голінько В.І., д.т.н. Яворська О.О., к.т.н. Наумов М.М., Дубенчук М.Є., які виконали комплексні дослідження аеродинаміки фільтрувальних коробок, ергономіки лицевих частин респіраторів, оцінки коефіцієнта захисту ЗІЗОД, надійності протипилових

респіраторів та впливу мікроклімату на захисні властивості протигазових фільтрів. Оцінкою ризиків, що виникають під час надзвичайних ситуацій, та впливом людського фактору на виробничу діяльність займались д.т.н. Бочковський А.П., д.т.н. Яворська О.О., д.т.н. Чеберячко С.І., д.т.н. Глива В.А. Питаннями впливу засобів індивідуального захисту на здоров'я та працездатність користувачів займалась д.т.н. Костенко Т.В.

Проведений комплексний аналіз недоліків моторових фільтрувальних ЗІЗОД та існуючих шляхів підвищення їх захисної ефективності й методів розрахунку часу захисної дії протигазових фільтрів, дозволив сформулювати декілька принципів для підвищення захищеності користувачів. Перш, за все – розробка концепції нової конструкції моторового фільтрувального респіратора з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою, що забезпечує енергоефективність та автономність, для зниження втоми користувача. По-друге - це розробка нової математичної моделі функціонування моторового фільтрувального респіратора, яка описує зміну тиску та витрати повітря в системі «фільтр – вентилятор – повітропровід – капюшон». Її вирішення дозволить встановити відповідні закономірності між режимами експлуатації ЗІЗОД та ефективністю захисту користувача за різних режимів вентиляції. По-третє – це розробка процесу розрахунку часу захисної дії протигазових фільтрів з урахуванням усього комплексу їх експлуатаційних параметрів, що дозволить забезпечити відповідну надійність рівня захисту користувачів.

В результаті проведеного аналізу недоліків існуючих моторових фільтрувальних ЗІЗОД сформовано мету дисертаційного дослідження та наукові задачі для її досягнення (рис. 1).

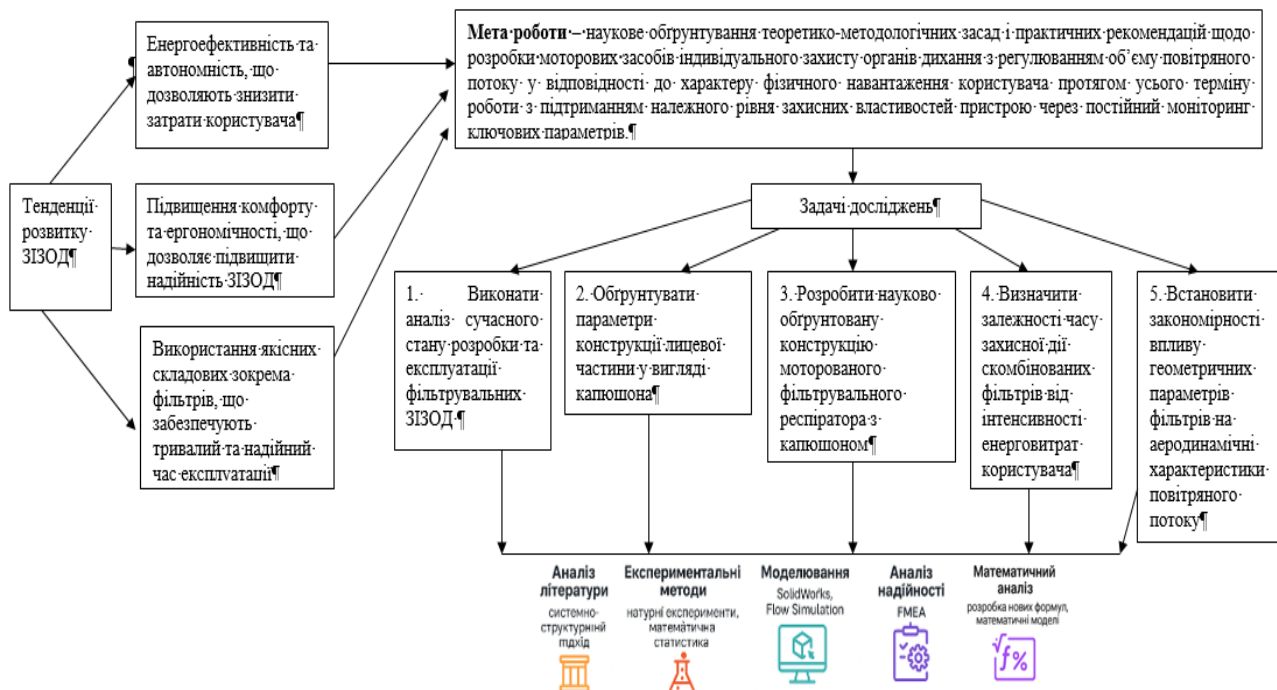


Рис. 1. Концептуальна схема дисертаційного дослідження

У другому розділі розроблено та експериментально обґрунтовано концептуальну модель захисного капюшона, як однієї з конструктивних складових моторового фільтрувального ЗІЗОД, яка дозволить забезпечити мінімальний вплив на когнітивні та функціональні показники користувача.

В основі розробки запропонованої моделі захисного капюшону є:

- визначення основних антропометричних характеристик облич чоловіків і жінок, які необхідні для розробки цифрових моделей голів типових користувачів;
- визначення конструктивних параметрів системи подачі й відведення повітря з метою забезпечення комфортних умов дихання, ефективного тепломасообміну та раціональних умов експлуатації.

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

Рис. 2. Удосконалена параметрична таблиця з вказаною кількістю людей, які потрапили в певну комірку за відповідними типорозмірами

Для визначення основних антропометричних характеристик облич чоловіків і жінок було залучено 412 добровольців (210 чоловіків і 202 жінок) віком від 20 до 30 років. В результаті було отримано параметричну таблицю (рис. 2), яка стала основою для побудови двох типових цифрових моделей капюшонів (типорозміри М та L) користувачів ЗІЗОД (рис. 3).

Розрахунок конструктивних параметрів системи подачі й відведення повітря із захисного капюшону проводили за допомогою програмного продукту SolidWorks Flow Simulation. Для цього була розроблена чисельна тривимірна модель капюшону з урахуванням геометричних особливостей, граничних умов повітрообміну та режимів роботи системи подачі повітря.

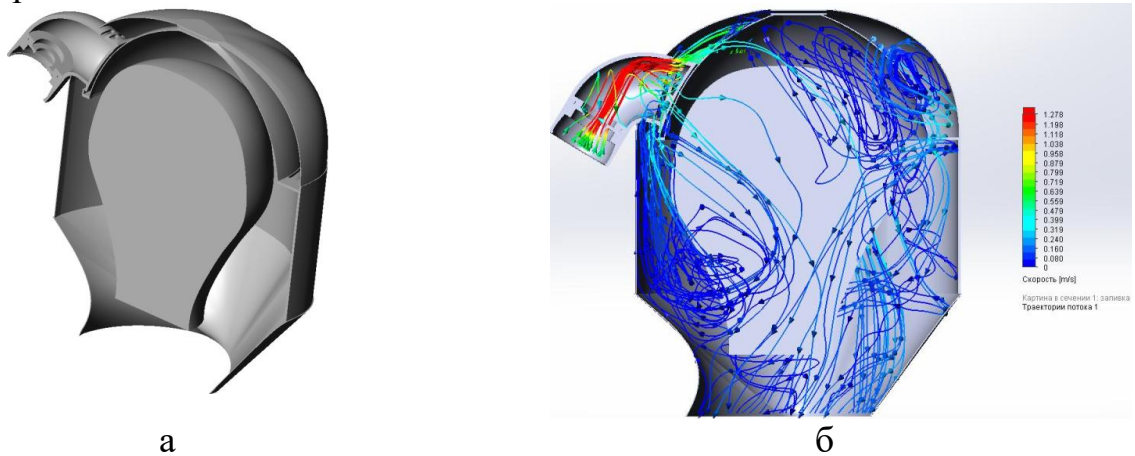


Рис. 3. Цифрова модель капюшона моторового фільтрувального респіратору розміру L з головою користувача: а – розрахункова геометрична модель, б – результати моделювання руху повітряних потоків у внутрішньому об'ємі капюшону

Моделювання здійснювалось на основі рівнянь Нав'є-Стокса, які реалізовані в зазначеному програмному продукті. Були отримані залежності коливань тиску швидкісних потоків в середині захисного капюшона. Також розраховано час очищення робочого об'єму захисного капюшону від накопичення діоксиду вуглецю.

