

УДК 614.894

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-27>

РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА ДЛЯ ГІРНИКІВ

Чеберячко Юрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-7307-1553

Хома Руслан Євгенійович,

доктор хімічних наук, професор,
професор кафедри аналітичної та токсикологічної хімії
Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова
ORCID ID: 0000-0002-5312-6382

Радчук Дмитро Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-8034-541X

Муха Олег Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
науковий співробітник лабораторії інженерно-технічних досліджень
Дніпропетровського науково-дослідного інституту судових експертиз
ORCID ID: 0000-0002-1311-8708

Шошин Дмитро Вячеславович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0009-4999-4134

Єфіменко Олексій Павлович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0005-8123-7353

Метою роботи є розробка нової конструкції фільтрувального респіратора для гірничих підприємств з урахуванням антропометричних параметрів обличчя працівників з покращеною формою смуги обтюраторії.

Використано метод оптичної тріангуляції для побудови 3D-моделі півмаски респіратора на основі визначення координат ключових антропометричних точок, а також функцію Гаусса радіального вигляду для згладжування та локальної підгонки моделі півмаски до топології обличчя користувача. Використано процес розробки півмаски на основі цифрового зображення обличчя, який складається з формування контурів півмаски за висотою і довжиною обличчя та визначення дизайну смуги обтюраторії.

Розроблено нову конструкцію фільтрувального респіратора з покращеною формою смуги обтюраторії, яка враховує антропометрію обличчя користувача. Вдосконалено метод 3D-моделювання півмаски респіратора шляхом визначення координат ключових антропометричних точок обличчя потенційних користувачів методом оптичної тріангуляції. Запропоновано процес визначення площі прилягання смуги обтюраторії півмаски до обличчя користувача. Встановлено, що зі збільшенням розміру півмаски площа контакту смуги обтюраторії півмаски з обличчям зменшується, що пов'язано зі зміною геометрії самої півмаски. Визначено, що респіратор до 70 % своєї смуги обтюраторії контактує з обличчям людини в ділянці щік.

Наукова новизна полягає в удосконаленні процесу проєктування півмаски фільтрувального респіратора з використанням методу оптичної тріангуляції для побудови півмаски за ключовими антропометричними

точками, а також функцію Гаусса радіального вигляду для локальної підгонки смуги обтюрації півмасок до топологічної структури обличчя користувача.

Практична цінність полягає у розробці процесу визначення площі прилягання смуги обтюрації півмаски до обличчя користувача.

Ключові слова: респіратор, смуга обтюрації, цифрова модель, антропометрія, пневмоконіоз.

Cheberyachko Yuriy, Khoma Ruslan, Radchuk Dmytro, Mukha Oleh, Shoshyn Dmytro, Efimenko Oleksii. Development of a new design filtering respirator for miners

The purpose of the research is to develop a new design of a filtering respirator for conditions of mining enterprises, taking into account the anthropometric parameters of workers' faces and featuring an improved the sealing line.

The optical triangulation method was used to design a 3D model of the respirator face blank based on the determination of the coordinates of key anthropometric points, as well as a Gaussian radial basis function for smoothing and local fitting of the half mask model to the user's facial topology.

A new design of a filtering respirator has been developed, which takes into account the user's facial anthropometry. The 3D modeling method of the respirator sample was improved by determining the coordinates of key anthropometric points of users' faces using the optical triangulation method. A process for determining the contact area of the sample with the user's face was proposed. It was established that as the size of the sample increases, the contact area of the sealing line with the face decreases, which is related to changes in the half mask's geometry.

The scientific novelty lies in improving the respirator design process through the use of the optical triangulation method to design the sample on key anthropometric points as Gaussian radial basis function for local adjustment of the facial topological structure.

The practical value consists in developing a process for determining the contact area of the half mask sealing line with the user's face.

Key words: respirator, sealing line, digital model, anthropometry, pneumoconiosis.

Вступ. Умови праці гірників часто супроводжуються високим рівнем запиленості, що значно перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Це створює серйозні ризики для здоров'я працівників, призводячи, зокрема, до розвитку пневмоконіозу, професійного раку легень, бронхітів та інших захворювань дихальної системи [1]<https://journal-nndipbor.com/index.php/journal/article/download/98/91/>. За даними проведених досліджень, понад половина професійних захворювань гірників мають пилову етіологію, що обумовлює необхідність удосконалення засобів індивідуального захисту органів дихання. Сучасні фільтрувальні респіратори не завжди забезпечують достатній рівень захисту, особливо в умовах високої концентрації пилу, що накопичується в підмасковому просторі [2]https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24326/1/NVKPI2017-2_14.pdf. Це зумовлено насамперед підсмоктуванням нефільтрованого повітря через нещільності смуги обтюрації між обличчям користувача та лицевою частиною респіратора. Зазначена проблема пов'язана з неможливістю налаштування обтюратора певної моделі респіратора під всі можливі антропометричні параметри обличчя користувачів. Наприклад, у відомого фільтрувального респіратора «Шахтар» (рис. 1), який характеризується значною пиломісткістю, розробники більше уваги звернули на надійну й герметичну фіксацію патронів та зменшення його габаритів і маси [3].



