



<https://doi.org/10.15407/scin16.05.097>

**С.І. ЧЕБЕРЯЧКО, Ю.І. ЧЕБЕРЯЧКО, І.А. ШАЙХЛІСЛАМОВА**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,  
просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, 49005, Україна,  
+380 56 744 1411, +380 56 247 0810, rector@nmu.org.ua

## ПРОЄКТУВАННЯ ПІВМАСОК ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ РЕСПІРАТОРІВ

**Вступ.** Серед професійних захворювань хвороби органів дихання є найрозповсюдженішими в світі, основною причиною виникнення яких є забруднення робочої зони шкідливими аерозолями та використання невідповідних антропометричним розмірам обличчя засобів індивідуального захисту органів дихання.

**Проблематика.** Ефективність фільтрувальних респіраторів залежить від двох компонентів: часу захисної дії фільтрів та ізолюваних властивостей півмасок. Це вимагає проведення відповідних досліджень для побудови конструкцій півмасок, які дозволять забезпечити високі ізоляційні властивості.

**Мета.** Підвищення захисної дії фільтрувальних респіраторів шляхом удосконалення їхньої конструкції, яка відповідає антропометричним параметрам обличчя.

**Матеріали й методи.** Для побудови поверхні півмаски застосовано рівняння вільної енергії вигнутої довільної пластинки, яке описується двовимірною сплайн-поверхнею, а її невідомі коефіцієнти встановлюють методом лінійної інтерполяції на основі даних тривимірних координат ключових точок антропометричних рис обличчя.

**Результати.** Визначено закономірності формування поверхні півмаски, ґрунтуючись на даних тривимірних координат ключових точок антропометричних параметрів обличчя. 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.

**Висновки.** Розроблено алгоритм проектування півмасок з урахуванням результатів 3D-сканування обличчя, створення цифрових моделей голови та на їхній основі – поверхні півмасок і конструкції обтюратора. Визначено раціональні параметри фільтрувальної коробки, розміру вихідного отвору для забезпечення мінімального перепаду тиску та рівномірного розподілу пилового осаду на фільтрувальній поверхні.

**Ключові слова:** модель, півмаска, респіратор, обтюратор, коефіцієнт ізолювання.

Серед професійних захворювань, зафіксованих у 2017–2018 рр., перше місце належить хворобам органів дихання – 40,1 % від загальної кількості професійних захворювань, що є наслідком роботи у забрудненій шкідливими аеродисперсними частинками (пил, дим, туман), газами та парами робочої зони, а також відсутності або використання засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД), які не

Цитування: Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І., Шайхлісламова І.А. Проектування півмасок фільтрувальних респіраторів. *Наука іннов.* 2020. Т. 16, № 5. С. 97–109. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.097>

відповідають вимогам щодо їхнього функціонального призначення та антропометричними розмірами обличчя користувачів.

Еластомерні півмаски є невід'ємною частиною багаторазових фільтрувальних респіраторів. Від їхньої конструкції залежать надійне припасування до обличчя, рівень комфорту, можливість спілкування [1]. Численні дослідження з визначення ефективності респіраторів в реальних виробничих умовах показали, що при правильному виборі фільтра загальна ефективність ЗІЗОД визначається просочуванням невідфільтрованого повітря через зазори між лицьовою частиною півмаски (респіратора) і обличчям. Цей шлях і є основним шляхом проникнення забрудненого повітря до органів дихання. Виникнення зазорів залежить від низки факторів: антропометрії обличчя виконуваної роботи, конструкції наголів'я і обтюратора та інших. При цьому їхні розміри є непостійною величиною. В результаті коефіцієнт захисту (КЗ) може змінюватися в десятки разів за лічені хвилини [2]. Тому авторські дослідження спрямовано на встановлення основних закономірностей формування конструкцій еластомерних півмасок задля підвищення їхньої ефективності.

