

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



ЧЕБЕРЯЧКО ЮРІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 622.87:614.894.3

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
ПРОЦЕСІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПІДБОРУ І ВИКОРИСТАННЯ
ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПІРАТОРІВ**

Спеціальність: 05.26.01 – охорона праці

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі аерології та охорони праці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України

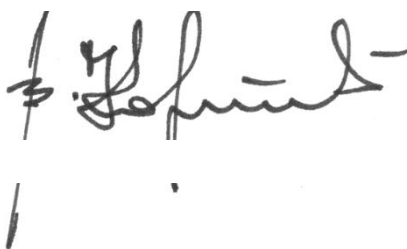
- Науковий консультант** - доктор технічних наук, професор
ГОЛІНЬКО ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри аерології та охорони праці.
- Офіційні опоненти:** - доктор технічних наук, старший науковий співробітник
КРУЖИЛКО ОЛЕГ ЄВГЕНОВИЧ,
Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки і охорони праці Держпраці України та Національної академії наук України (м. Київ), завідувач науково-дослідного відділу інформаційних технологій;
- доктор технічних наук, доцент
ЛАПШИН ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ,
Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки;
- доктор технічних наук, доцент
СУКАЧ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри охорони праці, цивільної та промислової безпеки.

Захист дисертації відбудеться «14» березня 2019 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. 47-24-11.

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

Автореферат розісланий «12» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., проф.



В.І. Корнієнко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Серед професійних захворювань, зафіксованих у 2017 – 2018 рр., перше місце належить хворобам органів дихання – 40,1 % від загальної кількості професійних захворювань. Це є наслідком забруднення повітря робочої зони шкідливими аеродисперсними частинками (пил, дим, туман), газами та парами, відсутності або використання засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД), які не відповідають вимогам щодо їх функціонального призначення та антропометричними розмірами облич користувачів.

Ефективність ЗІЗОД залежить від властивостей фільтрів, конструкції фільтрувальних коробок, щільності прилягання півмаски до обличчя та часу захисної дії. Сучасні фільтри забезпечують достатній ступінь захисту при уловлюванні навіть субмікронних частинок. Тоді як конструкція коробок, у яких вони розміщені, не дозволяє повністю використовувати їх ресурс, що зменшує час захисної дії респіраторів. Найбільше на захисні властивості ЗІЗОД впливає утворення зазорів між півмаскою і обличчям через недосконалість конструкції обтюратора (ущільнювача), яка не в змозі врахувати відмінності антропометричних характеристик облич. Це вимагає проведення відповідних досліджень для побудови цифрових моделей поверхонь півмасок, які дозволять скоригувати їх будову. Крім того, однією з сучасних тенденцій розширення асортименту ЗІЗОД є уніфікація конструкцій півмасок, для їх швидкого виготовлення з урахуванням функціонального призначення відповідно до умов праці. Виникає необхідність у розробці алгоритму автоматизованого проектування, що дозволить швидко вносити коригування та отримувати кінцевий зразок продукції. Як на етапі проектування, так і під час експлуатації важливо постійно контролювати ефективність роботи різних елементів респіраторів, що потребує розробки відповідних методів контролю експлуатаційних параметрів ЗІЗОД.

Таким чином, підвищення ефективності індивідуального протипилового захисту працівників з урахуванням сукупної дії чинників, що впливають на захисні властивості засобів індивідуального захисту органів дихання, є актуальною проблемою у різних галузях промисловості.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до «Програми підвищення безпеки праці на вугледобувних та шахтобудівних підприємствах», затвердженою законом України від 29 березня 2006 р. N 374. До дисертаційної роботи увійшли результати досліджень, які виконані згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка» та Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища і людини за темами: «Розробка методів діагностики показників якості протипилових респіраторів відповідно до європейських стандартів» (№ держ. реєстрації 0111U000749, 2011 р.); «Наукові засади просторово-неоднорідної системи «масив-кріплення» з урахуванням контролю умов праці в шахтах за пиловим фактором» (№ держ. реєстрації 0112U000869; 2012 р.); «Підвищення ефективності протипилового індивідуального захисту працівників гірничих підприємств» (№ держ. реєстрації 0114U000620, 2014 р.);

«Ресурсозберігаюча геотехнологічна і гідродинамічна параметризація видобутку малопотужних запасів мінеральної сировини у техногенно навантаженому середовищі» (№ держреєстрації 0117U006753, 2017 р.); «Розробка універсальних засобів індивідуального захисту пролонгованої дії подвійного призначення» (№ держ. реєстрації 0117U000376, 2017 р.), у яких автор брав участь як виконавець.

Мета роботи – створення теоретичних засад підвищення захисної дії фільтрувальних респіраторів шляхом удосконалення їх конструкції і пристосування респіраторів до умов експлуатації та антропометричних особливостей обличчя працівників.

Сформульована мета роботи зумовлює необхідність розв’язання таких наукових задач досліджень:

1. Визначити сукупність чинників індивідуального та виробничого характеру, які впливають на захисну дію фільтрувальних респіраторів на основі аналізу і досліджень коефіцієнтів захисту у виробничих та лабораторних умовах.

2. Виконати статистичний аналіз антропометричних особливостей обличчя працівників у виробничих умовах та побудувати цифрову 3D модель голови як основу вдосконалення півмаски, обтюратора та наголів’я.

3. Виявити сучасні тенденції конструювання ЗІЗОД та дослідити можливості 3D моделювання конструкцій півмасок респіраторів та фільтрувальних коробок до них.

4. Дослідити процес обтікання півмасок та фільтрувальних коробок повітряним потоком для визначення коефіцієнта захисту з урахуванням щільності прилягання півмасок.

5. Розробити оперативні методи контролю захисної ефективності фільтрувальних респіраторів.

6. Розробити алгоритм конструювання півмасок фільтрувальних респіраторів з високим рівнем їх уніфікації та оперативної модифікації відповідно до особливостей обличчя та голови користувачів і умов експлуатації, виготовити експериментальні зразки із застосуванням засобів об’ємного 3D друку та перевірити їх ефективність.

7. Експериментально оцінити захисні та ергономічні характеристики запропонованих фільтрувальних респіраторів у лабораторних і виробничих умовах.

Об’єкт дослідження – протиаерозольні засоби індивідуального захисту органів дихання працюючих.

Предмет дослідження – процес створення фільтрувальних респіраторів з врахуванням умов експлуатації та антропометричних особливостей обличчя працівників.

Методи дослідження. Для дослідження використовували системний аналіз та математичне моделювання як засоби вирішення поставлених завдань. Під час формування моделей для теоретичного розрахунку захисних властивостей протипилових респіраторів використано основні положення теорії нестационарного фільтрування та гідроаеродинаміки. Для побудови цифрової моделі голови використаний метод Нелдера – Міда, що відтворює окремі риси

облич; для побудови поверхні півмаски використане рівняння вільної енергії вигнутої довільної пластинки, яка описується двовимірною сплайн-поверхнею, її невідомі коефіцієнти встановлюються методом лінійної інтерполяції на основі даних тривимірних координат ключових точок антропометричних рис облич. Розрахунок руху пилового потоку біля півмасок і всередині фільтрувальної коробки для визначення коефіцієнту захисту респіраторів та аеродинамічного опору здійснено методом найменших квадратів, кінцевих елементів і локальних варіацій. Перевірку адекватності запропонованої математичної моделі здійснювали методами математичної статистики при обрахунку натурних експериментів з визначення основних показників респіраторів, здійснених сучасними вимірювальними приладами за методиками, які відповідають чинним державним стандартам.

Наукові положення , що захищаються в дисертації:

1. Форма сплайн-функції, яка описує поверхню півмаски, задається полігональною моделлю обличчя та визначається тривимірними координатами, які формуються за ключовими антропометричними рисами обличчя працівника при виконанні ним виробничих операцій.

2. Перепад тиску на фільтрувальних коробках респіраторів визначається не тільки коефіцієнтом опору фільтрів та витратою повітря через них, а й співвідношенням діаметрів її вихідного і вхідного отворів, раціональне значення якого повинне знаходитися у діапазоні 0,4...0,8.

3. Час захисної дії респіратора залежить від поверхневої щільності багатошарового поліпропіленового фільтра та параметрів автофільтрувального шару пилу, який утворюється на його поверхні при швидкості фільтрування 90 – 150 дм³/хв та збільшує пиломісткість фільтра у два рази.

Наукові результати:

1. Уперше встановлені закономірності формування поверхні півмаски фільтрувальних респіраторів та конструкції їх обтюраторів, ґрунтуючись на даних тривимірних координат ключових точок антропометричних параметрів обличчя працівників при різних виробничих операціях.

2. Уперше побудована математична модель поверхні півмаски фільтрувального респіратора на основі тривимірної поверхні обличчя, що задається полігональними геометричними елементами, яку покладено в основу конструкції півмаски з підвищеною щільністю прилягання її обтюратора до обличчя користувача.

3. Уперше встановлено вплив параметрів фільтрувального матеріалу та властивостей пилового аерозолу (переважно його дисперсного складу) на утворення автофільтрувального шару на поверхні волокон фільтра респіратора, який при раціональному виборі співвідношення діаметрів волокон і домінуючих розмірів пилових частинок, збільшує термін захисної дії фільтра респіратора.

4. Вперше розроблено метод вимірювання температури поверхні обтюратора тепловізором на основі опрацювання вихідних сигналів, що дозволяє здійснювати оперативний контроль місць утворення зазорів уздовж смуги обтюраторії, виявляти

погіршення ізолювальних властивостей протипилового респіратора та обчислювати коефіцієнт його захисту.

5. Вдосконалено математичну модель руху пилового потоку в фільтрувальній коробці респіратора, яка на відміну від існуючої враховує не тільки параметри фільтра, а і геометричні розміри самої коробки, які впливають на швидкість фільтрування, це дозволило встановити їх вплив на захисні властивості фільтра, включаючи діаметр волокон, щільність їх упакування та товщину шарів, необхідних для забезпечення адаптації респіраторів до умов експлуатації та забезпечення необхідного терміну захисної дії.

Практичне значення роботи.

1. Розроблено алгоритм побудови 3D моделі голови з визначенням координат ключових точок, за якими розраховуються параметри функції, що описує поверхню півмаски, та коефіцієнт захисту проектованої півмаски шляхом поєднання цифрових зображень обличчя і респіратора.

2. Розроблено методику перевірки якості респіраторів на основі визначення площі прилягання півмаски до обличчя, що дозволяє встановлювати коефіцієнт захисту респіраторів на етапі проектування та сприяє зменшенню помилок при формуванні каркасу, конструкції обтюратора наголів'я та вибору відповідних матеріалів для виготовлення півмасок.

3. Розроблено алгоритм проектування півмасок з урахуванням результатів 3D сканування облич, створення цифрових моделей голови та на їх основі – поверхні півмасок і конструкції обтюратора, каліброваного наголів'я та технічних характеристик високоефективних матеріалів, що скорочує час виготовлення півмасок, дозволяє забезпечити індивідуальний підхід і врахувати параметри конкретних умов експлуатації.

4. Визначено раціональні параметри фільтрувальної коробки, розміру вихідного отвору для забезпечення мінімального перепаду тиску та рівномірного розподілу пилового осаду на фільтрувальній поверхні.

5. Встановлено параметри фільтрувальних матеріалів для фільтрів попереднього очищення та режимів руху пило-газових потоків, які забезпечать утворення автофільтрувального шару, що збільшує реальний термін захисної дії фільтрів респіратора у 2 – 2,5 рази.

Впровадження результатів роботи. Розроблено рекомендації щодо перевірки щільності прилягання півмаски до обличчя, які впроваджені у випробувальній лабораторії ЗІЗОД Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища при проведенні процедури визначення захисних властивостей фільтрувальних респіраторів. Вдосконалено методику з визначення опору диханню при перевірці ЗІЗОД на стійкість до запилення респіраторів, яку впроваджено у випробувальній лабораторії технічної експертизи засобів колективного та індивідуального захисту органів дихання працюючих у ТОВ НВП «Стандарт». Розроблені рекомендації щодо вибору ЗІЗОД, відповідно до ДСТУ EN 529:2006, з оцінкою ризиків виникнення професійних захворювань при їх використанні, які впроваджені на вугільних шахтах ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля». Практичні результати роботи використано під час підготовки

підручника для студентів вищих навчальних закладів «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих» та впроваджено в навчальний процес кафедри аерології та охорони праці НТУ «Дніпровська політехніка» під час підготовки студентами кваліфікаційних робіт за другим рівнем вищої освіти (магістерським).

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

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій викладено авторський підхід до обґрунтування теоретичних засад конструювання фільтрувальних респіраторів підвищеної захисної дії шляхом удосконалення їх конструкції і пристосування до умов експлуатації та антропометричних особливостей обличчя працівників. Внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві, конкретизовано в списку публікацій.

Апробація результатів роботи. Основні наукові результати дисертаційної роботи було представлено на: School Underground Mining. Technical and geoinformational systems in mining: abstracts materials of IV International scientific-practical conference (Дніпро, 2011); міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства» (Київ, 2013); міжнародній науково-практичній конференції «Форум гірників» (Дніпро, 2013, 2014); міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності у ХХІ столітті» (Дніпро, 2013); міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі» (Кривий Ріг, 2017); міжнародній науково-практичній конференції “Informational Technologies in Science & Education” (Дніпро, 2017); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості та транспорту» (Дніпро, 2017); міжнародній науково-практичній конференції «Advanced Engineering Forum» (Дніпро, 2017); міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (Київ, 2017); міжнародній науково-практичній конференції «Ukrainian School of Mining Engineering» (Бердянськ, 2018).