Рис. 1. Загальний вигляд респіратора «Шахтар»: 1 – еластомерна півмаска; 2 – наголовний гарнітур

Звісно, вирішення зазначених задач призвело до покращення комфорту використання респіратора, але не забезпечило підвищення захищеності користувачів. Звідси виникає потреба в розробці нової конструкції фільтрувального респіратора, що дасть змогу підвищити ефективність захисту гірників. Це може бути виконано шляхом розробки нових конструкцій обтюраторів, які максимально відповідатимуть антропометрії обличчя.

Аналіз літературних джерел. Задачу з підвищення ізолювальних властивостей півмасок респіратора намагались активно вирішувати низка фахівців. Зокрема, у роботі [4] досліджено конструкцію півмаски респіратора для покращення щільності прилягання та були запропоновані зміни до каркаса, який може підлаштовуватися до різної антропометрії обличчя, що зменшує втрати герметичності та підвищує

комфорт користувача. Однак цей каркас використовується тільки для одноразових півмасок. Спроба вирішити вищезазначену проблему була запропонована авторами в статті [5]. Так, у роботі було зазначено, що під час вибору фільтрувальних респіраторів з урахуванням умов праці, антропометричних параметрів обличчя користувачів і терміну захисної дії фільтрів особливу увагу звертають саме на забезпечення герметичності півмаски та щільності прилягання до обличчя, що може бути не легким процесом. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати метод термографування [5]. Для кардинального вирішення зазначеної проблеми, зокрема в умовах гірничих підприємств, існує можливість використання моторизованого респіратора. Його особливість полягає в тому, що під маскою створюється позитивний тиск, який унеможливує потрапляння нефільтрованого повітря через щілини [6]. Разом із тим у таких моторизованих респіраторах існують інші задачі, які потребують вирішення. Наприклад, є певна залежність між опором диханню фільтра та розрядом джерела живлення респіратора, що дає можливість прогнозувати термін безпечної експлуатації [7]. Також існує проблема із забезпечення герметичності фланцевих з'єднань між моторовим блоком респіратора та лицевою частиною [8].

Отже, можна зробити висновок, що щільність прилягання півмаски респіратора до обличчя користувача є критичним фактором, що визначає ефективність захисту органів дихання від пилу, аерозолів і токсичних газів. Незважаючи на значний прогрес у розробці фільтрувальних матеріалів, проблема герметичності залишається частково невирішеною, особливо в умовах гірничої промисловості. Це зумовлено антропометричними відмінностями обличчя (форма та розміри обличчя, наявність волоссяного покриву, використання окулярів), що суттєво впливає на герметичність прилягання; відсутністю універсальної конструкції, яка б забезпечувала щільне прилягання для всіх типів обличчя; недостатньою адаптацією ущільнювачів до коливань температури та відносної вологості повітря, що характерно для гірничих умов [9]. Звідси формуються напрями подальших досліджень, що стосуються індивідуалізації конструкції півмаски з використанням 3D-сканування обличчя, упровадження термографічного контролю герметичності, розробки гнучких, адаптивних матеріалів ущільнювачів, які змінюють форму залежно від температури та тиску.

Метою роботи є розробка нової конструкції фільтрувального респіратора для гірничих

підприємств з урахуванням антропометричних параметрів обличчя працівників з покращеною формою смуги обтюраторії.

Методи та методики дослідження. Процес виготовлення будь-якого фільтрувального респіратора складається з декількох кроків (рис. 2) [8].



Рис. 2. Етапи проектування фільтрувальних респіраторів

На першому кроці виконується аналіз умов експлуатації майбутніх респіраторів, що дасть змогу зрозуміти функціональне призначення захисного пристрою, визначитись із класом захисту, підібрати відповідні фільтрувальні та конструктивні матеріали. Другий крок присвячений підготовці до розробки конструкції фільтрувального респіратора та полягає у детальній аналізі антропометричних параметрів майбутніх користувачів для побудови цифрової моделі голови, геометричні розміри якої є основою каркаса лицевої частини. На третьому кроці проводиться розробка 3D-моделі (проектування) лицевої частини, вхідними параметрами якої є ключові антропометричні точки обличчя. Зазвичай розробляється від трьох до п'яти розмірів півмасок (шляхом згрупування схожих типорозмірів). Наступний крок присвячений вибору фільтрувальних матеріалів і розрахункам за математичними моделями захисних властивостей спроєктованої лицевої частини з внесенням відповідних коректив. Останній крок – це виготовлення макетів та їх тестування в лабораторних умовах на відповідність вимогам стандарту до виробу.

До особливостей аналізу антропометричних параметрів обличчя за допомогою 3D-сканування потрібно віднести поєднання декількох зображень в одне ціле. Це зображення в подальшому обробляється для визначення реальних розмірів (наприклад, можна скористатися методом Active Shape Models або методом об'єднаних моделей), при цьому взаємозв'язок між окремими зображеннями виражається через

зіставлення нормалі I з певною площиною, яка задається параметрами камери сканера і проєктора (рис. 3) через рівняння (1).