Результати моделювання (рис. 4), показали, що для моторових фільтрувальних респіраторів з захисним капюшоном збільшення швидкості повітряного потоку з 60 до 200 $\text{дм}^3/\text{хв.}$ залежно від типорозміру лицевої частини зумовлює скорочення коливань внутрішнього тиску ($P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$) від 1,22 до 1,16 для типорозміру М від 1,11 до 1,108 для типорозміру L, водночас підвищуючи амплітуду коливань швидкості ($V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$) в 1,2 рази, що дозволяє прогнозувати інтенсивність навантаження та енерговитрати користувача, при цьому час очищення $T_{\text{оч}}$ скорочується у в 3,3 рази не залежно від типу капюшону.

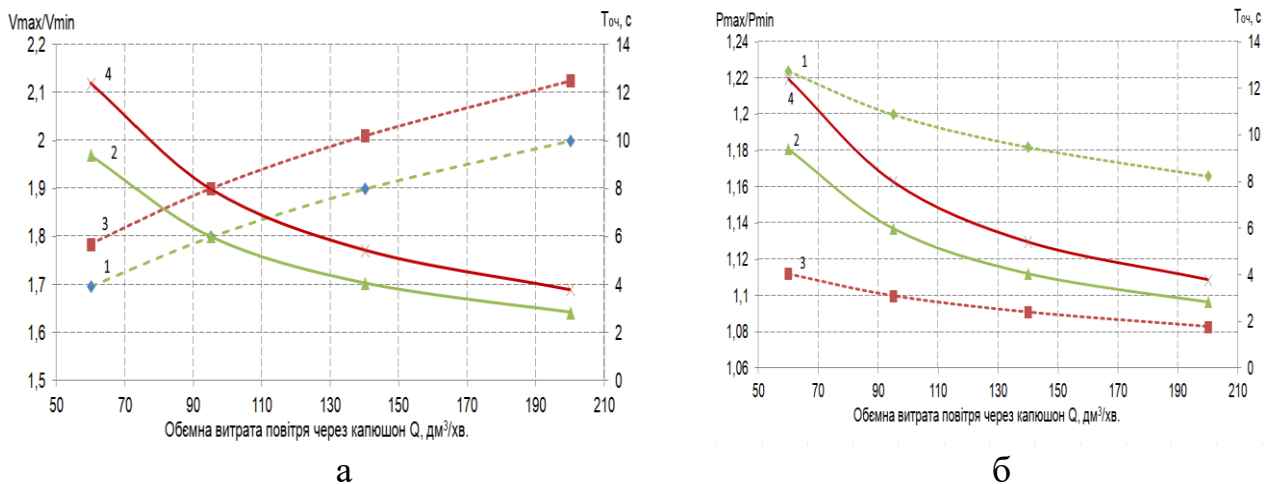


Рис. 4. Розподіл руху повітря в капюшоні за різної витрати повітря:

а) криві залежності коливання швидкостей повітря (1) та часу очищення (2) капюшону типорозміру М, коливання швидкостей повітря (3) та часу очищення (4) капюшону типорозміру L; б) криві залежності коливання тиску (1) та часу очищення (2) капюшону типорозміру М, коливання тиску (3) та часу очищення (4) капюшону типорозміру L

На основі результатів чисельного моделювання розроблено конструкцію капюшона, яка поєднує ключові переваги традиційної захисної каски, зокрема механічний захист, високу оглядовість та ергономічний комфорт, що робить її придатною для використання в умовах підвищеного ризику (рис. 5). Запропонована конструкція призначена для застосування в хімічно-небезпечних, біологічно-заражених або значно запилених середовищах, а також при виконанні аварійно-рятувальних робіт, які характеризуються високою динамікою подій і необхідністю тривалого перебування в небезпечній зоні ризику. Конструкція забезпечує стабільне просторове положення капюшону за рахунок використання головного гарнітуру, ефективний повітрообмін у зоні

дихання та зниження теплового навантаження на користувача шляхом застосування системи щільового розподілу повітря.



Рис. 5. Загальний вигляд моделі захисного капюшону на користувачі

Результати експлуатаційних випробувань капюшонів, які були проведені в акредитованій лабораторії засобів індивідуального захисту Товариства з обмеженою відповідальністю «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ» (атестат акредитації 201298) за участю 15 добровольців, показали:

- відсутність впливу на когнітивні функції (увага, швидкість реакції, пам'ять) та показників працездатності після 1-годинного безперервного носіння ($p > 0,05$ за результатами тестів Stroop, PVT та NASA-TLX) (рис. 6);

- збереження стабільного суб'єктивного рівня комфорту під час експлуатації, відсутність скарг на перегрів, утруднення дихання або надмірне навантаження на шийну та плечову області за результатами анкетування користувачів порівняно з традиційними касками та шоломами;

- високий рівень суб'єктивної оцінки ергономічних характеристик та зручності експлуатації капюшона, підтверджений результатами анкетного опитування користувачів (середній бал 4,8 за п'ятибальною шкалою).

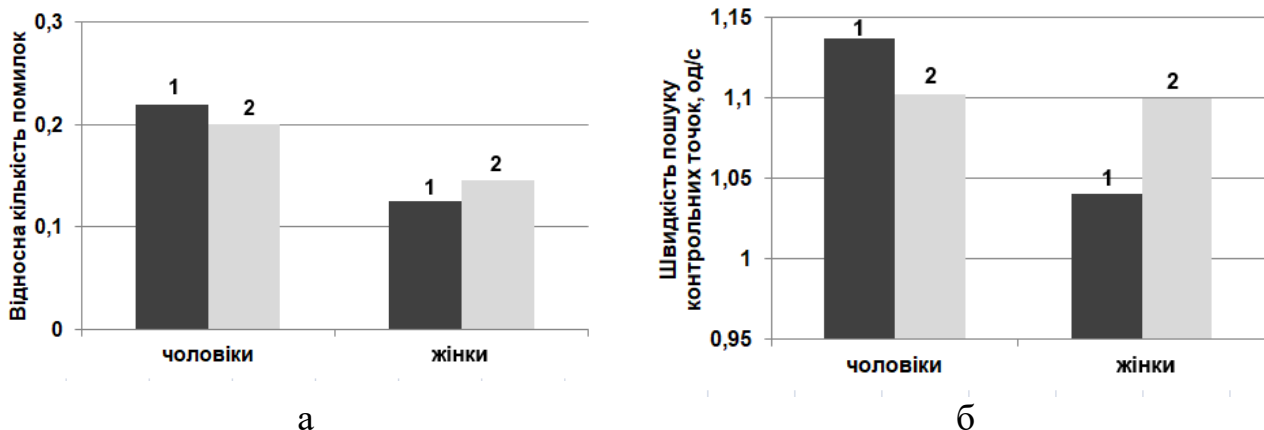


Рис. 6. Гістограми відносної кількості помилок (а) та швидкості пошуку контрольних точок (б) в захисному капюшоні (1) і без нього (2)

Додатково було проведено експлуатаційні випробування капюшонів на групі добровольців, відповідно до вимог п. 7.16 ДСТУ EN 12941, що дозволило оцінити вплив респіратор на функціональні показники користувача після виконання фізичного навантаження (рис. 7).

Для порівняльної оцінки застосовано серійний капюшон типу «Пульс», виготовлений з вогнестійкої полімерної силіконової тканини та оснащений фільтрувально-поглинальними елементами для очищення вдихуваного повітря.

Основною відмінністю серійного та експериментального зразків є принцип подачі повітря до підмаскового простору: у капюшоні «Пультс» реалізовано всмоктувальний тип, тоді як в експериментальній моделі примусове нагнітання. Проведене порівняння було спрямоване на визначення впливу принципу подачі повітря на фізіологічне навантаження користувача та встановлення режиму релаксації після виконання робіт. Показник PEF (Peak Expiratory Flow, пікова об'ємна швидкість видиху) застосовано як інтегральний критерій оцінювання змін легеневої вентиляції після виконання фізичного навантаження.

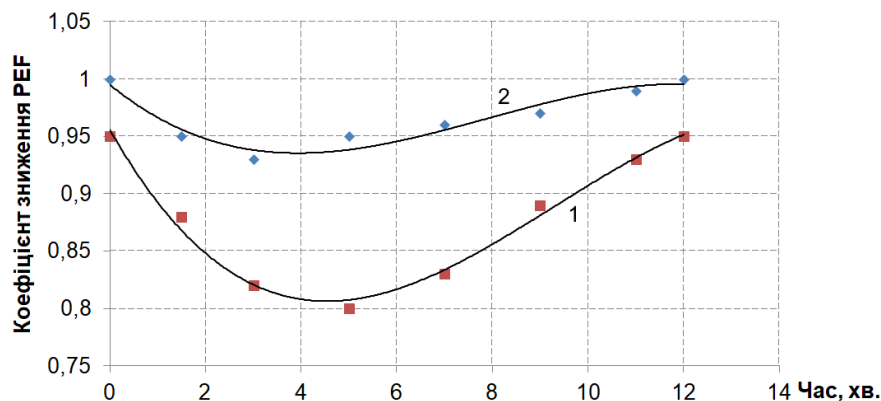


Рис. 7. Залежність коефіцієнту зниження PEF від часу релаксації після проведення випробувань з ходіння в капюшонах за швидкості 6 км/год.:
1 – капюшон «Пультс»; 2 – експериментальна модель капюшону

Встановлено, що застосування захисного капюшону дозволяє мінімізувати проблеми, пов'язані з нерівномірним розподілом зусиль головного гарнітуру, зменшити ризик утворення щілин по лінії обтюрації та забезпечити стабільний захист при тривалому використанні захисного капюшону завдяки мінімальному впливу на функціональні і когнітивні показники користувачів.