Публікації. Усього за результатами дисертаційних досліджень опубліковано 55 робіт з них: 4 монографії, 28 статей у наукових фахових виданнях, 6 у міжнародних та вітчизняних виданнях, що включені до міжнародних

наукометричних баз, 10 – у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій та 7 патентів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (267 найменувань) на 282 сторінках і 4 додатків. Загальний обсяг дисертації – 396 сторінки, у тому числі 186 рисунків та 64 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі «Аналіз науково-технічної проблеми індивідуального захисту органів дихання» проведений аналіз ефективності використання засобів індивідуального захисту органів дихання під час різних технологічних процесів, який показав наявність суттєвих недоліків, пов'язаних зі зниженням захисних властивостей протипилових респіраторів під час їх експлуатації, що створює потенційну небезпеку розвитку професійних захворювань на пилову етіологію під впливом шкідливих аерозолів, які потрапляють до легень працівників. Для надійної профілактики професійних захворювань необхідно в першу чергу стимулювати роботодавців покращувати умови праці, створювати належну організацію процедури вибору ЗІЗОД, перевірки їх придатності до умов праці, навчання працівників та належне обслуговування на основі сучасного рівня науки.

Визначено, що основними показниками фільтрувальних респіраторів, від яких залежить захисна ефективність, є надійне ізолювання органів дихання, високоякісне очищення повітря і своєчасне застосування півмасок. Встановлено, що головною причиною погіршення захисних властивостей ЗІЗОД є нещільності прилягання півмасок до обличчя за смугою обтюраторії та низький термін захисної дії фільтрів. Проаналізовано конструкції складових елементів протипилових респіраторів для обґрунтування напрямів з підвищення захисту органів дихання працівників. Наприклад, використання надувного обтюратора, дискових клапанів товщиною 0,4 мм, суцільної смуги наголів'я в цілому зменшить коефіцієнт проникнення забрудненого повітря у підмасковий простір до 80 %, однак такі півмаски не знайшли широкого розповсюдження через складність їх виготовлення і експлуатації (підтримання необхідного тиску в камері обтюратора, можливість його пошкодження під час технологічних операцій та інше). Збільшення терміну захисної дії респіраторів до 60 % можливо за рахунок використання форфільтрів попереднього очищення та розробки алгоритму індивідуального проектування півмасок.

Процес конструювання захисних засобів можна охарактеризувати як комплекс робіт з проведення пошуку ідей, принципів, відповідних розрахунків та досліджень спрямованих на забезпечення заданих характеристик та розробки технічної

документації, необхідної для створення і виготовлення нового продукту відповідно до вимог технічного завдання. Багато хто з вітчизняних і зарубіжних учених працювали над створенням високоефективних ЗІЗОД. Найбільш відомі з них: Я.І. Трумпайц, С.М. Городинський, І.В. Петрянов, В.А. Кирш, П.І. Басманов, А.А. Енанн, В.І. Тарасов, С.Л. Камінський, Л.О. Миронов, О.Є. Кужилко, Б.М. Тюриков, О.В. Чиркін, О.О. Лапшин, В.Ф. Кирилов, С.В. Сукач, Т.Дж. Нельсон, С.Е. Колтон, С.Н. Танахил, А.Р. Джансен, П. Уайт, Р.С. Браун та ін. Цей процес можна подати у вигляді п'яти стадій: проектної, підготовчої, виробничої, оцінки відповідності та поствиробничої. На проектній стадії виконуються маркетингові й передпроектні дослідження і формується інформація для підготовчої стадії, на якій виконується організаційно-економічна підготовка виробництва і підготовка матеріалів. Конструювання ЗІЗОД на даний час у більшості випадків виконується евристичними методами, які ґрунтуються переважно на ерудиції та інтуїції розробників, досвіді попередніх розробок, баз даних про відомі аналоги. Такий підхід довготривалий і призводить до ситуацій, коли спроектована і виготовлена півмаска морально застаріла і не відповідає швидкозмінним умовам. Для прискорення виготовлення використовують принцип математичного моделювання, який дозволить значно скоротити у часі розрахунки параметрів конструктивних елементів респіраторів. Однак даний процес не враховує цілої низки важливих положень, які дозволяють забезпечити виготовлення сучасних ЗІЗОД з високими технічними характеристиками.

Важливо при розробці фільтрувальних респіраторів враховувати:

- особливості формування каркасу півмаски під час визначеного впливу комплексу факторів, які б враховували зміну антропометричних характеристик обличчя працівників;

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

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

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

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

У другому розділі «Експериментальна оцінка у виробничих і лабораторних умовах захисних властивостей сучасних фільтрувальних респіраторів» визначено, що захисна ефективність протипилових респіраторів у лабораторних і виробничих умовах суттєво відрізняється через невідповідність методів випробувань реальним умовам експлуатації та впливу людського чинника. Встановлено, що коефіцієнт проникнення у лабораторних умовах за тест-аерозолем «вугільний пил» складає 0,08...0,1 % та зменшується в міру накопичення велико-дисперсної фракції

вугільного пилу між волокнами фільтру. Тоді як у виробничих умовах вугільної шахти зафіксовано, що він у декілька разів більший та поступово зростає через погіршення ізолювальних властивостей півмасок, зумовлених ростом опору дихання фільтрів (рис. 1).

Виявлено, що захисні властивості поліпропіленових фільтрів не є постійною величиною і залежать від умов експлуатації. Наприклад, в умовах підвищеної вологості й температури їх показники з часом погіршуються за рахунок зменшення величини поверхневого електростатичного заряду. Так, збільшення коефіцієнта проникнення запылених фільтрів з підвищенням вологості повітря до 95 % у початковий момент фільтрування сягає до 2,5 – 3 разів порівняно із захисними властивостями фільтрів, які досліджувалися при вологості 60 % (рис. 2).

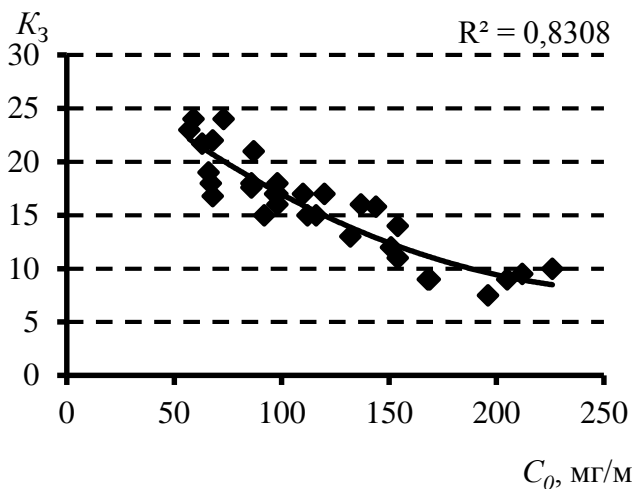


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів захисту (K_3) від концентрації пилу (C_0) в робочій зоні, тобто назвні півмаски (суцільною лінією на точковому графіку показано характерний тренд у вигляді експоненти)

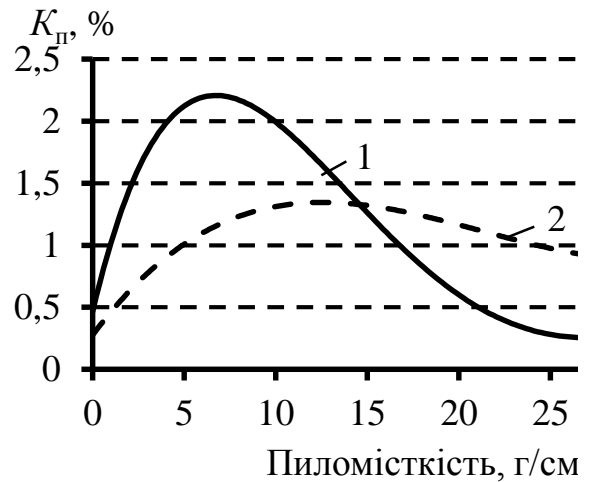


Рис. 2. Залежність зміни коефіцієнта проникнення ($K_{п}$) фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію від пиломісткості: 1 – при вологості повітря 95% з пилом; 2 – при вологості повітря 60% з пилом

З часом при досягненні фази поверхневого накопичення пилового осаду (для поліпропіленових фільтрів вона складає при запыленості 300 мг/м^3 до 15 хв) коефіцієнт проникнення зменшиться. Доведено, що збільшення концентрації пилу в повітрі робочої зони при підвищеній вологості повітря на початковій фазі навпаки сприяє покращенню захисних показників фільтрів, такий ефект зумовлений відсутністю фази об'ємного фільтрування (рис. 3). Показано, що зменшення поверхневого потенціалу фільтрів, які виготовлені з композиційних матеріалів, при різній вологості повітря за час однієї робочої зміни відбувається значно повільніше, ніж у зразків з чистого поліпропілену за рахунок розміщення зарядів за всім об'ємом фільтрувального шару, а також збільшення ступеня їх кристалічності (рис. 4).

У результаті досліджень захисних і ергономічних властивостей багаторазових півмасок в умовах вугільної шахти встановлено, що зі збільшенням вмісту пилу в повітрі робочої зони коефіцієнт захисту респіраторів зменшується в середньому від 20 до 10 при концентраціях пилових частинок 50 та 225 мг/м³, що також зумовлено доволі швидким зменшенням пор між волокнами фільтрувального матеріалу через осідання там велико-дисперсної фракції пилу з відповідним зростанням опору дихання і підсмоктування пилу через смугу обтюрації, причому під маскою респіратора переважає дрібнодисперсна фракція пилу – головна причина професійних захворювань пилової етіології.

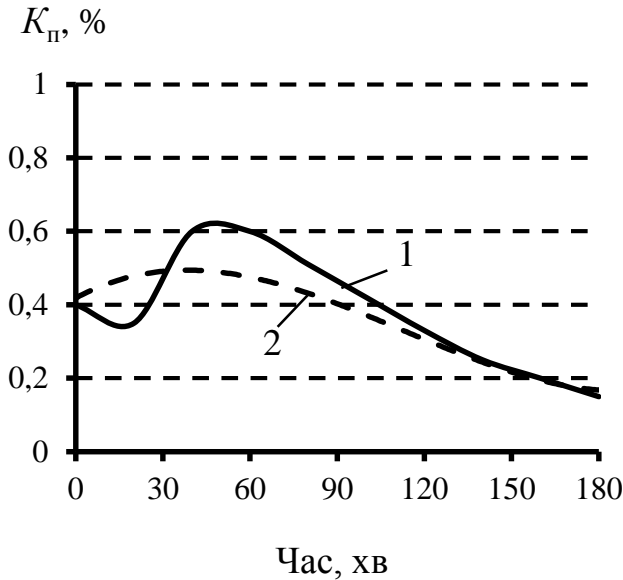


Рис. 3. Криві, які характеризують зміну коефіцієнта проникнення ($K_{п}$) фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію в часі: 1 – при вологості 95 % без пилу; 2 – при вологості 60 % без пилу

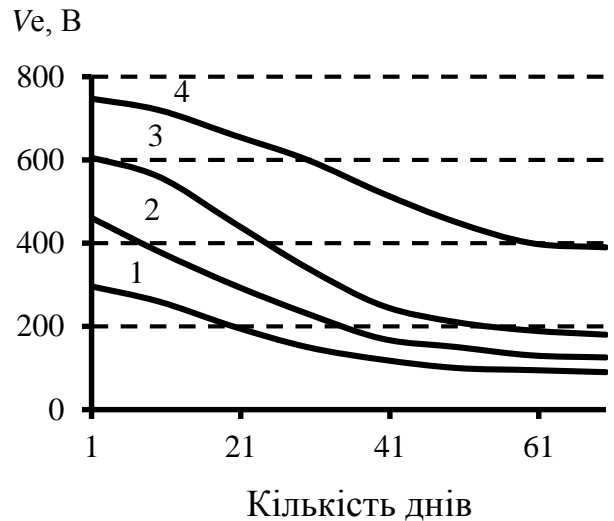


Рис. 4. Криві втрати поверхневого потенціалу фільтрів (V_e) при вологості повітря 60 % і температурі 23 °C на поліпропіленових фільтрах (1) та з додаванням технічного вуглецю (2); оксиду алюмінію (3); алмазної шихти (4)

Встановлено, низький термін захисної дії в умовах важкої фізичної праці і високий початковий опір диханню, зумовлений конструкцією фільтрувальної коробки, яка має незначний вихідний отвір та пласку задню стінку до якої прилягає гофрований фільтр, що в умовах запиленості призводить до швидкого зростання перепаду тиску через нерівномірність повітряного навантаження за площею фільтра (частина повітря, яка проходить через фільтр навпроти вихідного отвору, вільно потрапляє до підмаскового простору, а інша частина повітря просмоктується між задньою стінкою коробки і гофрами фільтра, тобто щоб потрапити до вихідного отвору їй необхідно подолати додатковий опір гофрів фільтра, які прилягають до задньої стінки). Конструкція фільтрувальних коробок впливає на перепад тиску респіратора через невикористання поверхні фільтрів (утворення мертвих зон, у яких повітря не рухається), тим самим збільшується опір диханню і зменшується пилемісткість і термін захисної дії фільтрів (рис. 5). Результати

лабораторних випробувань показали, що початковий опір диханню фільтрувальної коробки зі зміщеним вихідним отвором відносно центра майже на 25 % більший, ніж у інших коробок з центральним отвором.