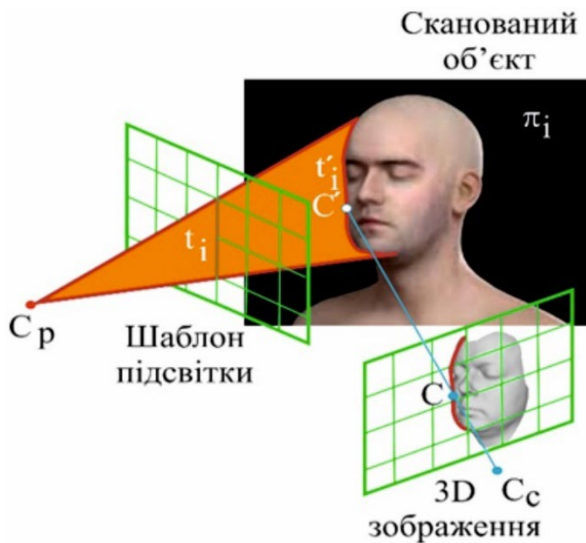


Рис. 3. Схема побудови моделі оптичної триангуляції: C_p і C_c – оптичні центри проєктора та камери

$$[0, 1 - d(i)] \times P_p [x, y, z]^T = 0 \quad (1)$$

де P_p – проєкційна матриця проєктора; (x, y, z) – координати точки, які належать нормалі.

Для побудови моделі голови використовують відповідне програмне середовище, у якому за допомогою функції 3D-реконструкції визначають координати антропометричних точок як (2):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \text{reconstruct}(u, v, i, k, P_c, P_p), \quad (2)$$

де P_c , P_p – проєкційні матриці камери та проєктора, що визначаються у процесі калібрування; u, v – координати точок, що визначаються алгоритмами аналізу цифрового зображення й ідентифікацією шаблону підсвічування, які за масивом кольорових пікселів I дають можливість отримати безліч $\{u_k = \{(u_k^i, v_k^i)\}\}$ ідентифікованих точок шаблону; i – індекс прямої шаблону; k – коефіцієнт коригування між матрицями даних відсканованих зображень.

У подальшому шляхом багатоетапної оцінки пропорцій голови, представлених хмарою точок (рис. 2), з використанням зваженої функції Гауса радіального вигляду та локальної підгонки з урахуванням топологічної структури будується цифрове зображення. Так, на першому етапі задаються координатами $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, 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. 4).

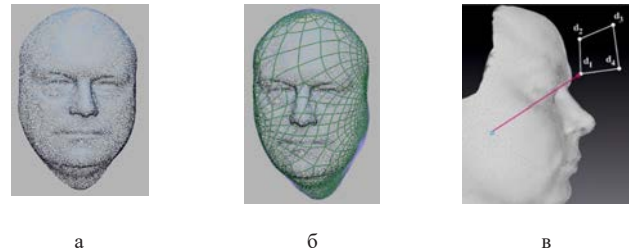


Рис. 4. Етапи перетворення сканованого зображення голови з хмари точок (а) з нанесеними сплайнами (б) у цифровий вигляд з розміткою і координатами (в)

Кожний сплайн рівномірно розбивається додатковими точками для утворення рівної кількості ділянок на всіх горизонтальних перетинах. Додаткові точки поєднуються між собою, утворюючи сітку чотирикутників (рис. 4 б). Для підгонки розмітки до антропометричних точок користуємося трьома типами перетворень: ідентичним, зміщенням відносно встановлених точок та аффіно відносно вже розміщених точок.

На цьому етапі виникає потреба в побудові типорозміру облич. Для цього використовуємо відомий метод компонент, який базується на десяти розмірах обличчя, що становлять основу для розрахунку комплексних показників – так званих компонент PC1 і PC2.

PC1 (перший компонент) = $0,343264 \cdot (\text{ширина голови у лоба}) + 0,426498 \cdot (\text{ширина лиця}) + 0,372717 \cdot (\text{ширина лиця за кутами нижньої щелепи}) + 0,329648 \cdot (\text{довжина лиця}) + 0,363474 \cdot (\text{відстань між бровами}) + 0,372241 \cdot (\text{ширина голови}) + 0,113578 \cdot (\text{висота носа}) + 0,301125 \cdot (\text{ширина носа біля рота}) + 0,202311 \cdot (\text{ширина перенісся}) + 0,193650 \cdot (\text{довжина носа})$.

PC2 (другий компонент) = $-0,152951 \cdot (\text{ширина голови у лоба}) - 0,039087 \cdot (\text{ширина лиця}) - 0,093279 \cdot (\text{ширина лиця за кутами нижньої щелепи або глибина обличчя}) + 0,359799 \cdot (\text{довжина лиця}) - 0,173099 \cdot (\text{відстань між бровами}) + 0,013306 \cdot (\text{ширина голови}) + 0,551842 \cdot (\text{висота носа}) - 0,210833 \cdot (\text{ширина носа біля рота})$.

За цими компонентами всі типи обличчя працівників поділяють на п'ять основних категорій: малі, короткі – широкі, середні, довгі й високі, великі (рис. 5), за якими в подальшому формують вимоги до конструкції ЗІЗОД.

