

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Бочковського Андрія Петровича на дисертаційну роботу Радчука Дмитра Ігоровича на тему: «Наукове обґрунтування та вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном», яка представлена на здобуття ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – охорона праці.

Відгук складено на основі вивчення дисертаційної роботи, опублікованих здобувачем результатів дисертаційного дослідження та матеріалів, які містять підтвердження щодо практичного впровадження результатів дослідження.

1. Обґрунтування актуальності теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами і темами

Сучасні виробничі умови в Україні, особливо в гірничодобувній промисловості, хімічній та медичній галузях, характеризуються високим рівнем техногенних ризиків та впливом різноманітних шкідливих чинників, що проникають через органи дихання. Традиційні засоби індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) орієнтовані переважно на один тип забруднення, що не забезпечує комплексного захисту користувачів у складних та тривалих умовах експлуатації. Особливо гострою залишається проблема ефективного управління тепловим станом користувача в ізольованому підкапюшонному просторі та накопиченням діоксиду вуглецю в лицевих частинах моторових респіраторів.

Дисертаційна робота Д.І. Радчука присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання — науковому обґрунтуванню та вдосконаленню конструкцій моторових фільтрувальних респіраторів (МФР) з капюшоном із забезпеченням автоматичного регулювання об'єму повітряного потоку відповідно до характеру фізичного навантаження користувача. Автор обґрунтовує необхідність створення універсальних адаптивних систем капюшонного типу, що мінімізують вплив факторів, які обмежують енергоефективність та ергономічність при змінних фізичних навантаженнях.

Актуальність дослідження підтверджується його виконанням у рамках планових науково-дослідних тем НТУ «Дніпровська політехніка» та Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища і людини, зокрема: «Розробка універсальних засобів індивідуального захисту пролонгованої дії подвійного призначення» (№ ДР 0117U000376, 2017–2018 рр.) та «Розробка процесу керування ризиками шляхом удосконалення засобів індивідуального захисту та систем моніторингу безпеки техногенних об'єктів» (№ ДР 0125U002025 з 2025 року). Робота відповідає пріоритетам державної політики у сфері охорони праці та цивільної безпеки, схваленим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність і наукова новизна

Автор дисертації обґрунтував актуальність теми, визначив об'єкт і предмет дослідження, поставив мету та детально сформулював завдання. Робота має комплексний, логічно структурований характер, спирається на теоретичну базу

та сучасну методологічну основу, включаючи принципи стандартів ДСТУ EN 12941, EN 14387 та метод FMEA (ДСТУ EN IEC 60812:2022).

Достовірність результатів забезпечена використанням адекватних методів дослідження: системно-структурного аналізу, методів математичної статистики, комп'ютерного моделювання в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation, CFD-моделювання гідродинаміки внутрішніх потоків повітря, натурних експериментів з використанням дихальної машини за стандартною методикою ISO 16900-5, а також апробації на виробництві ТОВ НВП «СТАНДАРТ». Висновки ґрунтуються на емпіричних даних, отриманих у лабораторних та виробничих умовах, з похибкою вимірювань, що не перевищує 15 %.

3. Наукова новизна дисертації полягає у:

- розробці нової концепції моторового фільтрувального респіратору з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою, що забезпечує високий рівень захисту й надійності;

- розробці нової математичної моделі функціонування моторового фільтрувального респіратору, яка описує зміну тиску та витрати повітря в системі «фільтр — вентилятор — повітропровід — капюшон» на основі передавальної функції першого порядку, що враховує специфіку негерметичної (відкритої) системи з вільним підмасочним простором;

- встановленні закономірності між збільшенням швидкості повітряного потоку з 60 до 200 $\text{дм}^3/\text{хв.}$ і скороченням коливань внутрішнього тиску ($P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$) 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;

- обґрунтуванні залежності ефективного часу об'ємного оновлення повітря у капюшоні від витрати повітря з урахуванням експериментально отриманого коригувального коефіцієнта, що дозволяє врахувати не лише геометричні параметри лицевої частини, а й динаміку масообміну, зумовлену вентиляцією легень;

- обґрунтуванні залежності аеродинамічного опору протиаерозольного фільтра як функції 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;

- виявленні нелінійної залежності між енерговитратами користувача, концентрацією шкідливих речовин та ефективністю роботи фільтрів, що визначає зниження часу захисної дії при підвищених фізичних навантаженнях.