У третьому розділі удосконалено математичну модель руху повітряного потоку в моторовому фільтрувальному респіраторі із захисним капюшоном з урахуванням впливу режиму дихання користувача відповідно до фізичного навантаження.

Проведено оцінку ризиків функціонування системи методом FMEA. Визначено потенційні відмови елементів конструкції, проаналізовано їх наслідки та пріоритети. Впровадження коригувальних заходів дозволило знизити виявлені ризики до прийняттого (низького) рівня, що свідчить про високу надійність і безпечність запропонованої конструкції.

На основі рівнянь масообміну, балансу тиску та рівнянь руху повітря в системі «вентилятор-фільтр-повітропровід-капюшон» отримано передавальну функцію першого порядку, яка дозволяє прогнозувати об'ємну витрату повітря Q , що надходить в захисний капюшон від кількості обертів вентилятора n з урахуванням статичної чутливості системи.

$$\frac{\Delta Q(s)}{\Delta n(s)} = \frac{K_{\text{там}}}{\tau_Q s + 1} \quad (3.1)$$

де Q – об’ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; n – частота обертів вентилятора, об^{-1} ; $K_{\text{стат}}$ – статична чутливість системи; τ_Q – ефективна динамічна стала часу; s – змінна Лапласа.

На відміну від існуючих математичних моделей, які зазвичай розробляються для закритих або напівзакритих фільтрувальних систем із герметичним підмасочним простором і базуються переважно на балансі тиску з урівноваженим позитивним тиском, у запропонованій математичній моделі моторового респіратора з капюшоном враховується специфіка негерметичної (відкритої) системи з вільним підмасочним простором.

Для визначення реального впливу дихальної активності користувача на процеси масообміну у внутрішньому об’ємі капюшона було проведено серію лабораторних досліджень з використанням дихальної машини за стандартної методики ISO 16900-5, заміри виконувались за різних частот дихання. Це дозволило отримати емпіричні дані, необхідні для кількісної валідації розробленої моделі, а також для встановлення коригувальної функції $f(W_{\text{роб}})$, що враховує інтенсивність виконуваних робіт та реальний вплив користувача (людського чинника) у вигляді:

$$f(W_{\text{роб}}) = 1,749 - 0,021VE \quad (3.2)$$

де, VE – інтенсивність дихання, $\text{дм}^3/\text{хв}$.

Запропонована математична модель дозволила визначити час об’ємного оновлення повітря в захисному капюшоні τ_c , що впливає на енерговитрати користувача через накопичення діоксиду вуглецю у вдихуваному повітрі, за формулою

$$\tau_c = \frac{V_{\text{нов}}}{Q_0} f(W_{\text{роб}}) \quad (3.3)$$

де τ_c – час оновлення повітря в капюшоні, с; $V_{\text{нов}}$ – робочий повітряний об’єм капюшону, м^3 ; Q_0 – витрата повітря через капюшон, $\text{м}^3/\text{с}$; $f(W_{\text{роб}})$ – коригувальна функція витрат людини, що враховує інтенсивність виконуваних робіт.

На основі цієї моделі встановлено величину коригувального коефіцієнту від впливу геометричних параметрів лицевої частини та об’єму повітря, що потрапляє у захисний капюшон. Так, за об’ємної витрати повітря до $30 \text{ дм}^3/\text{хв}$ коригувальний коефіцієнт становить більше 1, тоді як при збільшенні об’ємної витрати до діапазону $30\text{--}60 \text{ дм}^3/\text{хв}$ його значення стає меншим за 1.

При цьому встановлено, що перепад тиску до стабілізації повітряного потоку у захисних капюшонах становить лише 28 Па. Цей результат свідчить, що підтримання герметичності підмасочного простору забезпечується значно нижчими енерговитратами, ніж у моторових респіраторів з масками, де для створення урівноваженого позитивного тиску в герметичному об’ємі традиційно вимагається вищий енергетичний ресурс вентилятора для підтримки тиску у діапазоні 100–250 Па. Зменшення енерговитрат до 70 %, залежно від режиму праці користувача, безпосередньо призводить до суттєвого спрощення математичного опису процесів. Завдяки цьому вдалося перейти від моделей вищого порядку (зокрема, третього порядку, традиційно застосовуваних для точного контролю тиску в закритих системах) до передавальної функції першого порядку. Така спрощена модель є значно

зручнішою для практичної реалізації, дозволяє безпосередньо прогнозувати об'ємну витрату Q з урахуванням статичної чутливості системи та забезпечує достатню точність прогнозування в реальних умовах експлуатації.

Розроблена математична модель дозволила визначити загальну концепцію підтримки комфортних параметрів мікроклімату в захисному капюшоні незалежно від інтенсивності робіт, виконуваних користувачем в моторових фільтрувальних ЗІЗОД (табл. 2).

Таблиця 2. Основні принципи безпечного застосування фільтрувального моторового ЗІЗОД

Категорія робіт	Витрата повітря, $\text{дм}^3/\text{хв}$	Мінімальні оберти вентилятора n	Час очищення підмасочного простору від CO_2 , τ_c
Легка (переважно сидячи, з перенесенням легких вантажів)	$Q \geq 30 (f(W_{\text{роб}}) > 1)$	n_{min} визначається за аеродинамічною характеристикою вентилятора для забезпечення потрібної витрати повітря Q	$\tau_c \leq \frac{V_{\text{кап}}}{Q}$ (практично $\leq 45\text{с}$)
Середньої важкості (ходьба, ремонтні роботи)	$40 - 60 (f(W_{\text{роб}}) < 1)$		$\tau_c \leq \frac{V_{\text{кап}}}{Q}$ (практично $\leq 25\text{с}$)
Важка (інтенсивна фізична робота, підймання та перенесення вантажів)	$Q \geq 70 (f(W_{\text{роб}}) < 1)$		$\tau_c \leq \frac{V_{\text{кап}}}{Q}$ (практично $\leq 15\text{с}$)

На основі визначених закономірностей був розроблений моторовий блок. Він складається з наступних елементів: самого корпусу, вентилятора, системи повітропроводів та системи управління режимами роботи. Остання включає комплект датчиків контролю швидкості, температури та вологості повітря, зміни тиску, рівнів забруднення навколишнього середовища, а також заряду елементів живлення (рис. 8).

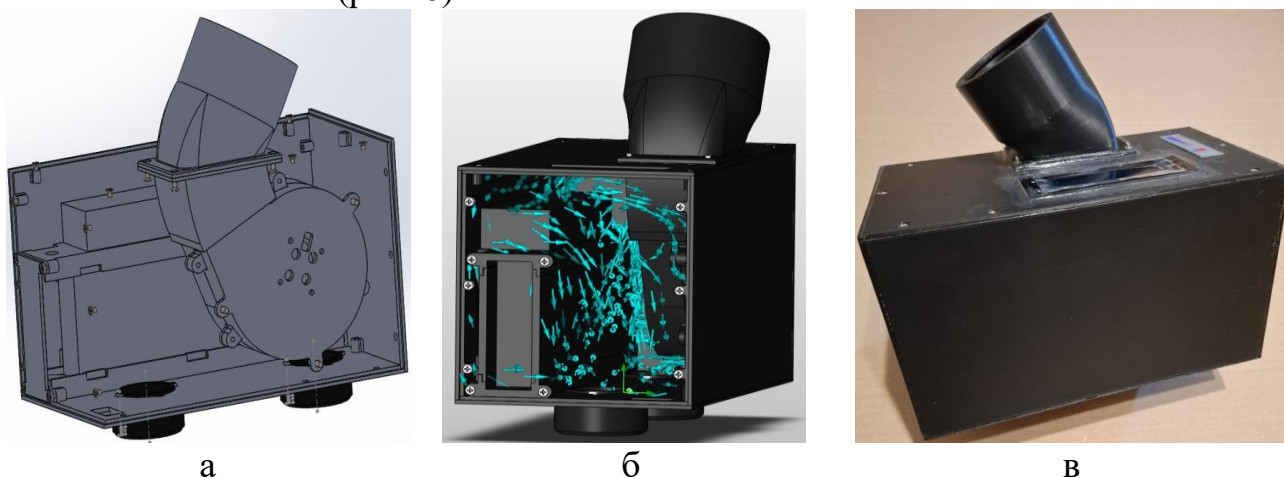


Рис. 8. Загальна конструкція моторового блоку (а), результати моделювання руху повітряних потоків в середині блоку (б) та реальний прототип (в)

Внутрішній простір моторового блоку розраховано таким чином, що частка вільного об'єму становить близько 35 %. Цей вільний об'єм виконує функцію «конденсатора», забезпечуючи зниження гідродинамічного опору та плавну роботу вентиляційної системи без різких коливань зміни тиску.