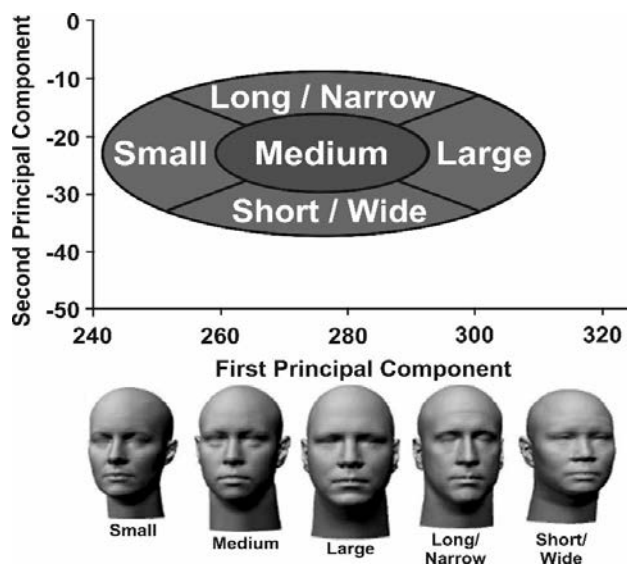


Рис. 5. Розподіл розмірів обличч користувачів на 5 категорій за компонентами PC1 і PC2

Вирішення наступної задачі – це перетворення цифрового зображення обличчя, заданого в тривимірній системі координат, у параметри індивідуальної півмаски – представлено у формі алгоритму (3):

$$F_0 = \Pi(F_n), \quad (3)$$

де F_0 – форма обличчя, що має певні початкові значення координат x, y, z для точок 1, 2, 3, ..., n , що визначають її параметри в тривимірній системі координат; F_n – форма півмаски, обумовлена зміною початкових значень координат x, y, z ; Π – знак перетворення внаслідок процесу створення півмаски.

Процес розробки півмаски на основі цифрового зображення обличчя складається з декількох кроків: формування контурів півмаски за висотою і довжиною обличчя та визначення дизайну смуги обтюрації (рис. 6 та 7).

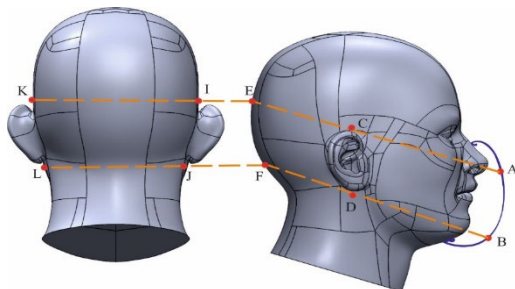


Рис. 6. Розробка дизайну смуги обтюрації: визначення нижньої точки координат півмаски на підборідді (а); визначення верхньої точки координат півмаски на підборідді та формування контуру півмаски (б); визначення ширини півмаски та дизайну обтюратора (в)

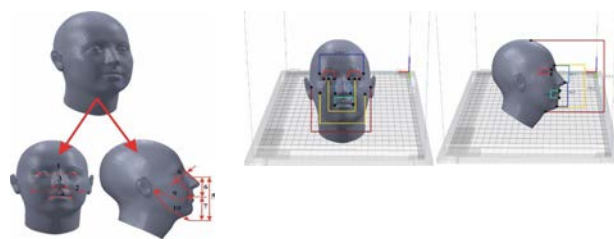


Рис. 7. Визначення координат ключових точок

Останній крок – це побудова форми півмаски за відомою поверхнею обтюратора. Цей етап виконується за допомогою сплайнів, якими поступово формується каркас і з'єднуються елементи його поверхні (рис. 8).

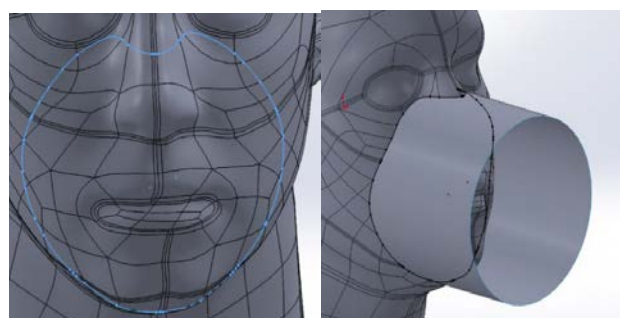


Рис. 8. Встановлена координатна лінія смуги обтюрації

Після визначення форми смуги обтюрації переходимо до побудови півмаски. Встановлені геометричні розміри можуть накладати додаткові умови формування базових ескізів елементів для майбутнього каркаса. Для створення формованої півмаски розкриємо отриману смугу на дві частини – перенесімо її підборіддя, з урахуванням динамічної прив'язки між ними.