Шляхом узагальнення результатів виробничих і лабораторних випробувань підтверджено, що якість і ефективність сучасного респіратора залежить від щільності прилягання півмаски до обличчя, параметрів фільтрувальної коробки, терміну захисної дії фільтра, надійності наголів'я та організаційних заходів, пов'язаних з використанням респіраторів в умовах певних виробництв.

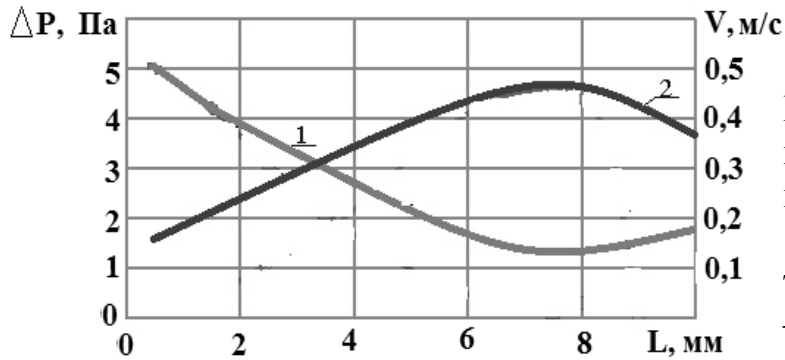


Рис. 5. Моделювання руху повітря у фільтрувальній коробці до респіратора РПА: 1 – крива зміни перепаду тиску на ділянках фільтра; 2 – крива зміни розподілу середньої швидкості фільтрації на ділянках фільтра



У третьому розділі «Теоретичні основи конструювання і розробки 3D моделей фільтрувальних півмасок» розкрито можливості проектування фільтрувальних півмасок засобами інформаційних технологій. Пропонується для конструювання півмасок використовувати цифрову 3D модель голови та для її побудови використовувати полігональну модель, яка дозволяє за визначними антропометричними розмірами обличчя змінювати її текстуру. Для її отримання вершини нанесеної полігональної сітки поєднували з ключовими антропометричними точками на відсканованих зображеннях, які визначали контури обтюратора (у більшості випадків до них відносять висоту і ширину обличчя, ширину губ, довжину і ширину носа). Для цього на відсканованих зображеннях обличчя, використовуючи програмне середовище за допомогою функції 3D-реконструкції визначали координати антропометричних точок як

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = reconstruct(u, v, i, k, P_c, P_p),$$

де P_c , P_p – проекційні матриці камери і проектора, визначаються у процесі калібрування; u , v – координати точок, що визначаються алгоритмами аналізу цифрового зображення та ідентифікацією шаблону підсвічування, які за масивом кольорових пікселів I , дозволяють отримати безліч $\{\mu_k = \langle \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \end{pmatrix}, i_k \rangle\}$ ідентифікованих точок шаблону; i – індекс прямої шаблону; k – коефіцієнт коригування між матрицями даних відсканованих зображень.

У подальшому за рахунок багатоетапної оцінки пропорцій голови представлених хмарою точок (рис. 6 а), за допомогою зваженої функції Гаусса радіального вигляду та локальної підгонки з урахуванням топологічної структури будувалось цифрове зображення. Так на першому етапі задавались координатами $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, що являють собою набір векторів $d_i = (d_1^i, d_2^i, \dots, d_n^i)$, елементами яких є індекси вершин моделі. Вектор задає ламану лінію, яка описує одну характерну рису обличчя, контур носа, губ або обличчя взагалі. Розміри ліній задаються за допомогою антропометричних точок, визначених на обличчі. Лінії утворюють параболічний сплайн, що безперервно задає форму перетину (рис. 6 б). Кожний сплайн рівномірно розбивається додатковими точками для утворення рівної кількості ділянок на всіх горизонтальних перетинах. Додаткові точки поєднуються між собою, утворюючи сітку чотирикутників (рис. 6 в). При підгонці розмітки до антропометричних точок користуємося трьома типами перетворень: ідентичним, зміщенням відносно встановлених точок та аффіно відносно вже розміщених точок.

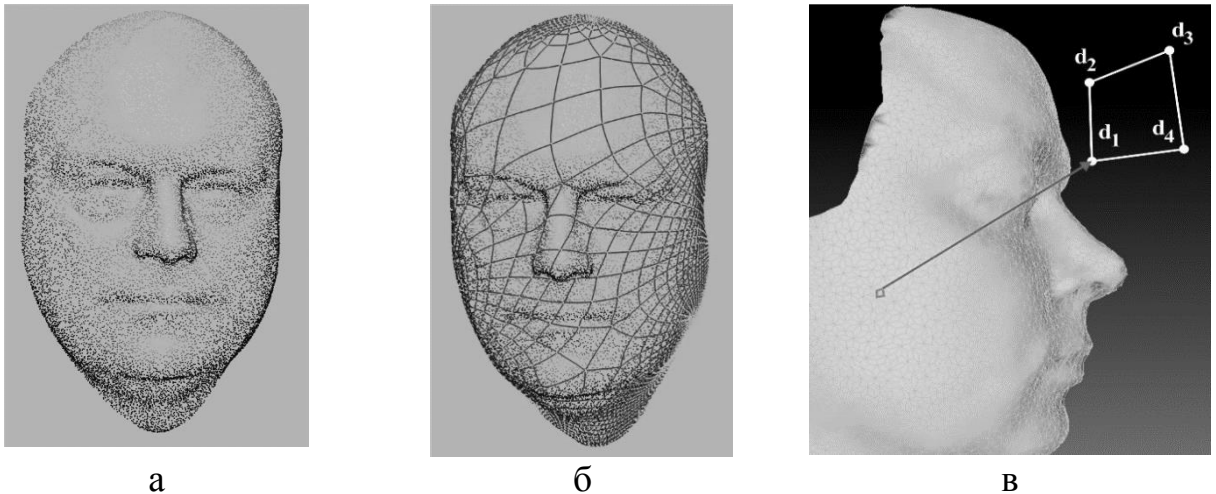


Рис. 6. Етапи перетворення сканованого зображення голови з хмари точок (а) з нанесеними сплайнами (б) у цифровий вигляд з розміткою і координатами (в)

Для «точних» етапів підгонки окремих рис користуємося методом Нелдера – Міда. Даний підхід дозволяє працювати з широким класом моделей, що деформуються, вносити правки на будь-якому етапі у випадках некоректного введення даних, сильно забруднених зображень та інших дефектах (рис. 7).

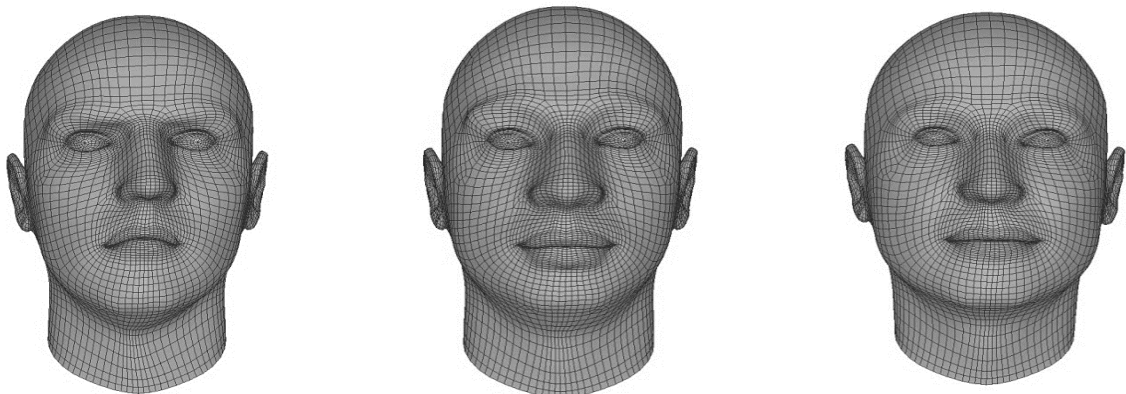


Рис. 7. Цифрові моделі голови з різними антропометричними параметрами

Відмінністю даної моделі від відомих є відсутність проміжної моделі, яка підлаштовується до антропометричних точок на сканованому зображенні, а потім на її базі будується полігональна модель. При цьому, в запропонованій моделі, спочатку відбувається грубе налаштування за допомогою інтерактивного алгоритму, а потім точна – сплайнами.

Вирішення наступної задачі перетворення цифрового зображення обличчя заданого в тривимірній системі координат в нові параметри індивідуальної півмаски можна представити як перетворення

$$F_0 = \Pi(F_{\Pi})$$

де F_0 – форма обличчя, що має певні початкові значення координат x, y, z для точок $1, 2, 3, \dots, n$, що визначають її параметри в тривимірній системі координат; F_{Π} – форма півмаски, обумовлена зміною початкових значень координат x, y, z ; Π – оператор перетворення ключових антропометричних точок на обличчі в геометричні параметри півмаски.

Процес побудови півмаски задавався послідовним багаторівневим перетворенням форми і параметрів цифрового зображення обличчя, який розбивався на кілька рівнів з відповідним розділом функції процесу створення на окремі підфункції. Для вирішення цієї задачі використовували класичний метод лінійної інтерполяції – побудови відповідного полінома, який задається у формі Ньютона. Даний підхід ґрунтується на теоремі Вейерштрасса, яка стверджує, що довільну неперервну на відрізку функцію можна рівномірно із довільною точністю наблизити поліномом. Для отримання рівнянь сплайн-поверхні півмаски відшукувалась деяка функція $f(x, y)$ в якій відомі точки сітки, що задані таблицею $\{x_i, y_i \ i = \overline{1, N}\}$, яка отримана з полігональної моделі обличчя. Після відповідних перетворень поверхню півмаски описували за допомогою наступної функції

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^N C_i \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right] \ln \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right] + Ax + By + D \quad (1)$$

де $C_1, C_2, \dots, C_n, A, B, D$ – коефіцієнти, які визначаються з рівнянь

$$\varphi(x_i, y_i) = f_i \quad i = \overline{1, N}; \quad \sum_{i=1}^N C_i = 0; \quad \sum_{i=1}^N C_i x_i = 0; \quad \sum_{i=1}^N C_i y_i = 0 \quad (\text{для розрахунку}$$

коефіцієнтів складаються матриці на основі існуючих координат).

Отримане рівняння дозволяє задавати форму поверхні за контрольними точками, які в нашому випадку використовуються як вузли інтерполяції та відповідають ключовим антропометричним розмірам обличчя. Форма сплайн-функції, яка описує поверхню півмаски (рис. 8), задається полігональною моделлю обличчя та визначається за тривимірними координатами, які формуються за

ключовими антропометричними рисами обличчя працівника при виконанні ним виробничих операцій, а також є головною передумовою удосконалення конструкції півмаски обтюратора.

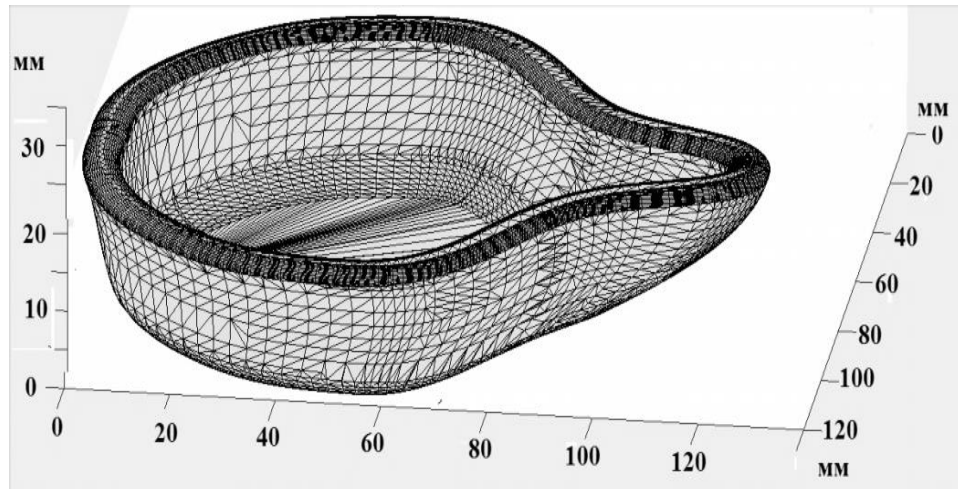


Рис. 8. Вигляд поверхні півмаски, яка побудована за допомогою сплайн-функції

За допомогою використання інтегративного алгоритму найближчих точок відомого як ІСР-метод, що базується на ітеративній процедурі мінімізації відстані між суміжними точками двох цифрових зображеннях, яка дозволяє розраховувати площу прилягання півмаски до обличчя для різних варіантів конструкцій півмасок. Розглядалось два напрями формування цифрової моделі півмаски: перший – за довжиною і шириною обличчя, а другий – за довжиною губ і обличчя (табл. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунку площі прилягання півмаски для до обличчя

Напрями формування півмасок	Площа обтюратора відповідно до зон обличчя, см ²				Загальна площа контакту, см ²	Середня товщина, обтюратора, см
	перенісся	права щока	ліва щока	підборіддя		
1	4,2	21,3	20,9	10,8	57,2	0,9
2	3,2	13,4	12,8	9,3	38,7	0,6

Показано, що у півмасок, побудованих за основними розмірами довжини і ширини обличчя, площа обтюратора у 1,4 рази більша, ніж півмасок, які будувалися за довжиною обличчя і губ. Проведені дослідження дозволили систематизувати існуючі підходи до конструювання півмасок і створити алгоритм розробки ЗІЗОД (рис. 9).