4. Практична значення дисертаційної роботи полягає у

- розробці алгоритму розрахунку коефіцієнта конфігурації складчастих фільтрів та програмний комплекс для прогнозування часу захисної дії фільтрів з похибкою не більше 10 % від реальних даних;

- обґрунтовані раціонального діаметру повітропроводу (32 мм), що забезпечує раціональну подачу повітря відповідно до режиму дихання та енерговитрат користувача;

- 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.

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.

5. Оцінка змісту дисертаційної роботи та повноти відображення її результатів у опублікованих працях

Дисертація має класичну структуру, чітко викладений матеріал, ілюстрована таблицями та рисунками. Автор проаналізував сучасний стан проблеми, виявив прогалини в існуючих підходах і запропонував наступні інструменти: нову конструкцію МФР з капюшоном, математичну модель системи, програмний комплекс для прогнозування часу захисної дії, методику оцінювання розбірливості мовлення та систему контролю ресурсу фільтра.

У вступі автор обґрунтовує актуальність теми, формулює мету дослідження, розбиває її на конкретні завдання, визначає об'єкт і предмет вивчення. Окремо зазначено методологічну основу роботи, підкреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Також подано інформацію про апробацію дослідження та загальну логіку побудови дисертації.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розробки, виробництва та експлуатації фільтрувальних ЗІЗОД. Розглянуто еволюцію конструкцій фільтрувальних респіраторів, принципи формування аеродинамічних каналів, підходи до вибору фільтрувальних матеріалів, особливості моделювання повітряних потоків усередині фільтрувальних елементів. Проаналізовано конструкції МФР провідних виробників (3M Versaflo TR-600, Honeywell North Primair PA7000, Scott Safety Duraflow SRS), що дозволило сформулювати технічні вимоги до перспективного МФР. Встановлено,

що основними причинами недостатнього рівня захисту є конструктивні недоліки, недосконалість нормативної бази, застосування невідповідних композицій фільтрувальних матеріалів, а також помилки з вибору, обслуговування та експлуатації ЗІЗОД.

У другому розділі розроблено та експериментально обґрунтовано концептуальну модель захисного капюшона. Для визначення антропометричних характеристик було залучено 412 добровольців (210 чоловіків і 202 жінок). Отримано параметричну таблицю, яка стала основою для побудови двох типових цифрових моделей капюшонів (типорозміри М та L). Розрахунок конструктивних параметрів системи подачі й відведення повітря проводили за допомогою SolidWorks Flow Simulation на основі рівнянь Нав'є-Стокса. Результати моделювання показали, що збільшення швидкості повітряного потоку з 60 до 200 $\text{дм}^3/\text{хв.}$ зумовлює скорочення коливань внутрішнього тиску та часу очищення у 3,3 рази. Експлуатаційні випробування на 15 добровольцях підтвердили відсутність впливу на когнітивні функції після 1-годинного безперервного носіння ($p > 0,05$) та високий рівень суб'єктивної оцінки ергономічних характеристик (середній бал 4,8 за п'ятибальною шкалою).

У третьому розділі удосконалено математичну модель руху повітряного потоку в моторовому фільтрувальному респіраторі із захисним капюшоном. Проведено оцінку ризиків функціонування системи методом FMEA, що дозволило знизити виявлені ризики до прийнятного рівня. Отримано передавальну функцію першого порядку, яка враховує статичну чутливість системи та специфіку негерметичної системи з вільним підмасочним простором. Визначено коригувальну функцію, що враховує інтенсивність виконуваних робіт. Розроблено моторовий блок із сенсорною системою моніторингу на базі мікроконтролера Arduino. Лабораторні випробування підтвердили відповідність вимогам ДСТУ EN 12941: опір повітряному потоку 28 Па (вимога не більше 350 Па), рівень шуму 48–51 дБ(А) (вимога не більше 75 дБ(А)), загальний коефіцієнт проникнення тест-аерозолі 0,916 % (клас захисту TH2).