Загальна висота корпусу для цього обличчя дорівнюватиме 108 мм, тобто відповідатиме розміру АБ, ширина обличчя – 110 мм, тобто відповідатиме розміру ВГ, глибина маски визначається відповідно до розміру ДЖ. Формуємо каркас середньої частини півмаски. Головною умовою його створення є необхідність гнучкості в точках А та Б. Тут існує декілька варіантів формовки (трапецієвидний, квадратний, напівкруглий, трикутний та овальний). Загальні варіанти формовки суттєво впливають на площу фільтрувальної поверхні й обмеження поля зору. Вибираємо метод формування квадрат, оскільки він дає змогу досить легко визначити кут згину для формування каркаса 90 градусів. Для визначення прилягання потрібно врахувати радіус згину; пропонуємо вибирати в діапазоні від 3–5 мм (оскільки це впливатиме на кут згину верхньої і нижньої частини каркаса). У такому

випадку для визначення розвертки каркаса потрібно провести додавання АБ + ДЖ + ДЖ, але оскільки нижню частину роблять більшою, а верхню меншою, то пропонуємо проводити розрахунок висоти верхньої частини на 16 % менше за верхню. У такому випадку формула висоти матиме вигляд:

$$B = AB + DJ + 0,84 DJ + 2 D,$$

де Д – величина деформуючого радіуса, мм.

Визначення ширини залежатиме від ВГ, але оскільки на нього впливають лінії згину, потрібно чітко обмежити умови розрахунку, ось, наприклад, у нашому випадку формула висоти матиме вигляд:

$$R = BG + 2 D.$$

Інколи в конструкціях деформуючий радіус може бути різним, тому в такому випадку пропонуємо попарно їх додавати.

Для спрощення розрахунку пропонуємо прийняти, що лицева частина маски є симетричною, і тим самим поділити її навпіл, промодельовувати згин каркаса без отворів як суцільної моделі, починаючи з ескізу та завершуючи згинами.

Останній крок – це поєднання лицевої частини маски з 3D-моделями голів, які побудовані за даними параметричних таблиць із метою формування певного типоряду півмасок, що передбачає підгонку півмаски до обличчя з подальшим визначенням ширини площі прилягання, яка необхідна для попередньої оцінки коефіцієнта захисту фільтрувальної півмаски. Основні кроки такі (рис. 9):

- поєднання 3D-моделей голів користувачів за параметричною таблицею з півмаскою;
- визначення розмірів зон обличчя, які характеризуються однаковою пружністю ділянок;
- встановлення параметрів сітки для деталізації областей дослідження, яка наноситься на моделі обличчя та півмаску;
- розрахунок площі контакту між півмаскою і обличчям для подальшої оцінки.

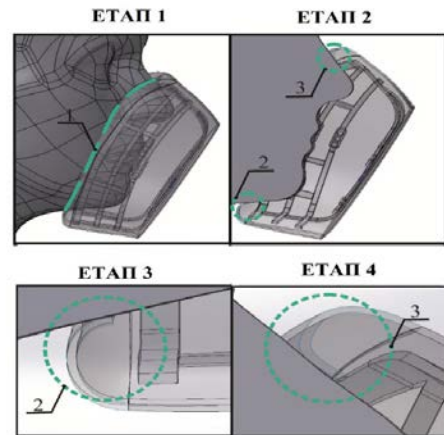


Рис. 9. Етапи поєднання півмаски із цифровою моделлю голови для оцінки її щільності прилягання до обличчя

Результати. Для підвищення ізолювальних властивостей базової моделі респіратора «Шахтар» було визначено антропометричні параметри облич потенційних користувачів віком від 25 до 30 років на вугільній шахті. Результати наведені в табл. 1.

На основі вищезазначених даних побудовані цифрові моделі голів, які наведені на рис. 10. Для кожного типу цифрової моделі голови були розраховані площі прилягання півмаски до обличчя.

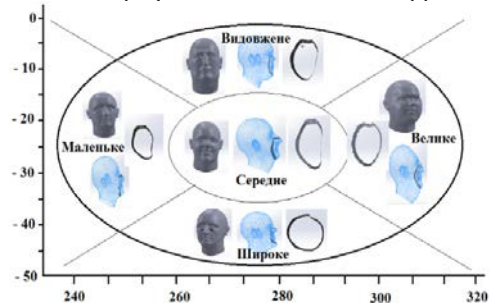


Рис. 10. Вигляд цифрових моделей голів потенційних користувачів із рекомендованими площами прилягання півмаски до обличчя

Таблиця 1

Результати вимірів розмірів обличчя (мм) за віком від 25 до 30 років

Розмір	Чоловіки (35)	Жінки (15)	Усього (50)
GONI	124,2 ± 9,1	118,1 ± 9,1	123,4 ± 10,1
ZYGO	141,3 ± 8,9	131,3 ± 6,0	139,5 ± 8,9
NOSEBRTH	29,7 ± 1,9	27,6 ± 3,3	28,0 ± 3,6
LIPLGTHH	47,4 ± 3,7	45,0 ± 3,7	46,7 ± 4,8
MENSELL	121,1 ± 8,4	117,2 ± 5,8	119,8 ± 7,8
NOSEPRH	45,3 ± 4,5	41,2 ± 3,0	43,7 ± 5,0
MSNL	21,1 ± 2,7	19,4 ± 2,2	20,3 ± 2,6

На основі побудованих цифрових моделей голів у подальшому був розроблений загальний дизайн лицевої частини півмаски (рис. 11).