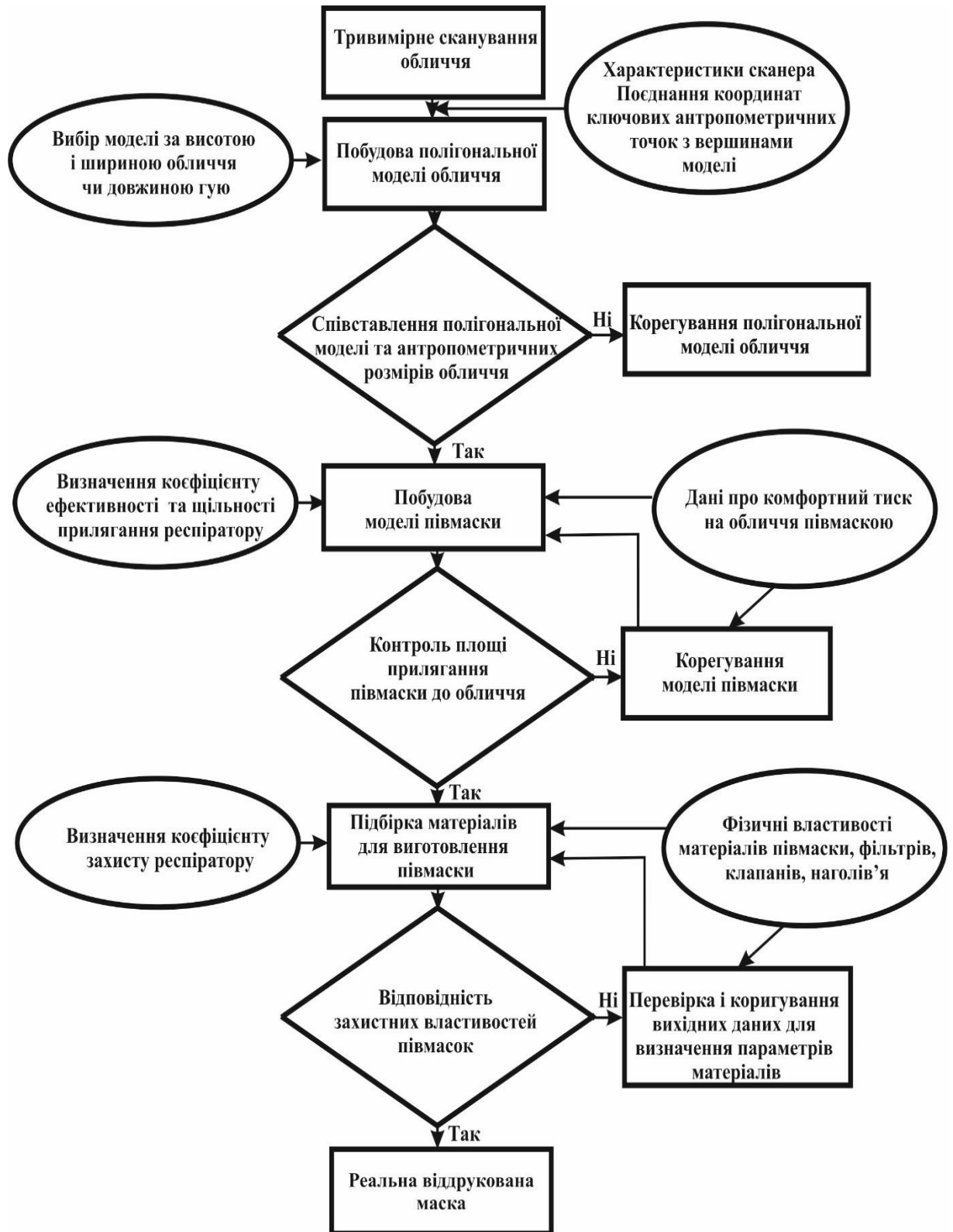


Рис. 9. Схема конструювання фільтрувальної півмаски

Запропонований алгоритм конструювання півмасок відрізняється від існуючих тим, що додатково на кожному етапі перетворення відсканованого зображення обличчя працівника у цифрове зображення поверхні півмаски, яку можна виготовити на 3D принтері, додається перевірка на відповідність індивідуальним параметрам обличчя за спеціальним алгоритмом зіставлення

тривимірних поверхонь S_1, S_2 , який заснований на мінімізації відстані і між точками цих поверхонь, які порівнюються як об'єкти лінійного простору $p(S_1, S_2)$, а ймовірність збігу представляє собою норму $\|S_1 - S_2\|$ в цьому просторі з урахуванням різниці між розмірами сіток побудови обличчя і півмасок, тоді площу збігу двох поверхонь можна оцінити за формулою

$$\begin{aligned} (S_1, S_2) = & k_{п1} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} (n_i^1, n_j^1) e^{-(c_i^1 - c_j^1)^2 / \sigma^2} \\ & + k_{п2} \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} (n_i^2, n_j^2) e^{-(c_i^2 - c_j^2)^2 / \sigma^2} \\ & - 2k_{п1} k_{п2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (n_i^1, n_j^2) e^{-(c_i^1 - c_j^2)^2 / \sigma^2} \end{aligned} \quad (2)$$

де N_1, N_2 – кількість точок у вихідних тривимірних поверхнях S_1, S_2 ; c_i – центроїд i -то трикутника; n_i – вектор нормалі до i -то трикутника довжина до якого дорівнює площі цього трикутника; σ – площа поверхні трикутника; $k_{п1}, k_{п2}$ – коефіцієнт, який враховує невідповідність точок обличчя і півмасок.

Крім того, пропонується проводити попередній розрахунок коефіцієнта ізолювання півмаски за визначенням площі її реального контакту до різних типів обличчя методом термографування з метою встановлення відповідності заданим захисним параметрам і прийняття рішення щодо подальшого удосконалення чи розробки нових конструкцій обтюратора. Для одержання необхідних відомостей виготовлену півмаску одягають на обличчя випробувача з дотриманням відповідних правил та попередньо перевіреною величиною натягу наголів'я, утримують на обличчі не менше трьох хвилин, а потім здійснюють тепловізійну зйомку і аналізують одержану термограму обтюратора. Місця нещільного прилягання півмаски до обличчя можна легко визначити і візуально, так як на термограмі вони, на відміну від місць щільного прилягання обтюратора до обличчя, мають менш інтенсивне забарвлення шкали приладу, оскільки ці ділянки менше нагріваються під час контакту півмаски з обличчям.

У четвертому розділі «Теоретичні основи визначення захисних властивостей півмасок з використанням математичних моделей фільтрації аерозолів» удосконалена математична модель, що описує рух запиленних потоків як біля півмаски з урахуванням підсмоктувань повітря крізь щілини за смугою обтюратора, так і всередині фільтрувальної коробки за її об'ємом, яка відрізняється від існуючої врахуванням геометричних параметрів півмасок і фільтрувальної коробки.

Рух пилового аерозолу біля півмаски представлений двома потоками, один з яких потрапляє до фільтрувальної коробки з фільтром і може бути описаний трьома диференціальними рівняннями у приватних похідних першого порядку з Ейлеровими змінними, які з спільно рівнянням нерозривності потоку дозволяють

отримати взаємозв'язок між кінематичними та геометричними параметрами фільтра та щільністю запиленого потоку.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \rho V_r + \frac{\partial \rho}{\partial r} V_r + \frac{\partial V_r}{\partial r} \rho + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \rho = 0; \\ V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = k_\phi \cdot V_r - \frac{1}{\rho} RT \frac{\partial \rho}{\partial r}; \\ V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = k_\phi \cdot V_\theta; \\ V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = k_\phi \cdot V_z - \frac{1}{\rho} RT \frac{\partial \rho}{\partial r} \end{array} \right. , \quad (3)$$

де V_r , V_θ , V_z – проекції швидкостей за осями координат, м/с; ρ – густина пилового потоку в фільтрувальному елементі, кг/м³; k_ϕ – коефіцієнт проникності, 1/с; R – універсальна газова постійна, Дж/(кг·К); T – температура запиленого потоку, К.

Рішення системи рівнянь (4) методом найменших квадратів, кінцевих елементів і локальних варіацій дозволяє отримати залежність розподілу швидкості повітряного потоку за об'ємом фільтрувальної коробки з урахуванням її геометричних параметрів (рис. 10) та оцінити їх вплив на коефіцієнт проникнення фільтрувальної коробки та підсмоктування повітря.

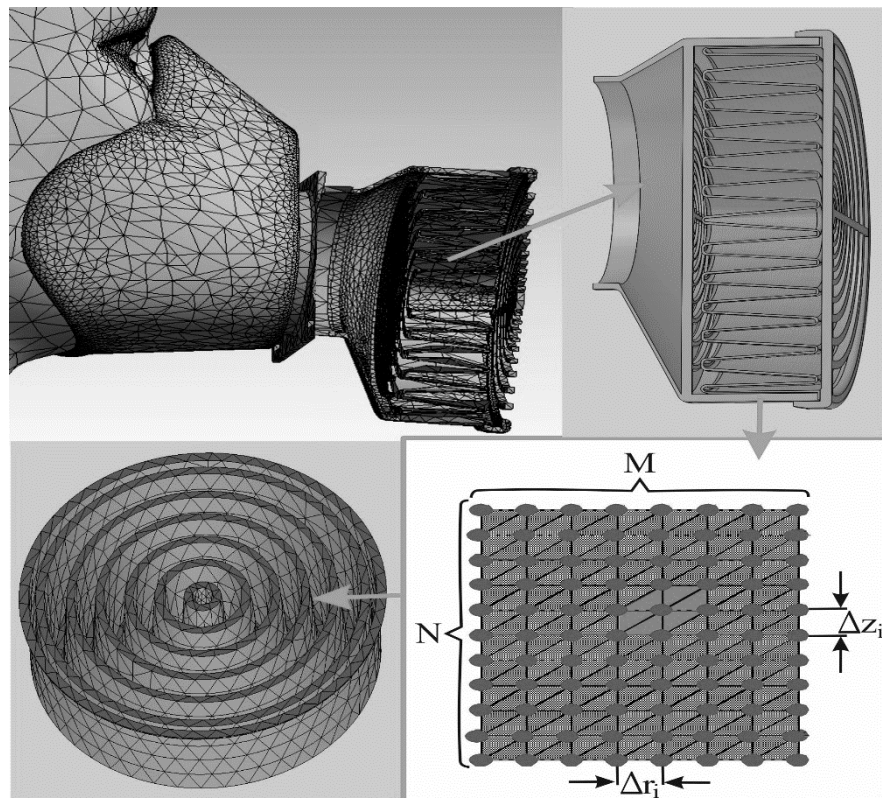


Рис. 10. Розрахункова схема півмаски з фільтрувальною коробкою поділена на трикутні кінцеві елементи N , M – розміри дільниці, Δr , Δz – розмітка дільниці

Другий потік направляєтся до щілин за смугою обтюрації півмаски і може бути представлений відомою функцією току повітряного потоку, що засмоктується в щілину. Якщо сумарну площу щілини розрахувати через еквівалентний радіус, тоді коефіцієнт підсмоктування аерозолі можна визначати за формулою:

$$A = \frac{U_0 S_{щ}}{Q_{щ}} = \frac{S_{щ} \sqrt{R_a^2 + (St_a / Fr^2)^2}}{\pi R_a^2} \quad (4)$$

де U_0 – швидкість руху повітря біля півмаски, м/с; $S_{щ}$ – площа щілини, м²; $Q_{щ}$ – витрата повітря через щілину, м³/с; $R_a = U_0 / U_{щ}$ – відношення швидкостей руху аерозолі біля півмаски і в щілині; число Стокса $St_a = \frac{\delta^2 \rho_p U_{щ}}{18 \mu d_{екв}}$; $U_{щ}$ – швидкість руху повітря в щілині, м/с; число Фруда $Fr = \frac{U_{щ}}{\sqrt{g d_{екв}}}$; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр щілини, м.

Коефіцієнт захисту респіраторів з урахуванням величини підсмоктування через нещільності за смугою обтюрації дорівнює:

$$K_3 = [k_n + k_b (A - k_n)]^{-1}, \quad (5)$$

де k_n – коефіцієнт проникнення аерозолі крізь фільтр; $k_b = \frac{Q_{щ}}{Q_{\phi}}$ – коефіцієнт витрат через нещільності смуги обтюрації Q_{ϕ} , – витрата повітря через фільтр, дм³/хв.

Відмінністю даного методу розрахунку захисної ефективності від існуючих є врахування мінливості розміру щілини між обличчям і півмаскою за допомогою коефіцієнта підсмоктування через співвідношення параметру R_a , та врахування впливу геометричних параметрів фільтрувальних коробок на коефіцієнт захисту табл. 2.

Таблиця 2

Розрахункові дані коефіцієнта захисту півмаски при різних розмірах щілин

Діаметр отвору, мм	Площа отвору підсмоктування $S_{щ}$, мм ²	Витрата повітря крізь щілину, $Q_{щ}$, мл/хв	Загальний перепад тиску на респіраторі, Δp , Па	Коефіцієнт захисту, K_3
1	3,1416	424,1	69,4	20,3
2	14,5664	811,1	56,8	11,8
3	19,65	882,5	53,8	9,3
4	28,2743	1021,1	47,5	6,7

Отримані залежності захисних властивостей ЗІЗОД від коефіцієнтів проникнення фільтра та розподілу швидкості руху повітряних потоків за об'ємом фільтрувальної коробки, дозволяють оцінити вплив геометричних параметрів останніх (висота і діаметр фільтрувальної коробки, діаметри вхідного і вихідного отворів, висоту і діаметр фільтра, зміщення вихідного отвору від центру коробки) на ергономічні показники респіраторів (рис. 11, 12). Зокрема встановлено, що

перепад тиску на фільтрувальних коробках респіраторів визначається не тільки коефіцієнтом опору фільтрів та витратою повітря через них, а й співвідношенням діаметрів її вихідного і вхідного отворів, при чому його мінімальне значення буде знаходитись у діапазоні 0,4...0,8.