Надійне ізолювання органів дихання півмасками невід'ємно пов'язане з антропометричними точками обличчя. До найбільш проблемних місць, де частіше за все виникають зазори за сму-

гою обтюраторії належить область перенісся [3] — біля 84 % зазорів зафіксовано саме в цій області (біля носа і щік). Також негативні результати при перевірці ізолювальних властивостей ЗІЗОД фіксуються при розмові (міміці). Більшість фахівців вирішення цієї проблеми вбачають в детальному дослідженні антропометричних характеристик обличчя, виявленні або найбільш впливових розмірів на ізолювальні властивості або обчисленні універсальних «компонентів», які враховують всі виміряні параметри обличчя.

Отже, постає завдання у актуальності дослідження впливу антропометричних характеристик обличчя на дизайн каркасу еластомерних півмасок, який би забезпечив їй високі ізолювальні властивості.

Виготовлення півмасок — це складний процес, що складається з розробки конструкторської документації, технічного завдання, ескізного та технічного проекту, робочої документації [4]. Виконання названих етапів вимагає значної кількості часу й відповідної фахової підготовки. Сучасний розвиток промисловості постійно вимагає скорочення цього процесу без втрати якості кінцевого продукту. Для цього запропоновано різні підходи, зокрема використання автоматизованих систем проектування. Однак процес проектування респіраторів не достатньо формалізований і переважно базується на евристичних методах, які спира-

Таблиця 1. Взаємозв'язок параметрів обличчя та ізолювальних властивостей півмасок

Модель респіратора	Кількість учасників дослідження	Критичні антропометричні точки	Джерело
Півмаска U.S. Safety Series 200	39 чоловіків, 34 жінки	Довжина носа, довжина обличчя і довжина губ	[17]
Півмаска U.S. Safety Series 200	38 чоловіків, 30 жінок	Те саме	[18]
АО 5-Star Series, North 770 Series, Survivair Series 2000	20 чоловіків, 21 жінка	Довжина обличчя, ширина обличчя	[19]
Півмаска MSA Advantage	186 осіб	Довжина і ступінь вип'ячування носа	[20]
Півмаска Youngsung Co. YS1050DS, Samgong Co. SG5121 3M Co. Series 6000	150 осіб корейської національності: 112 чоловіків, 38 жінок	Ширина обличчя і ступінь вип'ячування носа	[21]
18 моделей фільтруючих півмасок N95, сертифікованих NIOSH	15 чоловіків, 18 жінок	Ширина обличчя, вип'ячування носа і довжина обличчя, довжина обличчя	[22]

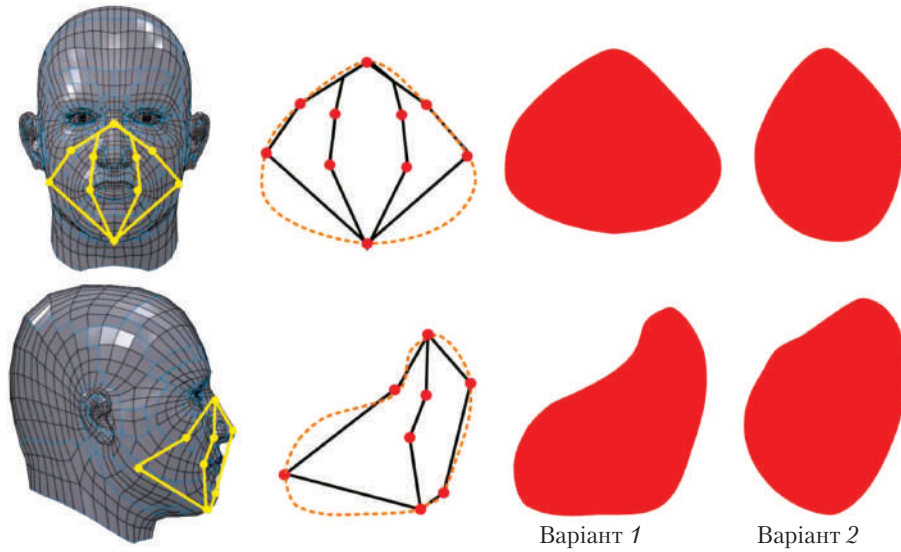


Рис. 1. Схематичне зображення проєкції контурів смуги обтюраторії півмасок [23]