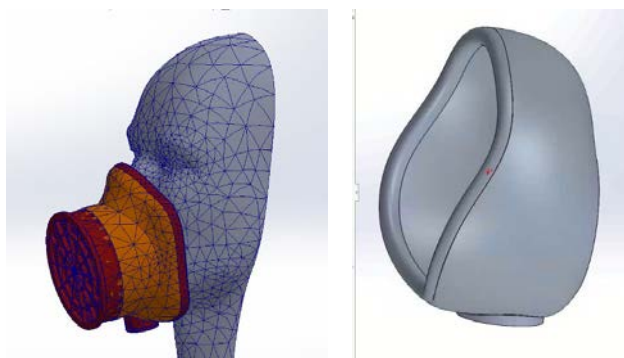


Рис. 11. Загальний дизайн півмаски для респіратора «Шахтар»

Для кожної моделі півмаски, яка відповідає цифровим розмірам, були розраховані відповідні розміри ширини, довжини та глибини лицевої частини півмаски, які дадуть змогу забезпечити відповідну площу смуги обтюрації. Для визначення параметрів лицевої частини додатково спиралися на дані таблиці 1, а саме для моделювання ширини – на параметр ZYGO, висоти – на параметр MENSELL, глибини – на параметр NOSEPRH. Результати наведені в табл. 2.

Загальний вигляд цифрової моделі респіатора «Шахтар» наведено на рисунку 12.



Рис. 12. Запропонована модель респіратора «Шахтар»

Результати розрахунку площі смуги обтюрації для півмаски, зіставленою з різними моделями голів, наведені в таблиці 3.

Результати, наведені в таблиці 3, демонструють залежність ефективності прилягання півмаски до обличчя користувача від її геометричних параметрів. Зі зменшенням розміру півмаски (від варіанта 1 до 5) спостерігається чітка тенденція до зменшення загальної площі контакту між смугою обтюрації та обличчям – від 57,2 см у варіанті 1 до 31,4 см² у варіанті 5. Аналогічно зменшується і середня ширина смуги обтюрації – з 0,94 до 0,35 см.

Найбільший внесок у площу контакту забезпечують щоки (права та ліва), які в сукупності формують понад 70 % загальної площі прилягання.

Наприклад, у варіанті 1 площа контакту з правою та лівою щоками становить 42,2 см², що свідчить про їх ключову роль у забезпеченні герметичності. Водночас площа контакту в зонах перенісся та підборіддя є значно меншою, однак саме ці ділянки є критичними з погляду потенційного підсмоктування нефільтрованого повітря.

Аналіз також виявив певну асиметрію між правою та лівою щоками, що може бути зумовлено як анатомічними особливостями обличчя, так і похибками під час 3D-сканування. Це підкреслює важливість індивідуального підходу до проектування півмасок.

Зменшення площі контакту у варіантах 4 та 5 свідчить про потенційне зниження

Таблиця 2
Основні геометричні розміри лицевої частини півмаски

Варіанти	Розміри лицевої частини півмаски		
	Ширина, мм	Довжина, мм	Глибина, мм
1	131	112	44
2	135	116	46
3	140	120	49
4	144	124	51
5	148	128	53

Таблиця 3
Результати розрахунку площі смуги обтюрації для півмаски, зіставленої з різними моделями голів

Варіанти півмасок	Площа обтюратора відповідно до зон обличчя, см ²				Загальна площа контакту, см ²	Середня ширина смуги, обтюратора см
	перенісся	права щока	ліва щока	підборіддя		
1	4,2	21,3	20,9	10,8	57,2	0,94
2	4,1	20,1	18,3	9,8	52,8	0,92
3	3,2	16,3	14,8	9,3	44,1	0,83
4	1,3	10,2	12,8	7,3	31,6	0,36
5	1,3	10,3	12,3	7,5	31,4	0,35

герметичності для користувачів з меншими розмірами обличчя. Це обґрунтовує потребу у використанні адаптивних ущільнювачів або додаткових засобів підгонки для забезпечення належного рівня захисту.

Таким чином, результати аналізу підтверджують доцільність розробки типоряду півмасок, що враховують морфологічне різноманіття обличчя користувачів. Особливу увагу слід приділяти оптимізації форми смуги обтюрації в зонах перенісся та підборіддя, а також забезпеченню рівномірного розподілу тиску по периметру півмаски.

Дискусія. Побудовані цифрові моделі голів дали можливість візуалізувати зони потенційного прилягання й оптимізувати геометрію обтюратора. Аналіз розрахованих площ обтюрації показав, що зі збільшенням розміру півмаски площа контакту зменшується (від 57,2 до 31,4 см²), що зумовлено пропорційним зростанням габаритів обличчя та зміною радіусів кривизни в ділянках перенісся, щік і підборіддя. Отримані нами дані підтверджуються результатами роботи [10], у якій автори досліджували методи визначення площі контакту між лицевою частиною та муляжем голови, розглядалися муляжі голови п'яти розмірів. У підсумку було проведено порівняння експериментальних даних та результатів моделювання.