Визначення параметрів розробленого моторового блоку (опір повітряному потоку, рівень шуму, об'єм повітря, що подається в капюшон) у лабораторних умовах показало їх відповідність вимогам ДСТУ EN 12941 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Моторові фільтрувальні пристрої з шоломом або капюшоном. Вимоги, випробовування, маркування» (табл. 3). Результати оцінювання захисних та експлуатаційних показників моторового фільтрувального респіратора (коефіцієнта проникнення тест-аерозолі, кількість діоксиду вуглецю в капюшоні та оцінка експлуатаційних властивостей) із захисним капюшоном і універсальними фільтрами за участю 25 випробувачів підтверджують можливість його практичного застосування для захисту користувачів.

Таблиця 3. Результати лабораторних випробувань моторового фільтрувального респіратора із захисним капюшоном

Параметри моторового фільтрувального респіратора з капюшоном	Фактичні показники	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 тест-аерозолі (з урахуванням можливого підсмоктування через негерметичність захисного капюшону), %	0,916	ТН1 – не більше 10 % ТН2 – не більше 2 % ТН3 – не більше 0,2 %
Відповідність класу захисту	ТН2	
Оцінка за результатами експлуатаційних випробувань на добровольцях, бали	4,4 бали з 5	Суб'єктивна оцінка
Концентрація діоксиду вуглецю в середині захисного капюшона за увімкненого моторового блоку, об. %	$0,696 \pm 0,004$ об %	Не більше 1,0 %

У четвертому розділі виконувався розрахунок конструктивних параметрів протигазових фільтрів з метою визначення їх раціональної конструкції та забезпечення мінімальних енерговитрат у складі моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном.

До основних конструктивних параметрів протигазових фільтрів відносять геометричні розміри та експлуатаційні показники фільтрувальних коробок (табл. 4). У ході дослідження цифрових моделей протигазових фільтрів (рис. 9) в CFD-пакеті (computational fluid dynamics) SolidWorks, визначили вплив конструктивних параметрів на їх аеродинамічні та захисні властивості (перепад тиску, лінійна швидкість, час захисної дії тощо).

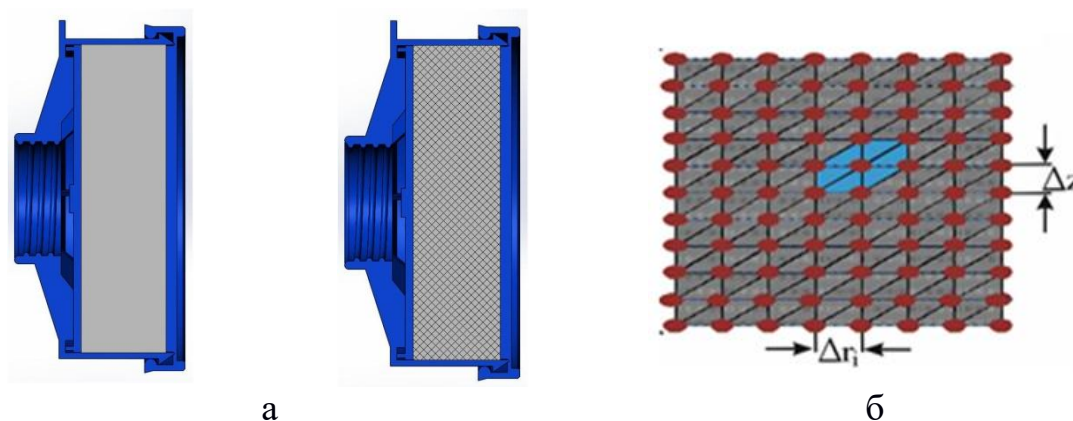


Рис. 9. Вигляд загальної (а) та елементарної (б) цифрових моделей фільтра з сіткою

Таблиця 4. Характеристики досліджуваних фільтрувальних протигазових коробок

Параметри фільтрувальних протигазових коробок	Значення параметрів фільтрів різної форми	
	Циліндрична	Трапецевидна
Радіус коробки R_K , мм	38-45	-
Ширина коробки B_K , мм	-	80-86
Довжина коробки L_K , мм	-	92-110
Площа фільтра S , см^2	45-64	60-72
Радіус вихідного отвору r_K , мм	12-16	12-16
Висота коробки H , мм	32-38	24-30
Зазор між адсорбентом і задньою кришкою фільтрувальної коробки h , мм	4-6	4-6
Зміщення вихідного отвору від центру коробки, мм	0	15-25
Опір повітряному потоку, Па, за витрати $15 \text{ дм}^3/\text{хв.}$	84-100	31-49
Кількість направляючих повітряного потоку	6-8	10-12

Встановлено, що зміщення на 10 % вихідного отвору від центру фільтрувальної коробки призводить до погіршення часу захисної дії фільтра на 40 % через виключення частини об'єму активованого вугілля з процесу фільтрації. Крім того, збільшення проміжку між адсорбентом і нижньою стінкою фільтрувальної коробки на 10 % призводить до зростання часу захисної дії до 20 % завдяки покращенню розподілу повітряного потоку через шари активованого вугілля. Також виявлено, що збільшення діаметру вихідного отвору фільтрувальної коробки до 10 % підвищує час захисної дії протигазового фільтра на 20 %. Це пояснюється рівномірним розподілом повітряного потоку за об'ємом фільтра, що забезпечує залучення всього активованого вугілля до процесу фільтрування.

Для пошуку раціональної конструкції протигазового фільтра було запропоновано комплексні коефіцієнти, які відображують ефективність, продуктивність і комфортність використання фільтра від витрати повітря через нього, а саме:

- коефіцієнт комфортності це відношення добутку перепаду тиску й площі фільтра до витрати з урахуванням динамічної в'язкості повітря

$$K_{комф} = \frac{\Delta P \cdot S_{\phi} \cdot K_{масш}}{\mu Q_{\phi}} \quad (4.1)$$

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});

- коефіцієнт ефективності це відношення реального до нормованого часу захисної дії протигазового фільтра.

$$K_{еф} = \frac{K_{зах}}{K_{норм}} = \frac{T_{факт}}{T_{норм}} \quad (4.2)$$

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

- коефіцієнт продуктивності це відношення об'єму протигазового фільтра, що приймає участь у процесі фільтрації, до загального об'єму фільтра.

$$K_{прод} = \frac{V_{дів}}{V_{заг}} \quad (4.3)$$

де $V_{заг}$ – загальний об'єм фільтра, см³, $V_{дів}$ – об'єм фільтра, що приймає участь в процесі фільтрації, см³.

За результатами даних з розподілу швидкості фільтрування за площею фільтра, отриманих у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation, встановлені залежності вище зазначених коефіцієнтів.

Отримані коефіцієнти дозволили встановити раціональні геометричні розміри фільтрувальної коробки: діаметри входних і вихідних отворів, що впливають на площу фільтра, через яку проходить повітряний потік та об'єм фільтра, що бере участь в процесі фільтрації; висоту фільтрувальної коробки та зазор між встановленим фільтром і задньою стінкою коробки. Визначені конструктивні розміри фільтрувальних коробок забезпечують мінімальний рівень перепаду тиску та енерговитрати. Крім того, ці параметри впливають на час захисної дії завдяки повному відпрацюванню адсорбенту, що міститься в фільтрі.

Визначення взаємозалежності між коефіцієнтами ефективності, продуктивності, комфортності та витратою повітря крізь фільтрувальну коробку дозволяє виявити ефективну область застосування фільтра з мінімальним впливом на енерговитрати та захисну ефективність моторового фільтрувального респіратора із захисним капюшоном в цілому (рис. 10).