ються переважно на ерудицію та інтуїцію конструктора [5–7]. Це сприяє появі помилок та втраті часу на їх виправлення. Найбільшою проблемою фахівці вважають відсутність систематизованих даних з урахуванням впливу технологічного процесу на загальні кількісні чи якісні закономірності явищ, що протікають у захисних засобах [8]. Вважають, що найбільше часу при проектуванні півмасок забирає розробка їхнього дизайну [9], оскільки основні проблеми пов'язані із забезпеченням відповідного захисту якомога більшої кількості людей з різними антропометричними характеристиками обличчя, а також з мінливістю умов праці та значного впливу на фізичний і психічний стан людини. Існує низка публікацій, де детально досліджено дію того чи іншого чинника на якість респіратора [10–16]. Наприклад, складено базу антропометричних даних [16], досліджено вплив респіратора на фізіологічний стан працівників [12], оцінено зміну ефективності захисту залежно від умов експлуатації [13, 14] тощо. Це дозволяє конструювати респіратори з різних блоків, однак виникає необхідність в узагальненні відомих даних та, відповідно, поєднанні їх у певний алгоритм проектування респіраторів.

Метою роботи є розробка алгоритму проектування еластомерної півмаски з високими ізолювальними властивостями.

Для вирішення окресленого завдання необхідним є: визначення критичних точок на обличчі працівників; побудова 3D-моделі голови людини та, відповідно, 3D-моделі еластомерних півмасок; розрахунок площі контакту обтюратора з обличчям, а також коефіцієнту ізолювання розроблених проєктів півмасок.

Для вирішення завдання визначення критичних точок на обличчі людини для побудови коректної моделі півмаски скористалися дослідженнями відомих американських вчених [17–22], які до найвагоміших параметрів відносять: довжину і ширину обличчя, довжину носа, губ, висоту носа та інші (табл. 1).

Відповідно до рекомендацій, зазначені антропометричні показники обличчя можна вимірювати за допомогою штангенциркуля та мірної стрічки або 3D-скануванням (рис. 1). Раніше авторами було проведено відповідні дослідження [16], в ході яких виміряно розміри рис обличчя понад 400 осіб різної статі — працівників і студентів Гірничого університету (м. Дніпро) (табл. 2). Діапазон розмірів довжини обличчя досліджуваних склав 98,5–

143,2 мм, а ширини — 131,3–164,9 мм. Узагальнені результати наведено в табл. 3.

Відомо два підходи щодо визначення ключових точок, за якими можна отримати контур еластомерної півмаски. Перший базується на даних параметричної таблиці Національного інституту охорони праці США (NIOSH). Вважається, що для проектування півмасок найбільш вагомими є розміри висоти обличчя та

Таблиця 2. Характеристика антропометричних даних обличчя

Критична точка	Скорочення	Характеристика
Ширина обличчя на лінії очей	GONI	Максимальна горизонтальна ширина обличчя між крайніми точками впадин очей
Ширина обличчя на лінії кутів нижньої щелепи	ZYGO	Максимальна горизонтальна ширина обличчя між щелеповими дугами
Ширина носа	NOSEBRTH	Відстань між правою і лівою точкою крил носа
Довжина губ	LIPLGTHH	Відстань між правою і лівою точкою за кутами рота
Довжина обличчя	MENSELL	Відстань між нижньою точкою підборіддя і верхньою точкою заглибленості носа
Довжина носа	NOSEPRH	Відстань між нижньою точкою носа і верхньою точкою заглибленості носа
Нижня частина обличчя	MSNL	Відстань між нижньою точкою підборіддя і нижньою точкою носа