У четвертому розділі виконано розрахунок конструктивних параметрів протигазових фільтрів. Встановлено, що зміщення вихідного отвору від центру фільтрувальної коробки на 10 % призводить до погіршення часу захисної дії на 40 %, тоді як збільшення проміжку між адсорбентом і нижньою стінкою коробки на 10 % збільшує час захисної дії до 20 %. Запропоновано комплексні коефіцієнти комфортності, ефективності та продуктивності фільтра. Розроблено програмний комплекс для розрахунку прогнозованого часу захисної дії протигазових фільтрів на основі удосконаленого рівняння Віллера-Джонаса з урахуванням типу та інтенсивності виконуваної роботи.

У п'ятому розділі проведено розрахунок конструктивних параметрів протиаерозольних фільтрів. Запропоновано коефіцієнт конфігурації, що характеризує розподіл повітряного потоку за утвореними каналами між складками фільтрувальної поверхні. Встановлено залежності коефіцієнта конфігурації від кількості складок для прямокутного та конусоподібного фільтрів. Підтверджено, що конструкція коробок фільтрів з центральним отвором є доцільнішою для використання у фільтрувальних системах з обмеженим простором. Розроблено систему контролю перепаду тиску та залишкового ресурсу фільтра на основі важільної системи з рухомою перегородкою.

Результати дисертаційного дослідження відображено в опублікованих працях здобувача. Зокрема, основні результати опубліковано у 57 роботах, у тому числі 3 навчальних посібниках, 45 статях у наукових фахових виданнях (з них 7 у міжнародних та вітчизняних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 8 публікаціях у збірниках матеріалів конференцій, 2 патентах на корисну модель та 7 публікаціях в інших виданнях.

6. Значення дисертаційної роботи для науки, практики та суспільства

Наукове значення дисертаційної роботи полягає в розвитку теоретичних і методологічних засад проектування моторових фільтрувальних респіраторів з капюшоном. Автор уперше розробив математичну модель функціонування МФР на основі передавальної функції першого порядку для негерметичної системи з вільним підмасочним простором, встановив закономірності зміни коефіцієнта конфігурації фільтрувальних матеріалів від щільності упакування волокон та відношення відстані між гофрами до їх висоти, а також сформував уточнену модель розподілу повітряного потоку на поверхні складчастого фільтра з урахуванням розташування вхідних і вихідних отворів фільтрувальних коробок.

Наукова новизна роботи підтверджується розробкою нової конструкції МФР з автоматичним регулюванням повітряного потоку, сенсорною системою моніторингу та інтеграцією капюшона з каскою. Запропонований програмний комплекс для прогнозування часу захисної дії фільтрів, алгоритм розрахунку коефіцієнта конфігурації та методика оцінювання розбірливості мовлення у респіраторах суттєво розвивають існуючі підходи до проектування ЗІЗОД.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в розробці інструментів і рекомендацій, готових до безпосереднього впровадження. Автор створив програмний комплекс для прогнозування часу захисної дії фільтрів з похибкою не більше 10 %; систему контролю перепаду тиску та залишкового ресурсу фільтра; методику оцінювання розбірливості мовлення; алгоритм розрахунку коефіцієнта конфігурації для проектування нових фільтрів. Розроблений експериментальний зразок МФР відповідає технічним вимогам ДСТУ EN 12941 та готовий до сертифікації.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес підготовки здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей 263 Цивільна безпека та 184 Гірництво при вивченні дисциплін «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих», «Сучасні засоби індивідуального захисту працюючих» та «Проектування технічних засобів та заходів безпеки», а також у виробництво засобів індивідуального захисту органів дихання у ТОВ НВП «СТАНДАРТ».

Суспільне значення дисертаційної роботи є особливо актуальним в умовах воєнного стану в Україні та підвищених техногенних навантажень. Запропоновані підходи сприяють збереженню здоров'я працівників критичної інфраструктури, зниженню рівня професійних захворювань, пов'язаних із впливом шкідливих аерозолів, газів та біологічних агентів. Реалізація рекомендацій дисертації дозволяє підвищити загальну культуру безпеки праці та зменшити економічні втрати підприємств від неефективного використання ЗІЗОД.