Можна зауважити, що існуючі моделі фільтрувальних респіраторів не забезпечують достатньої герметичності через суттєві відмінності антропометричних параметрів обличчя користувачів [11]. Проведені вимірювання обличчя 50 працівників гірничих підприємств показали значну варіацію параметрів ширини, висоти та глибини голови, зокрема показників ZYGO (міжвилична ширина), MENSELL (висота обличчя) та NOSEPRH (проекція носа), які безпосередньо впливають на якість прилягання півмаски. Різниця між крайніми значеннями ширини обличчя (ZYGO) перевищує 17 %, що підтверджує неможливість забезпечення щільного прилягання однією уніфікованою моделлю респіратора. Це обґрунтовує потребу у створення типоряду півмасок із п'яти розмірів, які охоплюють основні морфологічні групи обличчя користувачів.

Ефективність герметизації респіратора визначається не тільки загальними розмірами півмаски, а й формою її поверхні, яка має враховувати локальну пружність тканин обличчя та рівномірний розподіл тиску по периметру смуги обтюрації. У роботі [12] автори отримали подібні до наших висновки, що щільність прилягання та тиск, що створює лицева частина на

обличчя, це є критичним параметром захисної ефективності респіратора.

Використання 3D-моделювання дало змогу створити анатомічно адаптовану конструкцію півмаски респіратора «Шахтар», що враховує індивідуальні антропометричні параметри користувачів. Запропонований підхід дає можливість формувати лицеві частини з урахуванням реальної геометрії обличчя; зменшити ризик підсмоктування нефільтрованого повітря; оптимізувати ергономіку та комфорт під час тривалого використання; підвищити коефіцієнт захисту завдяки більш рівномірному розподілу контактного тиску.

Таким чином, 3D-аналітичний підхід до проектування респіраторів може стати ефективним інструментом для індивідуалізації засобів захисту органів дихання, особливо в умовах гірничої промисловості, де антропометричне різноманіття користувачів є суттєвим чинником впливу на захисні властивості ЗІЗОД.

Більш покращений підхід застосовували автори в роботі [13], вони застосовували метод на основі машинного навчання для проектування 3D-дизайну респіратора. Параметрична модель 3D-людського обличчя була побудована з антропометричної бази даних, що складається з 495 моделей облич. Кореляцію між параметрами було оцінено за допомогою аналізу головних компонентів та лінійної регресії. Використовуючи ці значення параметрів як вхідні дані, параметрична модель генерує 3D-сітку людського обличчя, які слугують орієнтиром для побудови індивідуальної моделі респіратора. Отже, було проведено серію експериментів з 10-кратною перехресною перевіркою, щоб перевірити ефективність запропонованого методу.

На жаль, отримані нами теоретичні результати, проєктовані шляхом комп'ютерного моделювання, не були перевірені в натурному вигляді, тому підтвердження даних розрахунків є актуальним для майбутніх досліджень.

Висновки

1. Розроблено нову конструкцію фільтрувального респіратора з покращеною формою смуги обтюрації, яка враховує антропометрію обличчя користувача.

2. Вдосконалено процес 3D-моделювання півмаски респіратора за рахунок використання методу оптичної тріангуляції для побудови півмаски респіратора за ключовими антропометричними точками, а також функції Гаусса радіального вигляду для локальної підгонки смуги обтюрації півмасок до топологічної структури обличчя користувача.

3. Запропоновано процес визначення площі прилягання смуги обтюраторів півмаски до обличчя користувача, що дало змогу встановити: зі збільшенням розміру півмаски площа контакту смуги обтюраторів півмаски з обличчям зменшується, що пов'язано зі зміною геометрії самої півмаски.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левченко О. Г., Полукаров Ю. О., Безушко О. М., Гончарова О. М. Порівняльна гігієнічна оцінка магнітних полів при різних способах контактного зварювання. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2024. № 40 (1–2). С. 27–36. <https://doi.org/10.36804/ndpibop.40-1-2.2024.27-36>.
2. Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності конструкцій фільтрувальних коробок. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2017. № 2. С. 114–118. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551>.
3. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Яворська О. О., Книш І. М. Проблеми перевірки захисних властивостей фільтрувальних респіраторів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2018. № 55. С. 384–391.
4. Bazaluk O., Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Lozynskyi V., Knysh I., Saik P., Naumov M. Development of a dust respirator by improving the half mask frame design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18 (10). 5482. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>.
5. Чеберячко С., Дерюгін О., Мірненко В., Бородіна Н. Вибір ефективних фільтрувальних респіраторів. Проблеми і можливості. *Social development and Security*. 2020. № 10 (4). С. 23–41. <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3>.
6. Cheberiachko S. I., Slavinskyi D. V., Cheberiachko Yu. I., Deryugin O. V. Mathematical model of air flow movement in a motorized filter respirator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 3. P. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/097>.
7. Strickland K. T., Bergman M. S., Xu S., Zhuang Z. A manikin-based assessment of loose-fitting powered air-purifying respirator performance at variable flow rates and work rates. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2023. Vol. 20 (7). P. 279–288. <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2205481>.
8. Litot O., Manko T. Study of the Influence of Surface Roughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics on the Sealability of Disconnectable Joints in Rocket and Space Technology. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2023. Vol. 1. P. 263–265. URL: <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/51>.
9. Edirisooriya M., Haas E. Examining the Roles of Training, Fit Testing, and Safety Climate on User Confidence in Respiratory Protection: A Case Example with Reusable Respirators in Health Delivery Settings. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (17). 12822. <https://doi.org/10.3390/su151712822>.
10. Lei Z., Yang J. Contact Area Determination between a N95 Filtering Facepiece Respirator and a Headform. In: Duffy, V.G. (eds) Digital Human Modeling. ICDHM 2011. *Lecture Notes in Computer Science*. 2011. Vol. 6777. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21799-9_13.
11. Yu M., Griffin L., Durfee W., Arnold S. Face anthropometry for filtering facepiece respirators: analysis of the association between facial dimensions and respirator fit. *Annals of Work Exposures and Health*. 2024. Vol. 68, Issue 3. P. 312–324. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae005>.
12. Xu M., Lee P., Collins D. The critical importance of mask seals on respirator performance: An analytical and simulation approach. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16 (2). e0246720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246720>.
13. Chu C. H., Huang S. H., Yang C. K., Tseng C. Y. Design customization of respiratory mask based on 3D face anthropometric data. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2015. Vol. 16. P. 487–494. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0066-5>.