Таблиця 3. Узагальнені антропометричні показники обличчя, мм [16]

Показник	Чоловіки (320 осіб)	Жінки (80 осіб)	Середнє значення
GONI	144,3 ± 8,9	135,3 ± 6,0	144,5 ± 8,9
ZYGO	130,2 ± 9,1	121,1 ± 9,1	128,4 ± 10,1
NOSEBRTH	32,7 ± 1,9	29,6 ± 3,3	32,0 ± 3,6
LIPLGTHH	51,4 ± 3,7	45,0 ± 3,7	48,7 ± 4,8
MENSELLH	121,1 ± 8,4	115,2 ± 5,8	119,8 ± 7,8
NOSEPRH	24,1 ± 2,7	22,4 ± 2,2	23,9 ± 2,6
MSNL	49,3 ± 4,5	43,2 ± 3,0	47,7 ± 5,0

довжини губ. Другий підхід, запропонований Zhuang Z., спирається на комплексні показники — так звані компоненти PC1 і PC2, до яких входять практично всі досліджувані параметри.

Наведені компоненти розраховують за формулами [22]:

$$PC1 = 0,343264 \times GONI + 0,372717 \times ZYGO + 0,329648 \times MENSELL + 0,363474 \times MSNL + 0,113578 \times NOSEPRH + 0,301125 \times NOSEBRTH + 0,202311 \times LIPLGTHH + 0,193650 \times NOSEPRH.$$

$$PC2 = -0,152951 \times GONI - 0,039087 \times ZYGO - 0,093279 \cdot MENSELL + 0,359799 \times NOSEPRH - 0,173099 \times LIPLGTHH + 0,013306 \cdot LIPLGTHH + 0,551842 \times LIPLGTHH - 0,210833 MSNL.$$

На рис. 1 схематично відмічено критичні точки для отримання геометрії півмаски для двох варіантів. У першому варіанті, крім довжини обличчя і губ також враховують ширину обличчя та ширину носа. У другому варіанті — додатково враховують також ширину обличчя на рівні нижньої щелепи.

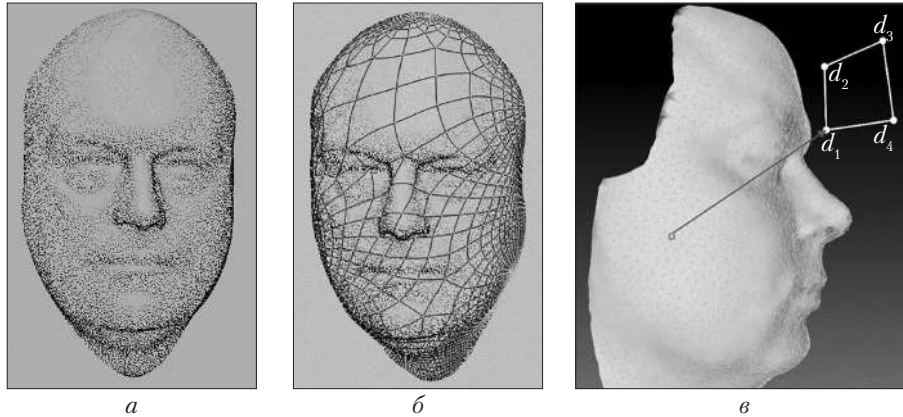
### Побудова 3D-моделі обличчя

3D-модель обличчя повинна містити полігональну сітку, вершини сходяться в ключових антропометричних точках, що визначають контури обличчя.