Економічне значення дисертаційної роботи полягає у скороченні витрат на закупівлю імпортованих ЗІЗОД до **2–4 млн грн на рік** для гірничого підприємства, за рахунок комбінації зниження витрат на закупівлю фільтрів, подовження їх терміну служби, зменшення енерговитрат, зниження витрат від профзахворюваності та підвищення продуктивності праці. При цьому соціально-економічний ефект від збереження здоров'я працівників є значно вищим і важко піддається прямій грошовій оцінці.

7. Перевірка на дотримання академічної доброчесності

Ознайомлення з текстом дисертаційної роботи, опублікованими статтями і матеріалами автора дозволяє зробити висновок, що порушень принципів академічної доброчесності не виявлено. Усі випадки використання ідей, наукових результатів, цитат чи текстів інших дослідників супроводжуються коректними та повними посиланнями на першоджерела. Бібліографічне оформлення виконано належним чином.

8. Дискусійні моменти, зауваження та пропозиції щодо змісту й оформлення дисертації

1. Автор обґрунтовано наголошує на необхідності автоматичного регулювання повітряного потоку відповідно до фізичного навантаження. В той же час, у дисертації недостатньо уваги приділено питанням оптимізації алгоритмів керування вентилятором у реальному часі з урахуванням нелінійностей системи та можливих затримок сенсорного моніторингу. У сучасних умовах впровадження запропонованої системи на підприємствах з різним рівнем організаційно-технічного розвитку може бути ускладнене через необхідність адаптації програмного забезпечення до конкретних умов експлуатації.

2. Запропонований підхід до визначення коефіцієнта конфігурації складчастих фільтрів потребує більш детальної експериментальної верифікації для широкого діапазону фільтрувальних матеріалів з різними властивостями волокон та щільністю упакування. Зокрема, у роботі недостатньо розкрито механізм врахування взаємного впливу геометричних параметрів складок та аеродинамічних характеристик потоку при тривалій експлуатації фільтра в умовах високої запиленості.

3. У роботі бракує детальних рекомендацій щодо гармонізації розроблених інструментів і процедур управління ресурсом фільтрів з вимогами чинного українського законодавства у сфері охорони праці, зокрема з положеннями Закону України «Про охорону праці» та нормативно-правових актів, що регулюють діяльність суб'єктів господарювання щодо забезпечення працівників ЗІЗОД. Доцільно було б доповнити розділ практичних рекомендацій аналізом відповідності розробленої системи вимогам технічного регламенту та процедур оцінки відповідності.

4. Окремі формулювання в тексті дисертації мають дещо надмірно технічний характер і потребують більшої систематизації при викладі методологічних положень. Зустрічаються також довгі технічні описи, що певною мірою ускладнюють сприйняття загальної логіки дослідження. Доцільно було б

оптимізувати структуру окремих розділів шляхом виділення ключових висновків у формі підрозділів узагальнення.

5. Автором недостатньо висвітлено питання можливих методологічних обмежень дослідження, зокрема суб'єктивності оцінок користувачів під час ергономічних випробувань, впливу індивідуальних антропометричних відмінностей на результати моделювання та потенційних похибок вимірювання при оцінці когнітивних показників працездатності.

При цьому, висловлені зауваження і дискусійні положення не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

9. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

За критеріями актуальності, рівня новизни, ступеня наукової обґрунтованості, а також теоретичної й практичної значущості дисертація повністю відповідає вимогам спеціальності 05.26.01 «Охорона праці». Робота відповідає положенням нової редакції Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19 травня 2023 року № 502 (зі змінами), постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 р. № 1197 «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», затвердженому «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», а також наказу Міністерства освіти і науки України від 23.09.2019 року № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора та кандидата наук», зареєстрованого у Міністерстві юстиції України 08.10.2019 р. за № 1086/34057.

Враховуючи успішне вирішення актуального наукового завдання – наукового обґрунтування та вдосконалення конструкцій засобів індивідуального захисту органів дихання з капюшоном із забезпеченням автоматичного регулювання об'єму повітряного потоку відповідно до характеру фізичного навантаження користувача, вважаю, що **Радчук Дмитро Ігорович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 «Охорона праці».**

Офіційний опонент

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри цивільної безпеки
і охорони праці Національного університету
«Одеська політехніка»

А.П. Бочковський

Ученый секретар
Національного
«Одеська політехніка»

Влада Трокопів