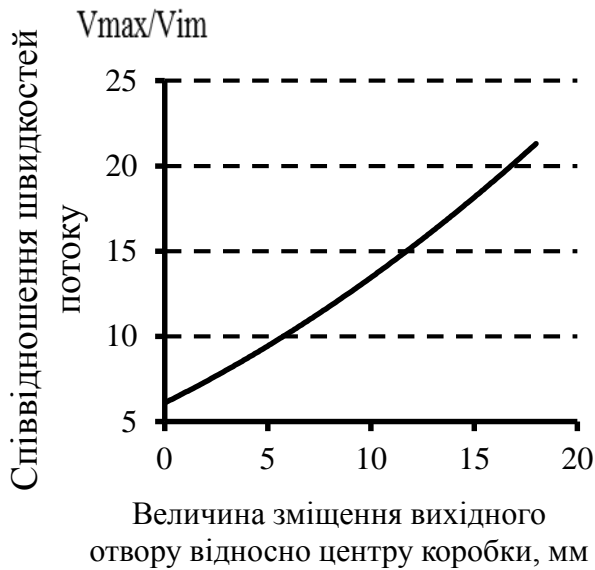


Рис. 11. Крива залежності розподілу відносної швидкості повітряного потоку від величини зміщення вихідного отвору коробки

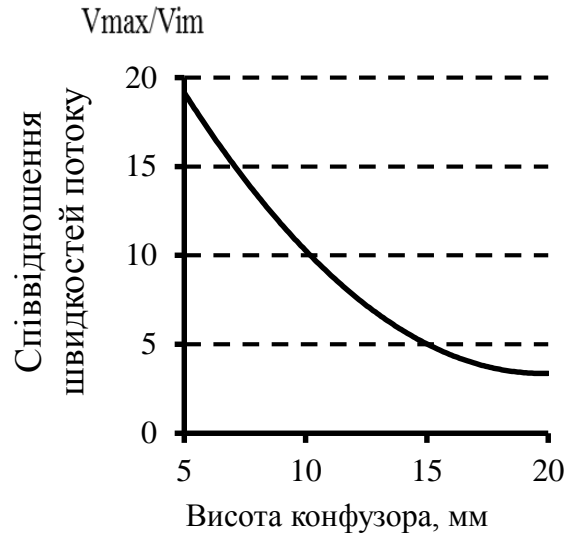


Рис. 12. Крива залежності розподілу відносної швидкості повітряного потоку від висоти конфузору

Результати лабораторних випробувань фільтрувального респіратора показали, що початковий опір диханню фільтрувальної коробки з конфузуром майже на 25 % менший, ніж у інших коробок; при цьому пиломісткість і термін захисної дії зросли більше ніж в два рази при концентрації пилу в повітрі 500 мг/м^3 (рис. 13).

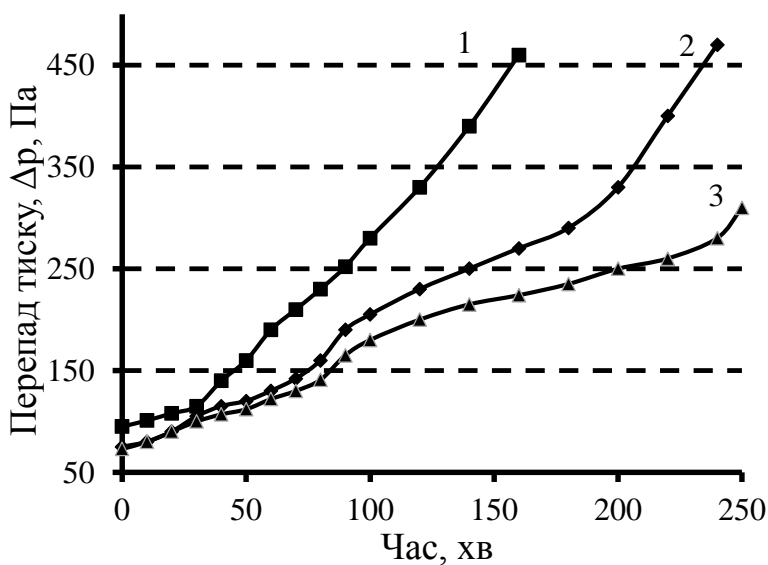


Рис. 13. Залежність зміни перепаду тиску на фільтрах від часу запилення з концентрацією 300 мг/м^3 та витратою повітря $95 \text{ дм}^3/\text{хв.}$, що розміщені у фільтрувальних коробках з вихідним отвором з діаметром 32 мм, який зміщено відносно центру на 18 мм (1), без зміщення (2); із задньою стінкою у формі конфузору (3)

Крім того, у результаті проведених досліджень встановлено, що опір фільтрувальної коробки зменшується зі збільшенням розміру клапана вдихання. До того ж існує такий діаметр клапана, який надійно захистить фільтр від вологи і забезпечить мінімальний приріст опору диханню фільтрувальної коробки.

Розмір клапана залежить від характеристик матеріалу, з якого він виготовлений. Встановлено, що для латексу раціональний діаметр клапана становить 55 мм. Подальше збільшення його площі, хоча і зменшить величину перепаду тиску, але призведе зростання часу його спрацювання і потраплянню вологи на фільтр (табл. 3).

Таблиця 3

Результати дослідження перепаду тиску

Розмір клапана вдихання розташованого на фільтрувальній коробці, мм	Середній перепад тиску на фільтрувальній коробці без фільтра під час вдихання повітря, Па	Середній перепад тиску на респіраторі під час видихання повітря*, Па
27	17	15
37	9	15
55	5	15
80	2	11**

Примітки. *Перепад тиску на респіраторі під час видихання визначався для однакового грибоквого клапана видихання діаметром 27 мм. **Зменшення перепаду тиску фіксувалось на початковому етапі видиху повітря через клапан

У п'ятому розділі «Розробка високоефективних фільтрувальних елементів до респіраторів» вдосконалено математичну модель зміни перепаду тиску на фільтрах респіраторів під час накопичення аерозольних частинок на їх поверхні, яка на відміну від відомих крім фази поверхневого фільтрування враховує й фазу автофільтрування, яка відбувається в осілому пиловому осаді.

Пропонується представляти цей осад, як додатковий фільтрувальний шар, в якому пилові агрегати апроксимуються гладкими циліндрами з радіусом, який дорівнює радіусу частинок, тоді перепад тиску запиленого фільтра можна розрахувати за формулою

$$\begin{aligned} \Delta p(x, t) &= \frac{4\mu\nu\beta_1}{\pi a^2} \int_0^H F[\beta_1(x, t)] dx = \\ &= \frac{2\mu\nu H \beta_1}{\pi a^2} \int_0^H [2\beta + a\beta_1 \exp(n(x, t)\theta(t)A_1(x)) + \\ &+ 3a^2\beta_1 \exp(2n(x, t)a\theta(t)A_1(x))] dx, \end{aligned} \quad (6)$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с; ν – швидкість фільтрування, м/с; a – радіус волокон, м; β – щільність упакування волокон; $\beta_1(x, t)$ – щільність упакування осаду у фільтрувальному шарі, віднесеної до одиниці об'єму елементарного фільтрувального шару, $\beta_1(x, t) = \beta + n(x, t)\theta(t)A_1(x)$; H – товщина фільтрувального шару; $n(x, t)$ – концентрація аерозолів;

$$\theta(t) = \int_0^t v(t)dt; A_1(x) = \gamma(x, t) \exp\left(-\int_0^H \gamma(x, t)dx\right).$$

За допомогою формули (6) можна оцінити вплив швидкості повітря, концентрації аерозольних частинок, параметрів фільтрувального шару на час утворення фази автофільтрування (рис. 14, 15). Зокрема, визначено залежність перепаду тиску на фільтрі від зміни щільності пилового осаду, що дозволяє встановити мінімальну щільність упакування волокон для забезпечення максимальної пиломісткості фільтра (рис. 16, 17).

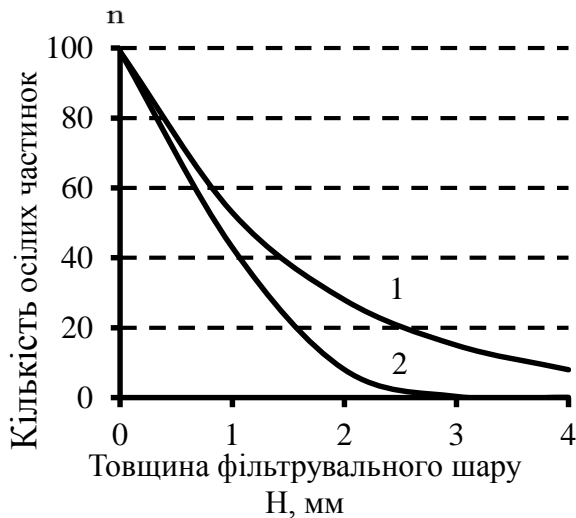


Рис. 14. Розподіл кількості частинок у фільтрувальному шарі за різних коефіцієнтів фільтрації: 0,25 (1) і 0,5 (2)

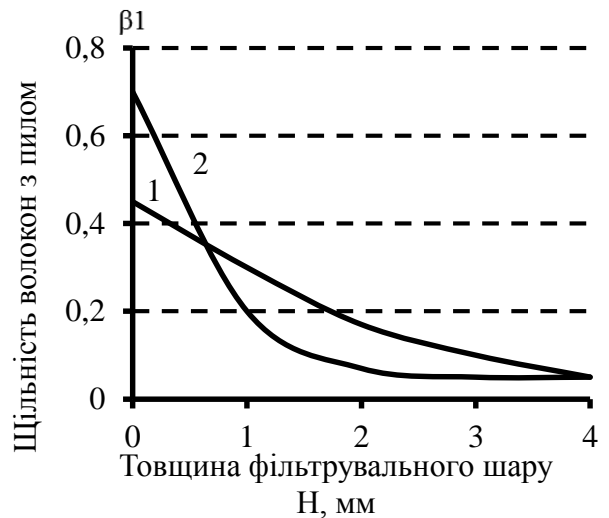


Рис. 15. Розподіл щільності упакування волокон з пилом у фільтрувальному шарі за різних коефіцієнтів фільтрації: 0,25 (1) і 0,5 (2)

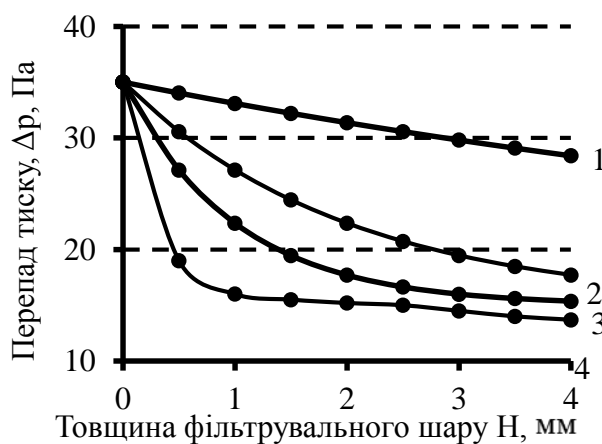


Рис. 16. Зміни перепаду тиску за товщиною фільтра при різній початковій щільності упакування волокон фільтра: 0,5 (1); 0,1 (2); 0,07 (3); 0,05 (1)

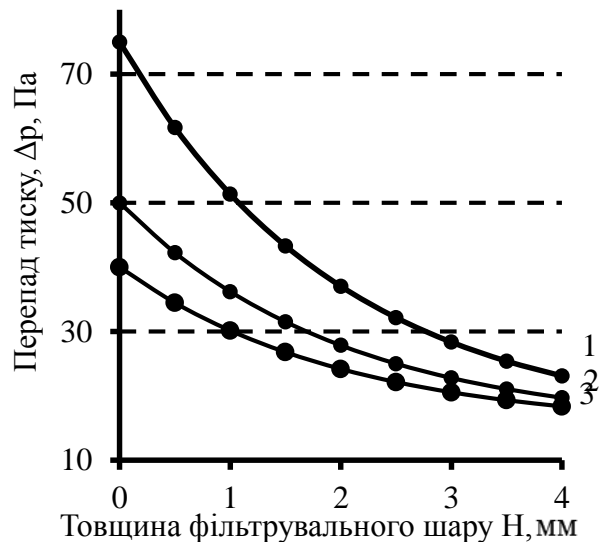


Рис. 17. Зміни перепаду тиску за товщиною фільтра при різній початковій концентрації пилових частинок, mg/m^3 : 100 (1); 50 (2); 25 (3)

Показано, що для збільшення терміну захисної дії фільтрів необхідно забезпечити таку щільність упакування волокон на фільтрах, яка дозволить з одного боку забезпечити мінімальну захисну ефективність на етапі формування поверхневого шару пилового осаду, а з другого боку мінімізувати час для утворення автофільтрувального шару. При цьому поверхнева щільність багат шарового поліпропіленового фільтра залежить від часу захисної дії респіратора і параметрів автофільтрувального шару пилу, який утворюється на його поверхні при швидкості фільтрування 90 – 150 дм³/хв та збільшує пиломісткість у 2 – 2,5 рази.