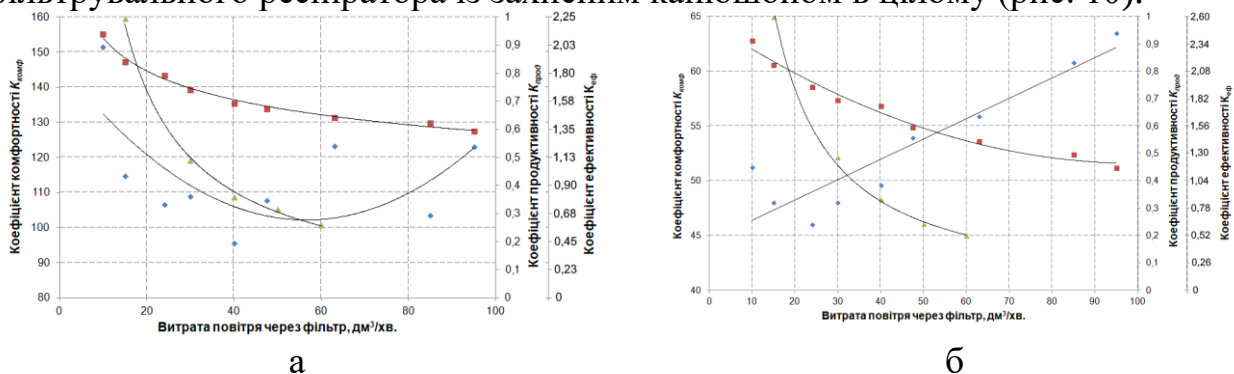


Рис. 10. Залежності коефіцієнтів ефективності, продуктивності і комфортності від витрати повітря для коробок протигазових фільтрів циліндричної (а) та плоскої (б) форми

Зокрема встановлено, що фільтри пласкої форми за витрати повітряного потоку через фільтр до 50 дм³/хв. забезпечують удвічі менші енерговитрати користувачів у порівнянні з фільтрами циліндричної форми. При цьому останні показують кращі результати із енергоефективності у діапазоні витрат повітря від 40 до 80 дм³/хв.

На основі результатів проведених досліджень щодо визначення впливу геометричних параметрів на час захисної дії протигазових фільтрів розроблено програмний комплекс для розрахунку їх захисної ефективності з використанням удосконаленого рівняння Віллера-Джонаса. Зокрема, додатково під час розрахунку враховується вплив типу та інтенсивності виконуваної роботи користувачем (рис. 11).

Рис. 11. Інтерфейс програми з розрахунку прогнозованого часу захисної дії протигазових фільтрів

Перевагою цього комплексу є можливість визначення часу захисної дії фільтрів з урахуванням впливу різних небезпечних чинників (температури, вологості повітря, наявності зміни режимів роботи, аварійних ситуації наприклад, можливі пошкодження фільтрів), які попередньо заносяться в модуль пам'яті та враховуються при розрахунках. Додатковою перевагою програмного комплексу є модульність та гнучкість його архітектури. Міжмодульний обмін даними здійснюється через централізовану

базу, що забезпечує цілісність інформації та можливість багаторазового використання результатів попередніх розрахунків. Комплекс підтримує проведення варіативного моделювання, дозволяючи користувачеві порівнювати декілька сценаріїв забруднення та різні типи фільтрів. Алгоритми розрахунку базуються на математичних моделях адсорбційних процесів, що підвищує точність прогнозу.

Розроблено конструкцію скомбінованого фільтра з інтегрованою хлоридно-натрієвою капсулою (патент України на корисну модель № 159947, 2025 р.), яка реалізує принцип пасивного індикатора терміну служби ESLI та забезпечує своєчасне оповіщення користувача про вичерпання сорбційного ресурсу. Запропоноване рішення усуває недоліки візуальної індикації за рахунок індикації через відомий тест-запах та підвищує безпеку експлуатації ЗІЗОД. 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.

У п'ятому розділі виконувався розрахунок конструктивних параметрів протиаерозольних фільтрів, як одного з елементів скомбінованого фільтра, для мінімізації енерговитрат користувачів моторових фільтрувальних респіраторів із захисним капюшоном.

Основними конструктивними параметрами протиаерозольних фільтрів є площа фільтрувальної поверхні та геометрія складок. Від їх значень залежить перепад тиску та коефіцієнт проникнення як фільтрувального матеріалу, так і готового виробу в цілому.

Перепад тиску фільтра є важливою характеристикою, оскільки визначає час захисної дії моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном. Його збільшення, викликане накопиченням пилового осаду на поверхні фільтра, з часом призводить до підвищення енерговитрат через необхідність підтримання постійної швидкості руху повітря, щоб забезпечити відповідний режим роботи користувача. Для уповільнення зростання перепаду тиску на фільтрах виникає потреба у застосуванні значної фільтрувальної площі. Однак, існує обмеження, що пов'язане з розмірами фільтрувальних коробок, конструктивні параметри яких формуються відповідно до експлуатаційних характеристик моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном. Звідси, виникає потреба у конфігуруванні фільтрувальної поверхні, що також пов'язана з вимогами створити умови рівномірного розподілу повітряного потоку за всією площею фільтра.

Для визначення ефективності конфігурування фільтра пропонується використовувати коефіцієнт конфігурації $K_{\text{конфіг}}$, що характеризує розподіл повітряного потоку за утвореними каналами між складками фільтрувальної поверхні.

$$K_{\text{конфіг}} = \frac{\Delta P}{R_{\phi} Q_{\phi} n_{\text{пот}}} \quad (5.1)$$

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.

Для визначення аеродинамічного опору конфігурованого фільтрувального матеріалу проведено серію досліджень (рис. 12 та 13) із зміни перепаду тиску від кількості складок, що дозволило оцінити вплив геометричних розмірів каналів та запропонувати формули для розрахунку коефіцієнту конфігурацій для прямокутного фільтра :

$$K_{\text{конфіг}} = a_k \cdot n^2 - b_k \cdot n + c_k \quad (5.2)$$

і фільтра у вигляді урізаного конусу

$$K_{\text{конфіг}} = (a_k \cdot n^2 - b_k \cdot n + c_k) \cdot K_{\text{щ.скл}} \quad (5.3)$$

де a_k , b_k і c_k – коефіцієнти, які залежать від властивостей фільтрувального матеріалу (гідродинамічного опору, діаметру волокон та щільності їх упакування) та параметрів конфігурації (висоти складки). Коефіцієнти в (5.3) визначаються в діапазонах: a_k – від 0,0015 до 0,003, b_k – від 0,06 до 0,1. Параметр c_k визначає мінімальну можливу кількість складок для даної форми;

$K_{ц,скл}$ – коефіцієнт щільності укладки складок, що враховує ступінь ущільнення при встановленні в корпус фільтра (0.9-1.1).

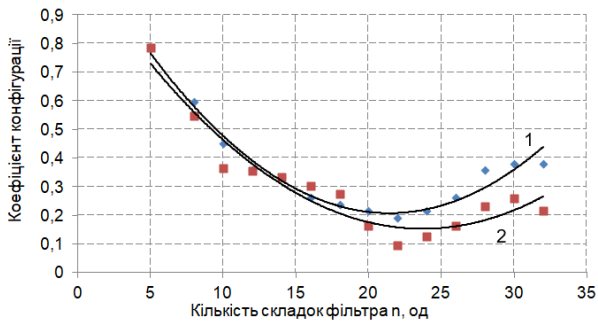


Рис. 12. Залежність коефіцієнту конфігурації від кількості складок фільтра з поліпропіленового фільтрувального матеріалу за витрати 30 дм³/хв (1) і 95 дм³/хв (2).

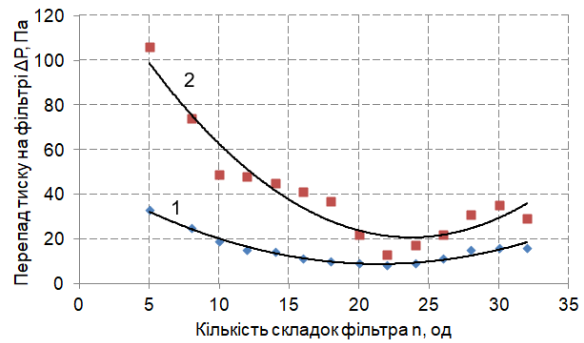


Рис. 13. Залежність зміни перепаду тиску від кількості складок у фільтрі з поліпропіленового фільтрувального матеріалу за витрати 30 дм³/хв. (1) і 95 дм³/хв. (2)

Використовуючи формули (5.2 і 5.3), можна визначати такі геометричні параметри складчастих фільтрів, які забезпечують мінімальні енерговитрати при різних режимах роботи користувача і забрудненні навколишньої атмосфери. Так, в разі використання коефіцієнтів $a_k = 0,002$, $b_k = 0,08$ та $c_k = 1$ (у разі прийнятої мінімальної кількості складок, що дорівнює 1) отримуємо наступну залежність (рис. 14).