REFERENCES:

1. Levchenko, O., Polukarov, Y., Bezushko, O., & Goncharova, O. (2024). Porivnialna hiiienichna otsinka mahnitnykh poliv pry riznykh sposobakh kontaktnoho zvariuvannia [Program and analytical complex of the industrial safety and health analysis system]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Labour Protection Problems in Ukraine*, 40 (1–2), 27–36. <https://doi.org/10.36804/ndpibop.40-1-2.2024.27-36> [in Ukrainian].
2. Cheberiachko, S., Frundin, V., Cheberiachko, Yu., & Radchuk, D. (2017). Doslidzhennia efektyvnosti konstruksii filtruvalnykh korobok [Research into the effectiveness of filter box designs]. *Naukovi visti NTUU "KPI" – KPI Science News*, 2, 114–118. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551> [in Ukrainian].
3. Cheberiachko, S., Cheberiachko, Yu., Yavorska, O., & Knysh, I. (2018). Problemy perevirky zakhysnykh vlastyvostei filtruvalnykh respiratoriv [Problems while testing protective properties of filtering respirators]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU – The Collection of Research Papers of the National Mining University*, 55, 384–391 [in Ukrainian].

4. Bazaluk, O., Cheberiachko, S., Cheberiachko, Y., Deryugin, O., Lozynskyi, V., Knysh, I., Saik, P., & Naumov, M. (2021). Development of a Dust Respirator by Improving the Half Mask Frame Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (10), 5482. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>.
5. Cheberiachko, S., Deryugin O., Mirnenko, V., & Borodina, N. (2020). Vybir efektyvnykh filtruvalnykh respiratoriv. Problemy i mozhyvosti [Selection of effective filter respirators. Challenges and opportunities]. *Social Development and Security*, 10 (4), 23–41. <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3> [in Ukrainian].
6. Cheberiachko, S., Slavinskyi, D., Cheberiachko, Yu., & Deryugin, O. (2023). Mathematical model of air flow movement in a motorized filter respirator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/097>.
7. Strickland, K., Bergman, M., Xu, S., & Zhuang, Z. (2023). A manikin-based assessment of loose-fitting powered air-purifying respirator performance at variable flow rates and work rates. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 20 (7), 279–288. <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2205481>.
8. Litot, O., & Manko, T. (2023). Study of the Influence of Surface Roughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics on the Sealability of Disconnectable Joints in Rocket and Space Technology. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 263–265. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/51>.
9. Edirisooriya, M., & Haas, E. (2023). Examining the Roles of Training, Fit Testing, and Safety Climate on User Confidence in Respiratory Protection: A Case Example with Reusable Respirators in Health Delivery Settings. *Sustainability*, 15 (17), 12822. <https://doi.org/10.3390/su151712822>.
10. Lei, Z., & Yang, J. (2011). Contact Area Determination between a N95 Filtering Facepiece Respirator and a Headform. In: Duffy, V.G. (eds) Digital Human Modeling. ICDHM 2011. *Lecture Notes in Computer Science*, 6777. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21799-9_13.
11. Yu, M., Griffin, L., Durfee, W., & Arnold, S. (2024). Face anthropometry for filtering facepiece respirators: analysis of the association between facial dimensions and respirator fit. *Annals of Work Exposures and Health*, 68 (3), 312–324. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae005>.
12. Xu, M., Lee, P., & Collins, D. (2021). The critical importance of mask seals on respirator performance: An analytical and simulation approach. *PLoS ONE*, 16 (2), e0246720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246720>.
13. Chu, C. H., Huang, S. H., Yang, C. K., & Tseng, C. Y. (2015). Design customization of respiratory mask based on 3D face anthropometric data. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 16, 487–494. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0066-5>.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 04.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026