У результаті проведення експериментальних досліджень (рис. 18, 19) встановлено, що основне накопичення пилу на поліпропіленових фільтрах відбувається в верхньому шарі, тому для збільшення їх терміну служби і пиломісткості необхідно встановити попередній фільтр з грубих волокон і низькою їх щільністю упаковки; найменший приріст опору був зафіксований при поєднанні основного і попереднього фільтрів з щільністю упаковки 55 і 27 г/см², відповідно; при цьому кількість пилу розподілилося 40 на 60 % (табл. 4.).

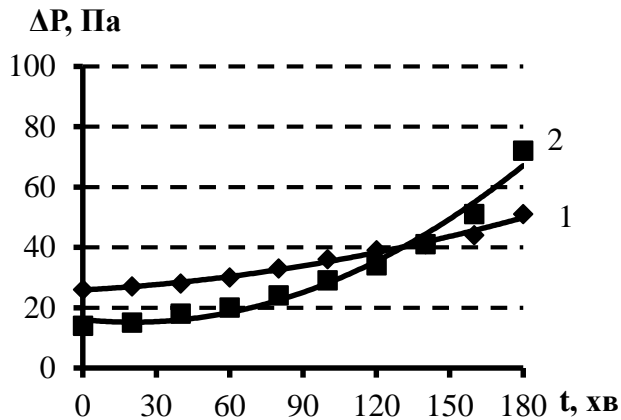


Рис. 18. Зміни перепаду тиску на головному фільтрі з щільністю 55 г/см² (1) та передфільтрі з щільністю 27 г/см² (2) при запиленні їх вугільним пилом з концентрацією 600 мг/м³ з витратою повітря 30 дм³/хв

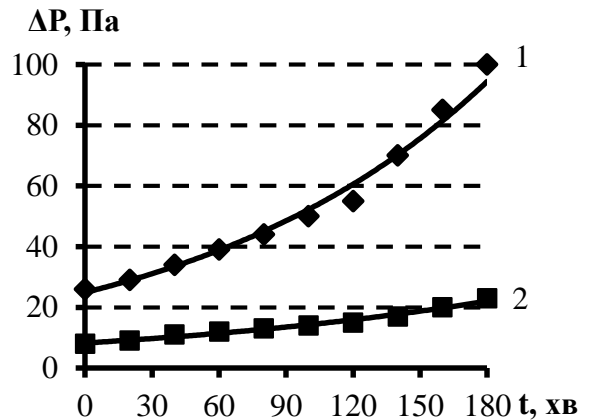


Рис. 19. Зміни перепаду тиску на головному фільтрі з щільністю 55 г/см² (1) та передфільтрі з щільністю 17 г/см² (2) при запиленні їх вугільним пилом з концентрацією 600 мг/м³ з витратою повітря 30 дм³/хв

Таблиця 4

Накопичення пилу та ріст опору на двошарових фільтрах

Шари фільтра	Щільність упакування матеріалу, г/м ³	Маса пилу, г	Частка пилу осілого на фільтрах, %	Кратність збільшення опору
Головний	55	0,4	6	1,2
Попередній	45	6,5	94	4
Головний	55	2,9	40	2,6
Попередній	27	4,3	60	3,5
Головний	55	5,7	80	3,4
Попередній	17	1,6	20	2,5

У шостому розділі «Розробка засобів оперативного контролю ефективності фільтрувальних респіраторів та перспективи їх удосконалення» запропоновано оснащати ЗІЗОД засобами контролю їх ефективності під час експлуатації працівниками, які включають вимірювач перепаду тиску на фільтрі і таймер часу роботи півмаски (рис. 20).

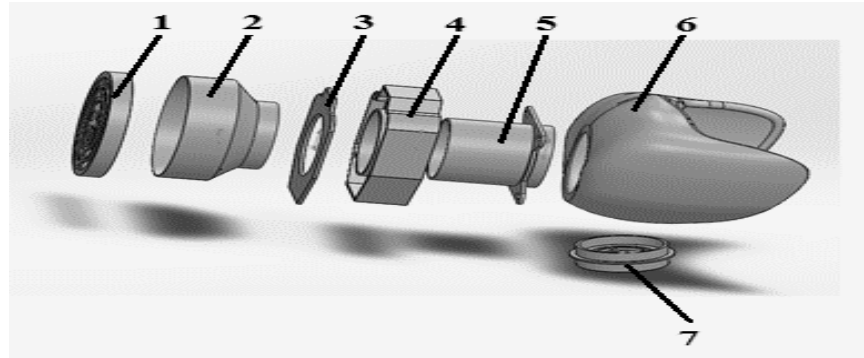


Рис. 20. Схема фільтрувального респіратора з датчиком контролю перепаду тиску: 1 – кришка фільтрувальної коробки; 2 – фільтрувальна коробка; 3 – кришка блока управління; 4 – корпус блока управління; 5 – патрон з клапаном вдихання; 6 – півмаска; 7 – клапан видиху

Це дозволить коректно встановлювати час реальної захисної дії, який в подальшому буде використовується для розрахунку пилового навантаження. Крім того, використання таких ЗІЗОД у реальних виробничих умовах забезпечить постійний моніторинг розташування півмаски на обличчі, стан наголів'я під час виконання виробничих операцій. У випадку порушення герметичності півмаски – змінюється величина перепаду тиску у підмасковому просторі, що буде зафіксовано датчиками і повідомлено сигнальними індикаторами.

Працездатність запропонованих засобів контролю перевірена шляхом лабораторних досліджень з визначенням часу запилення респіраторів із встановленими датчиками і без них, які були одягнені на манекенах голови та встановлені у пиловій камері (табл. 5).

Удосконалено методику з визначення опору диханню, захисних властивостей за тест-аерозолями при визначенні стійкості до запилення респіраторів, яка впроваджена у випробувальній лабораторії технічної експертизи засобів колективного та індивідуального захисту органів дихання працюючих ТОВ НВП «Стандарт».

Розроблені технічні рішення з удосконалення конструкцій багат шарових фільтрів із забезпеченням утворення автофільтрувального пилового шару, які характеризуються низьким опором диханню і високою пиломісткістю та рекомендації щодо оснащення півмасок додатковими ущільнювачами за смугою обтюрації, що значно зменшить підсмоктування запиленого повітря; встановлення додаткових елементів для кріплення наголів'я півмасок для забезпечення рівномірного розподілу зусилля за смугою обтюрації з урахуванням антропометричних відмінностей обличчя, що підвищить їх захисні властивості та

впроваджено при виробництві ЗІЗОД у Фізико-хімічному інституті захисту навколишнього середовища і людини.

Таблиця 5

Результати дослідження часу запилення респіраторів при
концентрації пилу 300 мг/м³

Номер фільтра	Витрата повітря через фільтр, л/хв	Показники респіратора з датчиком		Показники респіратора без вимірювача	
		Перепад тиску на фільтрі, Па	Час запилення до спрацювання індикатора, хв	Перепад тиску на фільтрі, Па	Час запилення, хв
1	30	99,5	132	100	141
2	30	99,8	106	100	112
3	30	100,1	78	100	83
4	30	100,3	61	100	66

Розроблені рекомендації щодо вибору ЗІЗОД, відповідно до ДСТУ EN 529:2006, з оцінкою ризиків виникнення професійних захворювань при їх використанні, процедурами адекватності і перевірки придатності до умов праці, користувача та видів діяльності впровадженні в ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля». Показано, що в існуючому підході до вибору ЗІЗОД не має чіткої процедури, яка б послідовно дозволила визначитися з необхідним, саме для заданих умов, ефективним респіратором. Тому пропонується проводити дослідження умов праці визначити можливі концентрації шкідливої речовини її коливанням, екстремальними умовами. Потім оцінити можливі ризики для здоров'я людини при роботі в таких умовах, наприклад методом HAZOP. Рівень ризику встановлюється з урахуванням матриці «ймовірність – важкість наслідків» за визначеною шкалою.

Обґрунтовано удосконалений вибір ЗІЗОД, що полягає у порівнянні мінімально необхідного ступеня захисту з визначеним ефективністю респіратора та розрахунку безпечного терміну захисної дії. Якщо для протипилового фільтра він здебільшого визначається утрудненням дихання, то у протигазового залежать від багатьох параметрів. Зокрема від хімічного складу (суміші) повітряних забруднень, їх концентрацій, умов застосування (витрати повітря, його температура і вологість) і від властивостей фільтра (його форма, кількість і властивості сорбенту). Рекомендується на відміну від існуючого способу визначення терміну захисної дії, замінювати фільтри або за розкладом, що складається з урахуванням конкретних умов використання або за показаннями спеціальних індикаторів встановлених на фільтрувальних коробках.

Вперше запропоновано оцінювати щільність прилягання півмаски до обличчя методом термографування з використанням відповідних програм для обробки термограм. Крім того, розроблені методи з перевірки вибраного респіратора на сумісність з виконуваною роботою, станом здоров'я працівника, кліматичними умовами, а також з іншими засобами захисту, що можуть бути застосовані в процесі праці. Також запропоновано програму «тренінгу» з

експлуатації та обслуговування ЗІЗОД, оскільки навіть для однакових умов експлуатації працівникам можуть бути підібрані відмінні марки респіраторів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науково-дослідною роботою, вирішена важлива для охорони праці наукова проблема створення теоретичних засад підвищення захисної дії фільтрувальних респіраторів шляхом удосконалення їх конструкції і пристосування респіраторів до умов експлуатації та антропометричних особливостей обличчя працівників з метою підвищення захисної дії фільтрувальних респіраторів.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, висновки і рекомендації полягають у такому:

1. Встановлено, що існуючі ЗІЗОД мають захисну ефективність значно нижчу, ніж та, яка потенційно можлива, виходячи з захисних властивостей використаних фільтрів. Основна причина – низькі ізолювальні властивості через велике різноманіття антропометричних характеристик обличчя користувачів. Тому необхідно розробити теоретичні засади проектування ЗІЗОД і перевірки отриманих результатів на основі виявлених закономірностей формування поверхні півмаски та конструкції обтюратора зі змінно геометрією, виходячи з даних тривимірних координат ключових точок антропометричних рис обличчя працівників.

2. Проведено порівняльні випробування захисної ефективності протипилових респіраторів у лабораторних і виробничих умовах, які показали, що коефіцієнт проникнення, отриманий у лабораторних умовах за тест-аерозолем «вугільний пил», склав 0,08...0,1 % та зменшувався з часом випробувань, а у виробничих умовах вугільної шахти навпаки – поступово зростав, досягнувши значення 8,6...9,3 %, тобто виявився значно більшим. Така динаміка пояснюється накопиченням велико-дисперсної фракції вугільного пилу між волокнами фільтру, що зменшує пори між ними. Разом з тим, поступово зростає опір диханню, який саме у виробничих умовах сприяє зростанню підсмоктування запиленого повітря через нещільності за смугою обтюратора респіратора, тобто підвищує коефіцієнт проникнення пилу.

3. У результаті досліджень захисних і ергономічних властивостей багаторазових півмасок у виробничих умовах вугільної шахти встановлено, що зі збільшенням вмісту пилу в повітрі робочої зони коефіцієнт захисту респіраторів зменшується в середньому від 20 до 10 при концентраціях пилових частинок 50 та 225 мг/м³ відповідно, що також зумовлено доволі швидким зменшенням пор між волокнами фільтрувального матеріалу через осідання там велико-дисперсної фракції пилу з відповідним зростанням опору дихання і підсмоктування пилу через смугу обтюратора, причому під маскою респіратора переважає дрібнодисперсна фракція пилу – головна причина професійних захворювань пилової етіології.

4. Визначено основні антропометричні розміри обличчя, які найбільше впливають на конструкцію півмасок, за результатами яких була побудована

полігональна 3D модель голови. За її встановленими базовими координатами методом інтерполяції визначено поверхню півмаски. ІСР-методом розраховано площа прилягання півмаски до обличчя. Встановлено площу смуги обтюрації та її периметр. Розраховано коефіцієнт ізолювання півмасок. Показано, що у півмасок, побудованих за основними розмірами довжини і ширини обличчя, площа обтюратора у 1,4 рази більша, ніж у півмасок, які будувалися за довжиною обличчя і губ. Проведені дослідження дозволили систематизувати існуючі підходи до проектування півмасок і розробити алгоритм проектування ЗІЗОД.

5. Розроблено 3D алгоритм проектування півмасок, який відрізняється від існуючих тим, що додатково на кожному етапі перетворення відсканованого зображення обличчя працівника у цифрове зображення поверхні півмаски, яку можна виготовити на 3D принтері, додається перевірка на відповідність індивідуальним параметрам обличчя: оцінка параметрів полігональної моделі голови; перевірка відповідності зображення; попередній розрахунок коефіцієнта захисту; перевірка щільності прилягання дослідного зразку.

6. Запропоновано математичну модель, що описує рух запиленних потоків у фільтрувальній коробці. Вона складається з трьох диференціальних рівнянь у приватних похідних першого порядку та рівняння нерозривності потоку. Встановлено залежності розподілу швидкості повітряного потоку в фільтруючій коробці з різною геометрією та визначено кінематичні параметри запиленого потоку повітря за її обсягом.

7. Уточнено математичну модель, що описує рух запиленних потоків у фільтрувальних респіраторях з урахуванням величини підсмоктування через нещільності за смугою обтюрації, яка відрізняється від існуючих тим, що при розрахунку коефіцієнта аспірації мінливий розмір щілини між обличчям і півмаскою враховується параметрами R_a , β , які залежать від відношення швидкостей повітряних потоків до і після щілини і від числа Стокса, що дозволило визначити раціональні геометричні параметри фільтрувальної коробки перехід від фільтра до отвору вхідного клапана, виконаний у вигляді конфузора, обґрунтовані його висота, діаметр вхідного отвору і зміщення отвору від центру фільтрувальної коробки.