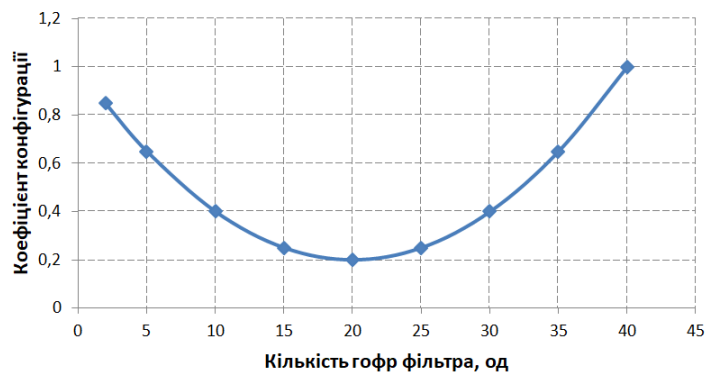


Рис. 14. Залежність теоретично розрахованого коефіцієнту конфігурації від кількості складок для поліпропіленового фільтрувального матеріалу

Перепад тиску на конфігурованих фільтрах може бути представлений як функція не лише геометричних параметрів фільтрів та властивостей фільтрувального середовища, а й експериментально визначених коефіцієнтів конфігурації складчастого фільтра a_k (0,0015-0,003), b_k (0,06-0,1) та c_k (≥ 1), що описується залежністю

$$\Delta P = (a_k \cdot n^2 - b_k \cdot n + c_k) \cdot R_f Q_f^{n_{nom}} \quad (5.4)$$

При цьому загальний коефіцієнт конфігурації фільтра знаходиться в межах від 0,2 до 0,7.

Додатково досліджено вплив вихідного та вхідного отворів на енерговитрати системи. Для аналізу впливу конструкції фільтрувальної коробки на аеродинамічні характеристики повітряного потоку, який надходить до фільтру, використовували числове моделювання у тривимірній декартовій системі координат на основі рівняння неперервності потоку

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (5.5)$$

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.

Після інтегрування за об'ємом рівняння маси, енергії та імпульсу потоку отримано алгебраїчний вираз

$$\frac{d}{dt} \int_V (\rho\phi) dV + \int_A \vec{n} \cdot (\rho\phi\vec{V}) dA = \oint_A \vec{n} \cdot (\Gamma_\phi \nabla_\phi) dA + \int_V S_\phi \cdot dV \quad (5.6)$$

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 вище зазначених рівнянь у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation виконано моделювання руху повітряного потоку через фільтрувальні коробки (рис. 15) з метою оцінювання рівномірності розподілу швидкості за площею поперечного перерізу за умови витрати повітря від 30 до 95 дм³/хв.

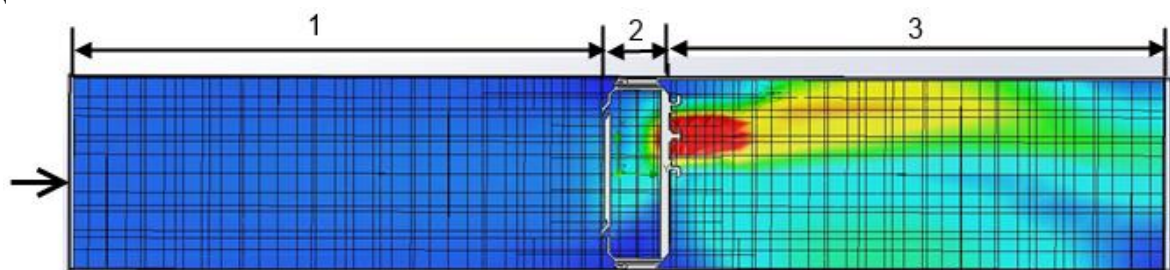
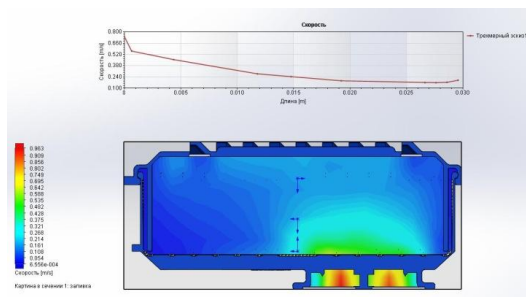


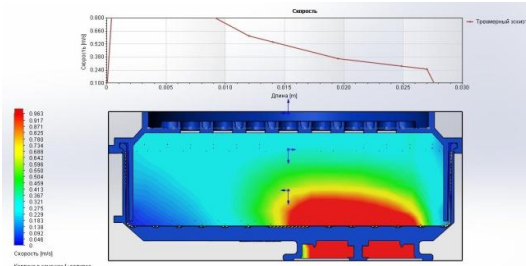
Рис. 15. Розрахункова схема моделювання руху повітряного потоку через фільтрувальну коробку: 1 – вхідна ділянка повітропроводу із заданою витратою повітря Q , 2 – протиаерозольний фільтр, 3 – вихідна ділянка повітропроводу

За результатами серії симуляцій (рис. 16) встановлено, що у фільтрувальних коробках з центральним вихідним отвором коефіцієнт варіації швидкості на 10 %, а коефіцієнт варіації тиску на 15 % більші, порівняно з фільтрувальними коробками зі зміщеним вихідним отвором. Це пояснюється тим, що у фільтрувальних коробках з центральним отвором повітря швидко затягується через центральний отвір, оскільки прагне рухатися найкоротшим шляхом від периметру до центру фільтра.

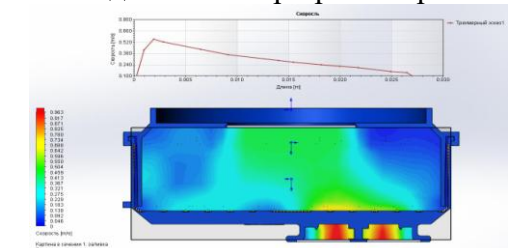
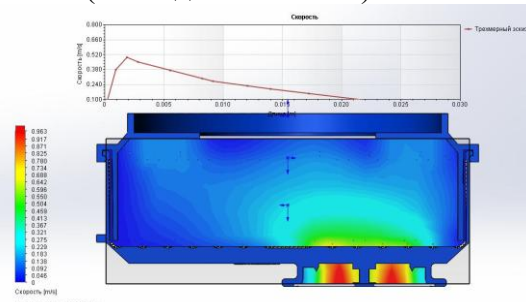
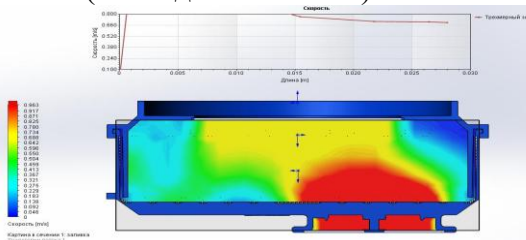
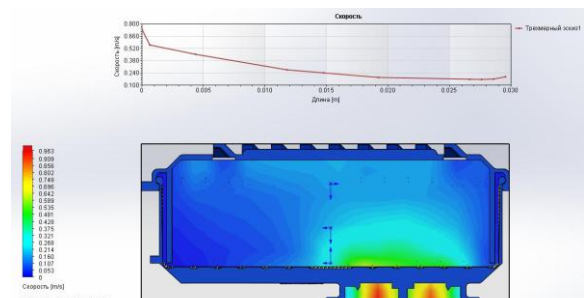
Встановлено, що зі збільшенням витрати повітря з 30 до 95 дм³/хв спостерігається зменшення коефіцієнту варіації швидкості до 25 % та коефіцієнту варіації тиску до 30 %. Це пояснюється тим, що за малих витрат повітря на розподіл швидкості істотно впливає довжина шляху руху повітря від вхідного до вихідного отвору.



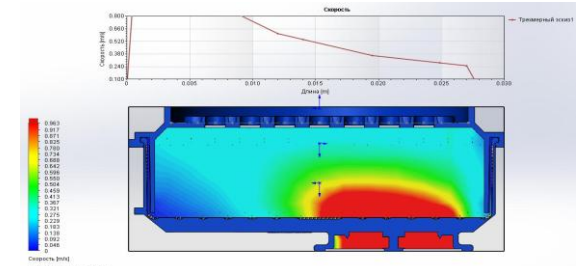
30 дм³/хв. жалюзі



30 дм³/хв. отвори рівномірні

30 дм³/хв. центральний отвір 38 мм
(співвідношення 2:1)30 дм³/хв. центральний отвір 46 мм
(співвідношення 3:1)30 дм³/хв. центральний отвір 54 мм
(співвідношення 4:1)

95 дм³/хв. жалюзі



95 дм³/хв. отвори рівномірні

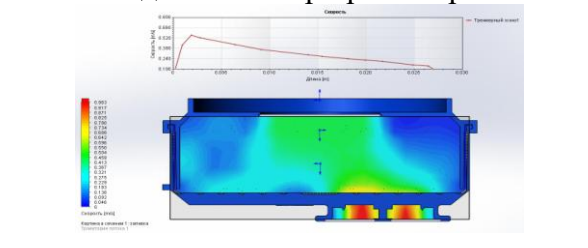
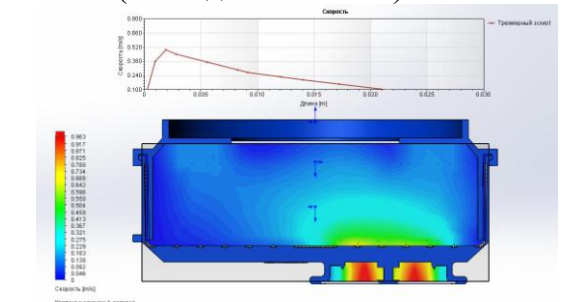
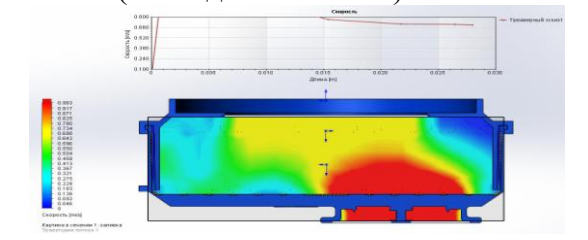
95 дм³/хв. центральний отвір 38 мм
(співвідношення 2:1)95 дм³/хв. центральний отвір 46 мм
(співвідношення 3:1)95 дм³/хв. центральний отвір 54 мм
(співвідношення 4:1)

Рис. 16. Результати моделювання розподілу швидкості повітряного потоку у фільтрувальних коробках зі зміщеним вихідним отвором та різними формами кришок

Підтверджено, що конструкція коробок фільтрів 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.

Отримані результати моделювання зумовили необхідність визначення впливу геометрії вхідного отвору на коефіцієнт варіації швидкості повітряного потоку. З цією метою проаналізовано розподіл повітряного потоку в об'ємі фільтрувальної коробки з кришками, у яких вхідні отвори виконано у вигляді квадрата або еліпса та характеризуються еквівалентним гідравлічним діаметром, що перебуває у заданому співвідношенні до діаметра вихідного отвору (1:1, 2:1, 3:1).

Отримані результати показують, що при еліпсоїдних і квадратних формах вхідного отвору коефіцієнт варіації швидкості у фільтрувальних коробках збільшується від 30 % до 50 % у порівнянні з круглими вхідними отворами. Це пояснюється тим, що в круглому вхідному отворі потік повітря, що надходить до фільтрувальної коробки, має більш симетричний і рівномірний розподіл тиску навколо центру.

Вплив конструкції кришки фільтра на ергономічні параметри є суттєвим, що продемонстровано результатами чисельного моделювання. Форма та площа вхідного отвору впливає на перепад тиску, швидкість руху та розподіл повітряного потоку в середині фільтрувальної коробки. Раціональною з точки зору аеродинаміки є кругла форма отвору. Вона забезпечує найменший перепад тиску серед усіх розглянутих форм з однаковою площею поперечного перерізу, формує більш рівномірний розподіл швидкості та сприяє ламінарному руху повітря, що є особливо важливим для забезпечення комфортного дихання.

За результатами моделювання встановлено взаємозв'язок між перепадом тиску на фільтрах респіратор та залишковим часом їх захисної дії. Для визначення цього часу запропоновано алгоритм лінійної регресії, який дозволяє розрахувати критичне значення перепаду тиску. Реалізація запропонованого підходу із застосуванням важільної системи та інтегрованого блоку збору й обробки інформації забезпечує визначення залишкового часу захисної дії протиаерозольних фільтрів і прогнозування необхідної кількості їх заміни з урахуванням умов експлуатації. Зміна механічного положення важільної системи, пов'язаної з рухомою перегородкою, дозволяє ідентифікувати критичний рівень забруднення фільтра на основі моніторингу перепаду тиску та даних про цикли дихання, що підвищує точність прогнозування часу захисної дії. На цій основі обґрунтовано підхід до визначення необхідної кількості фільтрів для забезпечення захисту користувача в умовах високої запиленості. Запропонований алгоритм розрахунку часу заміни фільтрів базується на даних моніторингу в реальному часі, зокрема на контролі зміни перепаду тиску, зумовленої накопиченням пилу на поверхні фільтра.

ВИСНОВКИ

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.

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 терміну захисної дії респіратора.

6. Розроблено програмний комплекс для прогнозування часу 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 скомбінованого фільтра шляхом інтеграції ароматичного індикатора в хлоридно-натрієву капсулу, що забезпечує можливість органолептичного контролю закінчення адсорбційної ємності без використання спеціального обладнання.

8. Запропоновано концепцію лицевої частини респіратору у формі капюшона, яка забезпечує покращену герметизацію, рівномірний розподіл зусиль наголовного гарнітуру та підвищений комфорт користувача при тривалому носінні в умовах високої запиленості або наявності середовища, що не придатне для дихання без використання респіраторів.

9. Доведено відсутність когнітивних ризиків при використанні респіраторів, а також встановлено вплив форми капюшону на чіткість мовлення. Запропоновано методику оцінки розбірливості слів при використанні мобільного телефону, що може бути використана під час сертифікаційних випробувань.

10. Сформовано концепцію конструкції моторового фільтрувального респіратору 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 роботи.

13. Обґрунтовано раціональні конструктивні параметри фільтрів (форма, об'єм адсорбенту, 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 моторового фільтрувального респіратору відповідає технічним вимогам та готовий до сертифікації і впровадження у виробництво, з можливістю застосування в умовах хімічних, біологічних, радіаційних та техногенних загроз.

Основні положення і результати дисертації були опубліковані в наступних роботах:

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. Cheberiyachko 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.nbu.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.nbu.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.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000167955>.
6. Радчук Д. І. Поліпшення захисних характеристик легких фільтрувальних півмасок (рос). *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности*. 2015. Вип. 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. *Гірничя 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., Cheberiyachko 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. Cheberiyachko S. I., Cheberyachko 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. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Серія: Безпека життєдіяльності*. 2018. Вип. 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.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001103613>
18. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І., Дерюгін О. В. Розрахунок коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора 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., Cheberiyachko 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/ndipbor.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 аерозолю. *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>.

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/za-rozdilami/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>.

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/mateconf/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. Cheberichko S., Naumov N., Cheberichko 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. Cheberichko 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>.

46. 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.

47. 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.

48. 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

49. 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». № у 2020 06362; заявл. 01.10.2020; опубл. 05.05.2021, Бюл. № 18.

50. 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 у 2024 05107; заявл. 29.10.2024; опубл. 23.07.2025, Бюл. № 30. 4 с.

Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві в обґрунтуванні актуальності роботи [1, 2, 15-19], постановці наукової проблеми [3, 4, 21-24, 45], вирішеній в дисертаційній роботі, формулюванні мети і наукових задач досліджень, визначенні 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, 49], залежності між енерговитратами користувача [14, 38], концентрацією шкідливих речовин [25, 26, 28, 29]. Розробки концепції 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 [27, 32, 48, 50]. В обґрунтуванні новітніх методів випробувань респіраторів. У плануванні та проведенні експериментальних виробничих й лабораторних досліджень захисних властивостей універсальних респіраторів [46, 47], а також в аналізі та систематизації отриманих результатів.

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 респіраторів, геометричними параметрами фільтрувальних коробок і залишковим часом захисної дії, що безпосередньо впливає на енерговитрати користувача та ефективність роботи фільтрів.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасного стану розробки та експлуатації фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання. Розглянуто еволюцію конструкцій фільтрувальних респіраторів, принципи формування аеродинамічних каналів, підходи до вибору фільтрувальних матеріалів і особливості моделювання повітряних потоків у фільтрувальних елементах. Проаналізовано вимоги чинних стандартів до показників ефективності ЗІЗОД.

Досліджено конструктивні особливості фільтрувальних півмасок, масок і капюшонів, а також вплив геометрії та ущільнювальних елементів на коефіцієнт захисту. Наведено аналіз моторових фільтрувальних респіраторів провідних виробників (3M, Honeywell, Scott Safety), що дозволило сформулювати технічні вимоги до перспективного МФР.

Узагальнено властивості сучасних фільтрувальних матеріалів і методи визначення часу захисної дії. Обґрунтовує необхідність удосконалення конструкції фільтрувальних коробок з урахуванням аеродинаміки та геометрії.

У **другому розділі** наведено результати досліджень, спрямованих на удосконалення лицевої частини респіраторів. Проаналізовано вплив носіння респіраторів та захисного капюшона на когнітивні функції користувачів і встановлено, що тривале використання без перерв може підвищувати втому внаслідок зміни мікроклімату підмаскового простору.

Розроблено нову конструкцію лицевої частини універсального респіраторів на основі капюшонної схеми з гнучкого багатошарового матеріалу та удосконаленою системою кріплення, що забезпечує рівномірний розподіл

навантаження і підвищення комфорту. Виконано розрахунок параметрів шланга повітропостачання з урахуванням гідродинамічних особливостей потоку.

Досліджено вплив конструкції капюшона на мовну комунікацію та працездатність користувачів. Підтверджено ефективність запропонованих рішень з використання оптимізованої форми капюшону.