8. Удосконалено математичну модель зміни перепаду тиску на фільтрах респіраторів під час осідання аерозольних частинок на них, яка на відміну від відомих враховує не тільки фазу поверхневого фільтрування, а й автофільтрування, яке доцільно описувати за допомогою моделі стовщеного волокна, де пилові агрегати апроксимуються гладкими циліндрами з радіусом, який дорівнює радіусу частинок. Оцінено вплив швидкості повітря, концентрації аерозольних частинок, параметрів фільтрувального шару на час існування фази автофільтрування.

9. Запропоновано способи автоматичного контролю ефективності роботи фільтрувальних респіраторів. Показано, що за допомогою установки датчика у підмасковому просторі можливо оцінювати щільності прилягання півмаски респіратора під час його експлуатації, а також час роботи фільтрів до набуття ними критичного значення перепаду тиску.

10. Розроблено рекомендації щодо перевірки щільності прилягання півмаски до обличчя, які впроваджені у випробувальній лабораторії ЗІЗОД Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища при проведенні процедури визначення захисних властивостей фільтрувальних респіраторів, та удосконалено методику з визначення опору диханню при перевірці ЗІЗОД на стійкість до запилення респіраторів, яку впроваджено у випробувальній лабораторії технічної експертизи засобів колективного та індивідуального захисту органів дихання працюючих у ТОВ НВП «Стандарт»

11. Розроблені рекомендації щодо вибору ЗІЗОД, відповідно до ДСТУ EN 529:2006, з оцінкою ризиків виникнення професійних захворювань при їх використанні, які впроваджені на вугільних шахтах ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля».

12. Запропоновано технічні рішення з удосконалення конструкцій багатошарових фільтрів з низьким опором диханню і високою пиломісткістю. Розроблено рекомендації щодо оснащення півмасок додатковими ущільнювачами за смугою обтюрації, встановлення додаткових елементів для кріплення наголів'я півмасок з метою забезпечення рівномірного розподілу зусилля за смугою обтюрації з урахуванням антропометричних відмінностей обличчя, збільшення площі фільтрів респіратора, що підвищує їх захисні властивості.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Підвищення ефективності протипилових засобів індивідуального захисту органів дихання працюючих: монографія / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко. – Дніпро: Наука і освіта, 2010. – 104 с.

2. Пилове навантаження працівників гірничих підприємств при використанні притипилових респіраторів: монографія / В.І. Голінько, В.Є. Колесник, С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2011. – 149 с.

3. Підвищення захисної ефективності одноразових протипилових півмасок: монографія / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко. – Дніпро: Адверта, 2012. – 95 с.

4. Improving efficiency of dust mask use in mining: monograph / V.I. Golinko, S.I. Cheberyachko, Y.I. Cheberyachko, O.O. Yavorska, V.V. Tykhonenko; Ministry of Education and Science of Ukraine; National mining university. – Dnipro: NMU, 2014. – 100 p.

Статті у фахових виданнях:

5. Чеберячко Ю.И. К вопросу выбора средств индивидуальной защиты органов дыхания для условий горнорудных предприятий / С.И. Чеберячко, Ю.И. Чеберячко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 247 – 252.

6. Оцінка надійності протипилових респіраторів / С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко, М.М. Наумов // *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць*. – Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ, 2013. – Вип. 112. – С. 72 – 82.

7. Чеберячко Ю. І. Особливості вибору протипилових респіраторів за європейськими стандартами / С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, М.М. Наумов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 1. – С. 108 – 112 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

8. Чеберячко Ю.І. Зменшення рівня ризику виникнення професійних захворювань з пилової етіології гірників при використанні протипилових респіраторів / Ю.І. Чеберячко // *Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва*. – 2013. – № 2(12). – С. 196 – 204 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

9. Cheberyachko Y. I. The role of means of individual protection for respiratory organs in prophylaxis of the coal – dust etiology / Y. I. Cheberyachko // *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. – 2013. – № 41. – С. 141 – 146.

10. Чеберячко Ю.І. До оцінки захисної ефективності протипилових півмасок / С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер. Безопасность жизнедеятельности*. – 2013. – Вып. 71(2). – С. 209 – 215.

11. Чеберячко Ю.І. Оцінка впливу опору клапанів видихання респіраторів на працездатність людини / Ю. І. Чеберячко // *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць*. – Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ, 2014. – Вип. 117. – С. 176 – 181.

12. Чеберячко Ю.І. До питання про підвищення захисної ефективності протипилових респіраторів на виробництві / С.І. Чеберячко, О.О. Яворська, Ю.І. Чеберячко // *Уголь Украины*. – 2014. – № 4. – С. 22 – 24.

13. Чеберячко Ю.І. Дослідження опору повітря протипилових респіраторів при їх експлуатації на гірничорудних підприємствах / В.Є. Колесник, С. І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 4. – С. 118 – 123 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

14. Чеберячко Ю.І. Дослідження впливу конструкції одноразових півмасок на їх ергономічні властивості / С.І. Чеберячко, О.О. Яворська, Ю.І. Чеберячко // *Розробка родовищ: щоріч. наук.-техн. зб. / редкол.: В.І. Бондаренко та ін. Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес»*, – 2014. – С. 437 – 445.

15. Порівняльні дослідження захисної ефективності фільтрувальних респіраторів у лабораторних і виробничих умовах / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, М.М. Наумов, Ю.І. Чеберячко // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2014. – № 1. – С. 99 – 105 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

16. Дослідження аеродинамічного опору диханню протипилових респіраторів / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2014. – № 6. – С. 131 – 136 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

17. Чеберячко Ю.І. Теоретичні дослідження опору дихання фільтрувального респіратора на циклічному потоці повітря / С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр.* – Харків : НТУ

"ХП". – 2015. – № 36 (1145). – С. 121 – 127 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

18. Повышение защитной эффективности эластомерных фильтрующих респираторов / В. И. Голинько, С. И. Чеберячко, Ю. И. Чеберячко, Д. И. Радчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2(6). – С. 60 – 64. (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

19. Чеберячко Ю.І. Визначення області безпечного використання протипилових респіраторів / С.І. Чеберячко, О.О. Яворська, Ю.І. Чеберячко // Розробка родовищ: щоріч. наук.-техн. зб. / редкол.: В.І. Бондаренко та ін. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2015. – Т. 9. – С. 437 – 445.

20. Чеберячко Ю.І. Защита органов дыхания работников угольных предприятий при использовании фильтрующих респираторов / С.И. Чеберячко, Е.А. Яворська, Ю.И. Чеберячко // Уголь Украины. – 2015. – № 9. – С. 67 – 71.

21. Дослідження ефективності протипилових фільтрів для умов вугільних шахт / В. Ю. Фрундін, С. І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, Д. І. Радчук // Зб. наук. пр. Національного гірничого університету. – 2015. – № 49. – С. 285 – 296.

22. Експериментальні дослідження впливу вологості повітря на захисні властивості електретних фільтрів / С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2016. – №1 (96) – С.59 – 66.

23. Исследование защитной эффективности фильтрующих респираторов и оценка ее влияния на пылевую нагрузку горняков / В. И. Голинько, С.И. Чеберячко, Е. А. Яворская, Ю.И. Чеберячко // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 54 – 59 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

24. Розрахунок двоступеневих фільтрувальних систем протипилових респіраторів / С.І. Чеберячко, О.О. Яворська, Ю.І. Чеберячко, О.В. Столбченко // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ, 2016. – Вип. 129. – С. 256 – 270.

25. Конструктивні особливості сучасних фільтрувальних проти-аерозольних півмасок / С.І. Чеберячко, О.В. Столбченко, Ю.І. Чеберячко, В.О. Гуца // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр. – Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ, 2017. – Вип. 132. – С. 211 – 219.

26. Study of the Efficiency of Dust Filters in Terms of Coal Mines / S.I. Cheberiyachko, Yu.I. Cheberiyachko, O.A. Yavors'ka, D.I. Radchuk // Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2017. – Vol. 10. – P. 218 – 228 doi:10.2412/mmse.81.48.85 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

27. Studying the Influence of a Filter Box Design on Respirator Resistance to Breathing / S. Cheberyachko, V. Frundin, Y. Cheberyachko, O. Stolbchenko // Journal of the International Society for Respiratory Protection. – 2017. – Vol. 34. – №1. – P. 58 – 64.

28. Дослідження ефективності конструкцій фільтрувальних коробок / С.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, Ю.І. Чеберячко, Д.І. Радчук // Наукові вісті НТУУ

"КПІ". – 2017. – №7 (1229). – С. 114 – 118 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

29. Чеберячко Ю. И. Математическая модель движения запыленных потоков воздуха в фильтре респиратора / Ю. И. Чеберячко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2017. – № 23. – С. 194 – 199. (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

30. Чеберячко Ю. И. Оцінка впливу конструкції клапанів вдихання на перепад тиску респираторів / С.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, Ю.І. Чеберячко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2017. – № 7. – С. 219 – 224 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

31. Experimental studies on resistance polypropylene filter according to DSTU EN 143-2002 / Yu.I. Cheberiyachko, N.A. Ikonnikova, I.M. Cheberiyachko, A.A. Yurchenko // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2018. – № 2. – P. 87 – 94 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

32. Analysis of the factors influencing the level of professional health and the biological age of miners during underground mining of coal seams. / S. Cheberiyachko, Yu. Cheberiyachko, V. Sotskov, O. Tytov // Mining of Mineral Deposits. – 2018. – 12(3). – P. 87 – 96 (входить до міжнародної наукометричної бази «Web of Science Core Collection»).

Інші статті у міжнародних та вітчизняних виданнях:

33. Cheberiyachko Y.I. Effect of design of half – mask respirators on their key qualities / V.I. Golinko, S.I. Cheberiyachko & Y.I. Cheberiyachko // School Underground Mining. – London: Taylor & Francis Group, 2010. – P. 151 – 155 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

34. Cheberiyachko Y.I. The estimation of effect of the dust-proof respirators' protective efficiency upon the mining workers' dust load / Y.I. Cheberiyachko // School Underground Mining. – London: Taylor & Francis Group, 2012. – P. 177 – 180 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

35. Взаємозв'язок між ізольованими властивостями півмасок та коефіцієнтом захисту респиратора / С.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, Ю.І. Чеберячко, О.В. Столбченко // Металургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 2. – С. 131 – 135. (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

36. Средства защиты органов дыхания работников горнорудных предприятий / В. И. Голинько, Ю. И. Чеберячко, С. И. Чеберячко, Н. Н. Наумов // Металургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 4. – С. 111 – 116 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

37. Аналіз методів визначення терміну захисної дії протигазових фільтрів / В.І. Голинько, С.І. Чеберячко, А.В. Чиркін, М.М. Наумов, Ю.І. Чеберячко // Металургическая и горнорудная промышленность – 2017. – № 4. – С. 89 – 98 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

38. Експериментальні дослідження впливу параметрів мікроклімату на працездатність людини під час використання фільтрувальних респираторів / С.І. Чеберячко, Ю.В. Фрундін, Ю.І. Чеберячко, О.В. Столбченко, Д.І. Радчук

// Український журнал з проблем медицини праці». – 2017. – №4(53) – С. 54 – 58 (входить до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»).

Патенти:

39. Пат. 93674 Україна, МПК А62В 23/00. Фільтрувальний респіратор / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, М.М. Наумов, Д.І. Радчук ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u201405005 ; заяв. 12.05.2014 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.

40. Пат. № 97850 Україна, МПК А62В 23/00. Фільтрувальний респіратор / В.І. Голінько, С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, М.М. Наумов, Д.І. Радчук ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u 2014 10668 ; заяв. 29.09.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

41. Пат. № 111063 Україна, МПК А62В 7/10. Фільтрувальний респіратор / В.І. Голінько, Ю.І. Чеберячко, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, М.М. Наумов ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u 2016 05395 ; заяв. 18.05.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

42. Пат. № 113314 Україна, МПК А62В 7/10. Фільтрувальний респіратор / В.І. Голінько, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u 2016 07047 ; заяв. 29.06.2016 ; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2.

43. Пат. № 118789 Україна, МПК А62В 7/10. Фільтрувальний респіратор / В.І. Голінько, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u 2017 02329 ; заяв. 13.03.2017 ; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16.

44. Пат. № 121881 Україна, МПК А62В 7/10. Фільтрувальна протипилова півмаска / В.І. Голінько, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, М.О. Зіборова ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u 2017 03373 ; заяв. 07.04.2017 ; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 24.

45. Пат. № 122788 Україна, МПК А62В 23/02. Фільтрувальний респіратор» / В.І. Голінько, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Д.В. Славінський ; заявник ДВНЗ «НГУ». – № u 2017 07973 ; заяв. 31.07.2017 ; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.

Тези доповідей:

46. Cheberyachko Y.I. Use of dust masks at coal enterprises / S.I. Cheberyachko, Y.I. Cheberyachko, M.M. Naumov // School Underground Mining. Technical and geoinformational systems in mining: abstracts materials of IV International scientific-practical conference. – London: Taylor & Francis Group, 2011. – P. 231 – 235.

47. Чеберячко Ю.І. Розробка математичної моделі рівномірного розподілу зусиль за смугою обтюратору у півмасках / С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко // Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства: тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф., 5 – 6 черв. 2013 р., м. Київ. – Київ: ННДІОП, 2013. – С. 25 – 31.

48. Чеберячко Ю.І. До оцінки захисної ефективності протипилових півмасок / С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко // Безпека життєдіяльності у XXI столітті: тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф., 17–18 жовт. 2013 р., м. Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2013. – С. 63 – 66.

49. Чеберячко Ю. И. Рекомендации по выбору противопылевых респираторов на угольных предприятиях // Форум гірників - 2013 : матеріали міжнар. конф., 2–5 жовтня 2013 р, м. Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ, 2013. – Т. 3. – С. 152 – 157.

50. К вопросу о расчете коэффициента защиты фильтрующих респираторов / В.И. Голинько, С.И. Чеберячко, Н.Н. Наумов, Ю.И. Чеберячко // Форум гірників – 2014: матеріали міжнар. конф., 1 – 4 жовт. 2014 р, м. Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ, 2014. – Т. 3. – С. 199 – 205.

51. Чеберячко Ю.И. Оценка эффективности применяемых средств защиты органов дыхания на горных предприятиях / С.И. Чеберячко, Ю.И. Чеберячко, Д.С. Пустовой // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта: сб. науч. тр. междунар. конф. – Днепр: НГУ, 2017. – С. 488 – 497.

52. Чеберячко Ю.И. Исследования влияния выходного диаметра фильтрующей коробки на эффективность пылеулавливания респиратора / Ю.И. Чеберячко, И.М. Чеберячко// Материалы междунар. науч.-техн. интернет-конф. «Инновационное развитие горнодобывающей отрасли». – Кривой Рог, 2017. – С. 203.

53. Чеберячко Ю.И. Дослідження існуючих конструкцій фільтрувальної коробки протипилових респіраторів /Ю.И. Чеберячко, М.М. Наумов // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., 15 черв. 2017 р., м. Київ. – Київ: КНУТД, 2017. – С. 176.

54. On the Problem of Filter Respirator Selection / I. Cheberiachko Y. Cheberiachko, A. Yavorskyi // Advanced Engineering Forum. – 2017. – Vol. 25. – P. 136 – 142.

55. Analysis of pressure difference changes in respirator filters while dusting / S. Cheberiachko, O. Yavorska, Y. Cheberiachko, A. Yavorskyi // Ukrainian School of Mining Engineering: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., (Berdyansk, Ukraine, September 4 – 8, 2018). – 2018. – Vol. 60. – P. 161 – 171.

Особистий внесок автора в праці, опубліковані у співавторстві, полягає у роботах [1, 3] – проведений аналіз конструкцій фільтрувальних респіраторів, визначені їх недоліки та переваги, розкриті шляхи їх удосконалення; [2, 4] – виконана оцінка коефіцієнта захисту різних півмасок за відомими методами та обґрунтовані розрахунки пилового навантаження гірників з урахуванням захисної ефективності респіраторів, розроблені рекомендації для підвищення ефективності використання ЗІЗОД працівниками; [7, 12, 13, 15, 20, 25, 48] – проведені дослідження захисних і ергономічних властивостей фільтрувальних півмасок у лабораторних і виробничих умовах, встановлені взаємозв'язки між умовами експлуатації та ізолювальними властивостями респіраторів, обґрунтовано вплив антропометричних параметрів обличчя на величину підсмоктування півмасок та коефіцієнт проникнення; [21, 23, 26, 49, 51] – удосконалено алгоритм щодо вибору засобів індивідуального захисту органів дихання з додаванням оцінки виникнення ризику професійних захворювань та урахуванням умов експлуатації, важкості праці, наявності шкідливих аерозолів; [30] – виконані дослідження впливу клапанів видихання на опір диханню, обґрунтовані розміри клапанів видихання відповідно до властивостей матеріалу [5, 6, 16, 17, 35, 50, 52, 53] – обґрунтовані причини погіршення роботи фільтрів у коробках еластомірних півмасок та розроблена

математична модель руху запиленого повітря у фільтрувальних коробках, оцінений вплив параметрів коробок на захисні й ергономічні показники фільтрів; [32] – вплив фільтрувальних респіраторів та встановлення закономірностей формування ризику професійних захворювань гірників з оцінкою біологічного віку; [10, 14, 36, 37] – проаналізована ефективність фільтрувальних респіраторів у відповідних умовах, розроблений алгоритм з оцінки надійності ЗІЗОД та розглянуті способи підвищення ефективності використання респіраторів; [18, 19, 22, 24, 31] – обґрунтовані шляхи підвищення експлуатаційних властивостей респіраторів; [19, 27, 28] – розроблена програма дослідження впливу параметрів фільтрувальної коробки на розподіл повітряного потоку у фільтрі, обґрунтована величина пиломісткості фільтрів; [33, 34, 38, 54, 55] – визначені основні причини, які впливають на ступінь захисту респіраторів; [39] – розроблена конструкція фільтрувального патрона; [40 – 44] – визначені недоліки існуючих конструкцій, розроблені макети експериментальних зразків півмасок та визначена їх ефективність; [45] – розроблений алгоритм контролю параметрів респіратора; [47] – розроблена модель розподілу зусиль за обтюратором еластомірних півмасок.

АНОТАЦІЯ

Чеберячко Ю.І. Розвиток теорії конструювання та вдосконалення процесів індивідуального підбору і використання протипилових респіраторів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – Охорона праці, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці теоретичних засад, методичних положень та практичних рекомендацій щодо поліпшення захисних властивостей фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання на основі їх адаптування до умов експлуатації та обличчя працівника.

Проведено порівняльні випробування захисної ефективності протипилових респіраторів у лабораторних і виробничих умовах які показали, що зі збільшенням вмісту пилу в повітрі робочої зони коефіцієнт захисту респіраторів зменшується в середньому від 20 до 10 при концентраціях пилових частинок 50 та 225 мг/м³, що зумовлено швидким зменшенням пор між волокнами фільтрувального матеріалу через осідання там велико-дисперсної фракції пилу.

Розроблений 3D алгоритм проектування півмасок. Удосконалено математичну модель зміни перепаду тиску на фільтрах респіраторів під час осідання аерозольних частинок на них, яка враховує автофільтрування. Оцінено вплив швидкості повітря, концентрації аерозольних частинок, параметрів фільтрувального шару на час існування фази автофільтрування.

Запропоновано способи автоматичного контролю ефективності роботи фільтрувальних респіраторів, за допомогою установки датчика у підмасковому просторі для оцінки щільності прилягання під час його експлуатації, а також часу роботи фільтрів до набуття ними критичного значення перепаду тиску.

Запропоновано технічні рішення з удосконалення конструкцій багатошарових фільтрів з низьким опором диханню і високою пило місткістю. Розроблено рекомендації щодо оснащення півмасок додатковими ущільнювачами за смугою обтюрації, встановлення додаткових елементів для кріплення наголів'я півмасок з метою забезпечення рівномірного розподілу зусилля за смугою обтюрації з урахуванням антропометричних відмінностей обличчя, збільшення площі фільтрів респиратора, що підвищує їх захисні властивості.

Ключові слова: засоби індивідуального захисту органів дихання, фільтрувальна півмаска, опір дихання, перепад тиску, коефіцієнт захисту, коефіцієнт проникнення, коефіцієнт підсмоктування, пиломісткість.

АННОТАЦІЯ

Чеберячко Ю.И. Развитие теории конструирования и совершенствования процессов индивидуального подбора и использования противопылевых респираторов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.01 – Охрана труда, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, 2018.

Диссертация посвящена разработке теоретических основ, методических положений и практических рекомендаций по улучшению защитных свойств фильтровальных средств индивидуальной защиты органов дыхания на основе их адаптации к условиям эксплуатации и лицу работника

Проведены сравнительные испытания защитной эффективности противопылевых респираторов в лабораторных и производственных условиях которые показали, что с увеличением содержания пыли в воздухе рабочей зоны коэффициент защиты респираторов уменьшается в среднем от 20 до 10 при концентрациях пылевых частиц 50 и 225 мг/м³, что обусловлено быстрым уменьшением пор между волокнами фильтрующего материала из-за оседания там крупнодисперсной фракции пыли.

Определены основные антропометрические размеры лиц, которые больше всего влияют на конструкцию полумасок, по результатам которых была построена полигональная 3D модель головы. Предлагается для ее построения использовать полигональную модель, которая позволяет с выдающимися антропометрическими размерами лица изменять ее текстуру. Для получения анатомически корректной модели, ключевые вершины должны соответствовать антропометрическим точкам на отсканированном изображении. Для этого проводим многоэтапную оценку пропорций головы с помощью взвешенной функции Гаусса радиального вида, а затем выполняем локальную подгонку с учетом топологической структуры.

Разработан 3D алгоритм конструирования полумасок, который отличается от существующих тем, что дополнительно на каждом этапе преобразования отсканированного изображения лица работника в цифровое изображение поверхности полумаски, которую можно изготовить на 3D принтере, добавляется проверка на соответствие индивидуальным параметрам лица: оценка параметров

полигональной модели головы; проверка соответствия изображения; предварительный расчет коэффициента защиты; проверка плотности прилегания опытного образца.

С помощью ИСР-метода рассчитана площадь прилегания полумаски к лицу. Установлено площадь полосы обтюрации и ее периметр. Рассчитан коэффициент изоляции полумасок. Проведенные исследования позволили систематизировать существующие подходы к конструированию полумасок и создать алгоритм разработки СИЗОД.

Предложена математическая модель, описывающая движение запыленных потоков в фильтрующей коробке. Установлены зависимости распределения скорости воздушного потока в фильтрующей коробке с различной геометрией и определены кинематические параметры запыленного потока воздуха по ее объему. Уточнена математическую модель, описывающую движение запыленных потоков в эластомерных фильтровальных респираторах с учетом величины подсоса через неплотности за полосой обтюрации.

Усовершенствована математическая модель изменения перепада давления на фильтрах респираторов в процессе оседания на них аэрозольных частиц, которая учитывает как фазу поверхностной фильтрации так и автофильтрацию. Оценено влияние скорости воздуха, концентрации аэрозольных частиц, параметров фильтровального слоя на время существования фазы автофильтрации.

Предложены способы автоматического контроля эффективности работы фильтрующих респираторов, с помощью установки датчика в подмасочное пространство, с помощью которого возможно оценивать плотности прилегания во время его эксплуатации, а также время работы фильтров до наступления критического значения перепада давления.

Предложено технические решения по совершенствованию конструкций многослойных фильтров с низким сопротивлением дыханию и высокой пылеёмкостью. Разработаны рекомендации по оснащению полумасок дополнительными уплотнителями за полосой обтюрации, установка дополнительных элементов для крепления оголовья полумасок с целью обеспечения равномерного распределения усилия за полосой обтюрации с учетом антропометрических размеров лиц.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты органов дыхания, фильтровальная полумаска, сопротивление дыхания, перепад давления, коэффициент защиты, коэффициент проникновения, коэффициент подсоса, пылеёмкость.

ABSTRACT

Yu.I. Cheberiachko. Development of the theory of designing and improving fit testing and dust mask use.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.26.01 – Occupational Safety, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, 2018.

The thesis, which is a complete academic research work, solves an important task for occupational safety and health of developing design and engineering of individual

respiratory organs protective devices based on their fitting to a user's face and adjustment to operational conditions, which suggests considering a combination of factors of individual and production nature.

It has been determined that the main respirator efficiency factors include reliable isolation of respiratory organs, high-quality air cleaning as well as timely and proper wearing of half-masks. As a result of studying protective and ergonomic properties of reusable half-masks in the working environment of a coal mine, it has been established that with the increasing dust content of the air in the working zone, the protection factor of respirators decreases on average from 20 to 10 with the dust particle concentration of 50 and 225 mg/m³; this is conditioned by rather rapid decrease in pores between fibres of filtering material because of coarse dust fraction settlement with corresponding increase in breathing resistance and penetration of dust through an obturation line. Moreover, under a respirator mask there prevails fine dust, which is the primary cause of occupational dust diseases. A 3-D algorithm of designing half-masks includes new stages: scanning workers' faces, developing a digital head model, constructing a digital half-mask model, testing the quality of new models at the design stage, selecting relevant filtering materials.

The mathematical model of changing pressure drop at respirator filters with aerosol particles settling on them has been improved. Unlike the known models, it considers not only the phase of surface filtration, but also auto-filtration which is expedient to be described using the model of a thick fibre, in which dust aggregates are approximated by smooth cylinders with a radius equal to the particle radius. Influence of wind speed, aerosol particle concentration, and filter layer parameters during the auto-filtration phase are estimated.

Techniques for automatic check of filtering respiration efficiency are suggested; setting a sensor in the space under the mask surface it is possible to estimate mask fitting while using it as well as during the filter operation till it reaches the critical value of pressure drop.

Engineering solutions on improving the design of multilayer filters with low breathing resistance and high dust capacity are suggested, which have been introduced at TOV NVP "Standart" (a Research and Development enterprise). Recommendations have been developed on equipping masks with extra sealing along the obturation line, setting additional elements for fitting mask headsets with the purpose of providing even force distribution along the obturation line taking into account anthropometric face diversity, increasing the area of respirator filters, which enhances their protective properties.

Keywords: individual respiratory organs protective devices, filtering half-mask, breathing resistance, pressure drop, protection factor, coefficient of penetration, aerosol capture coefficient, infiltration coefficient, dust capacity.

ЧЕБЕРЯЧКО Юрій Іванович

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
ПРОЦЕСІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПІДБОРУ І ВИКОРИСТАННЯ
ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПІРАТОРІВ**

(Автореферат)

Підписано до друку 04.02.2019. Формат 60x90/16.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 2,0.

Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. №87

Віддруковано в ТОВ «Барвікс».

Свідоцтво про внесення до державного реєстру

ДП № 24 від 25.07.2000 р.

49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 21