У третьому розділі представлено розробку моторового фільтрувального респіратора з капюшоном, що містить інтегрований фільтрувальний модуль, вентилятор, блок керування з сенсорним моніторингом параметрів повітря та капюшон, суміщений із захисною каскою. Запропонована конструкція забезпечує комплексний захист голови й органів дихання та підвищує зручність експлуатації.

Проведено FMEA-аналіз, створено комплект конструкторської документації та виготовлено експериментальний зразок. Випробування підтвердили відповідність нормативним вимогам за показниками захисної ефективності, герметичності, ергономічності та рівня шуму, що дозволяє застосування респіратора в умовах хімічних, біологічних і техногенних загроз.

Досліджено вплив дихальної активності користувача на масообмін у внутрішньому об'ємі капюшона та розроблено математичну модель МФР, яка пов'язує параметри вентилятора, опір фільтра, геометрію шланга і швидкість подачі повітря, що дало змогу визначити оптимальні режими роботи для різних рівнів навантаження.

У четвертому розділі наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень скомбінованих фільтрів для універсальних респіраторів. Показано переваги циліндричних конструкцій з модифікованим вхідним потоком, які забезпечують більш рівномірний розподіл повітря.

Сформовано принципи поєднання механічного й хімічного фільтрування та запропоновано ароматичний індикатор ресурсу фільтра. Розроблено програмне забезпечення для прогнозування часу захисної дії з урахуванням параметрів дихання, режиму роботи та геометрії фільтрів.

У п'ятому розділі виконано комплексне чисельне моделювання конструкції універсального фільтрувального респіратора. На основі моделювання в програмному продукті SolidWorks Flow Simulation обрано оптимальну геометрію фільтрувальної коробки.

Визначено залежності між параметрами конфігурації фільтра та його ефективністю, що дало змогу підвищити фільтрувальну здатність без зростання опору диханню. Розроблено систему контролю ресурсу фільтра з використанням сенсорного та механічного індикаторів.

Узагальнення результатів підтвердило, що оптимізація геометрії фільтрувальної коробки та конфігурації фільтра забезпечує підвищення ефективності очищення повітря, зниження опору диханню та покращення ергономічних характеристик універсального респіратора.

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

ABSTRACT

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

Thesis for the degree of Doctor of Sciences in the specialty 05.26.01 – Occupational Safety – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation paper, which is a completed scientific research work, solves an important scientific problem in the field of occupational safety related to providing workers with energy-efficient and ergonomic individual respiratory protective devices for hazardous industrial environments. These devices are adaptable to specific production tasks. This is achieved by determining the patterns between the user's physical and cognitive energy expenditures and the effective protection time of the filtering system, which depends on the dynamics of carbon dioxide accumulation inside the hood's internal volume and the distribution of aerodynamic characteristics of the airflow in the under-mask space of the protective hood.

In the first chapter, a comprehensive analysis of the current state of development and operation of filtering respiratory protective devices (RPDs) was conducted. The evolution of filtering respirator designs, principles of forming aerodynamic channels, approaches to the selection of filtering materials, and features of airflow modeling inside filtering elements were reviewed. Classical and modern approaches to RPD design were compared, and the requirements of standards that establish performance criteria such as penetration of harmful substances, breathing resistance, tightness of fit, and ergonomics were outlined.

The operational features of half-masks and filtering-type full-face masks were analyzed, particularly the influence of the geometry and characteristics of sealing elements on the protection factor. An analysis of the designs of powered air-purifying respirators (PAPRs) from leading manufacturers 3M Versaflo TR-600, Honeywell North Primair PA7000, and Scott Safety Duraflow SRS was provided. This allowed the formulation of technical requirements for a prospective PAPR.

The properties of filtering materials (fibrous, carbon, composite, and nanostructured) were examined, and their sorption capacity and resistance to aggressive environments were determined. Methods for determining the protective service life of RPDs were summarized, and the shortcomings of traditional approaches were identified. It was established that one of the main reasons for reduced efficiency is the formation of “dead zones,” which leads to incomplete use of the material and increased breathing resistance. Based on the analysis, the need to improve the designs of filtering cartridges was substantiated, taking into account aerodynamics, body geometry, and uniform airflow velocity distribution.

In the second chapter, the results of research on improving the facepiece of the respirator are presented. The impact of wearing a respirator and protective hood on users' cognitive functions specifically reaction speed, attention, and accuracy of actions was investigated. It was found that short-term wearing does not impair, and

sometimes even optimizes, the psychophysiological state. However, prolonged continuous use increases fatigue due to changes in the microclimate.

A new design of the facepiece for a universal respirator made of flexible multilayer material with an improved fastening system was developed. The integration of the facepiece in the form of a hood was proposed, which evenly distributes the load across the entire surface of the head and eliminates local pressure points. This design improves comfort and reduces the risk of skin irritation during prolonged use.

The parameters of the hose for optimal air supply were calculated: diameter, length, and flexibility were determined, and a hydrodynamic analysis was performed taking turbulence into account. The quality of speech communication while wearing the hood was investigated. It was established that rigid materials and a small internal chamber reduce speech intelligibility. In contrast, the improved hood design preserves the natural voice.

The impact of the design on work capacity was evaluated by measuring parameters of the cardiovascular and respiratory systems, fatigue levels, and visual and auditory indicators. The optimized shape reduces thermal load and improves ventilation, providing a 10–15% increase in fatigue resistance. In conclusion, it was proven that the use of the hood-type design provides comprehensive improvement in ergonomic, cognitive, and functional performance.

In the third chapter, the development of a powered air-purifying respirator (PAPR) with a hood is presented. The proposed concept includes an integrated filtering module, a fan, a control unit with sensory monitoring of air parameters, and a hood combined with a protective helmet. This system provides comprehensive protection for the head, neck, and respiratory organs while increasing operational convenience.

An FMEA analysis of the design was conducted, potential risks were identified, and measures to eliminate them were developed. A complete set of design documentation was created for three main units the hood, the powered unit, and the hose. The hood is made of multilayer material with a transparent panel and ventilation channels. The powered unit contains a compact fan, electric motor, high-capacity battery, and a self-diagnostic system.

Compliance testing with regulatory requirements was performed. The experimental prototype provided the required level of filtration efficiency, low noise, ergonomics, and tightness, and can be certified for use in conditions involving chemical, biological, and man-made threats.

Separately, the influence of the user's breathing activity on mass transfer inside the hood's internal volume was studied. A breathing machine with different ventilation modes was used to simulate various levels of physical activity. It was established that breathing intensity significantly affects the gas mixture purification processes and must be taken into account when designing respirators.

A mathematical model of the PAPR was developed, which relates the characteristics of the fan, filter resistance, hose geometry, and airflow rate. The model made it possible to determine optimal operating modes for different levels of user activity.

In the fourth chapter, theoretical and experimental studies of combined filters for universal respirators are presented. The influence of operating conditions on the rate of sorbent saturation was analyzed, and it was found that under intense workloads, the protective service life can decrease by up to 40%. The optimal geometric parameters of the filter housing were investigated, and the advantages of cylindrical designs with modified inlet flow, which improve airflow uniformity, were established.

Principles for combining mechanical and chemical filtration were formulated, and the optimal ratio of layers was determined. An innovative aromatic indicator in a chloride-sodium capsule was proposed, which notifies the user when the filter's service life is exhausted.

Software for modeling the protective service life of filters was developed, taking into account breathing parameters, operating mode, and filter geometry. The algorithm predicts the saturation of the filtering layer and allows optimization of the design for specific operating conditions.

In the fifth chapter, comprehensive modeling of the universal filtering respirator design was carried out. The influence of the filtering cartridge shape on pressure drop was investigated. It was established that smooth contours and round openings provide the lowest resistance. Modeling in SolidWorks revealed "dead zones" inside irrational designs, which contributed to the selection of the optimal geometry.

Dependencies between filter configuration parameters (thickness, area, fold inclination angle) and their efficiency were established. Optimization of the configuration provided an increase in filtration capacity without increasing breathing resistance. A filter service life monitoring system based on a sensor unit and a mechanical indicator of harmful substance accumulation was developed.

Generalization of the results showed that optimizing the geometry of the filtering cartridge, filter configuration, and resource monitoring system allows the creation of a universal respirator with improved cleaning efficiency, reduced breathing resistance, and high ergonomics.

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

РАДЧУК Дмитро Ігорович

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

(Реферат)

Здано на складання 08.05.2026 р. Підписано до друку 08.05.2026 р.

Формат 210х48. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,9.

Тираж 50 прим. Зам. № 511

Видавництво ПП Вахмістров О.Є.

Адреса видавництва та друкарні: 49000,

Дніпро, вул. Писаржевського, буд. 18

тел. +380633598309

ел. адреса: 8102@ukr.net