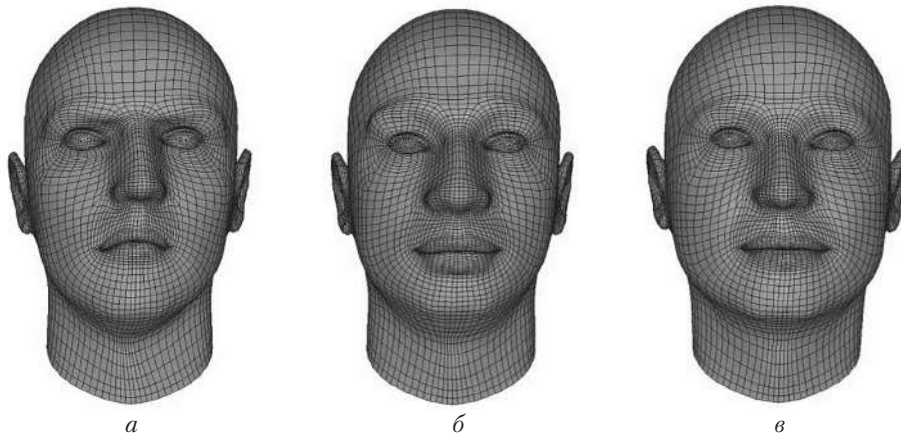
Для цього на відсканованих зображеннях обличчя, використовуючи програмне середовище з функцією 3D-реконструкції, визначили координати антропометричних точок:

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

де  $P_c, P_p$  — проєкційні матриці камери і проєктора, які 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  $\left\{ \mu_k = \left\langle \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \end{pmatrix}, i_k \right\rangle \right\}$  ідентифікованих точок шаблону;  $i$  — індекс прямої шаблону;



**Рис. 2.** Етапи перетворення сканованого зображення голови з хмари точок (а) з нанесеними сплайнами (б) у цифровий вигляд з розміткою і координатами (в)



**Рис. 3.** Цифрові моделі голови з різними антропометричними параметрами: а — перший типорозмір; б — другий типорозмір; в — третій типорозмір

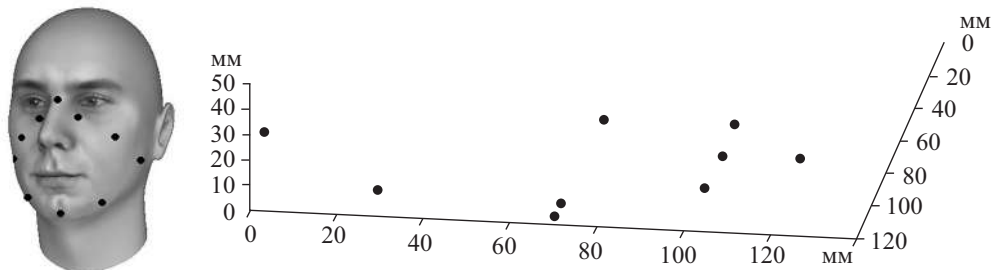
$k$  — коефіцієнт коригування між матрицями даних відсканованих зображень.

У подальшому за рахунок багатоетапної оцінки пропорцій голови, представлених хмарою точок (рис. 2, а), за допомогою зваженої функції Гаусса, радіального вигляду та локальної підгонки з урахуванням топологічної структури за допомогою зваженої функції Гаусса формували цифрове зображення. Так, на першому етапі було задано координати  $d = (d_1, d_1, \dots, d_N)$ , 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 допомо-

гою антропометричних точок, визначених на обличчі. Лінії утворюють параболічний сплайн, що безперервно задає форму перетину (рис. 2, б). Кожен сплайн рівномірно розбивається додатковими точками для утворення рівної кількості ділянок на всіх горизонтальних перетинах. Додаткові точки поєднуються між собою, утворюючи сітку чотирикутників (рис. 2, в). При підгонці розмітки до антропометричних точок використано три типи перетворень: ідентичне, зміщення відносно встановлених точок та аффіно — відносно вже розміщених точок.

Для «точних» етапів підгонки окремих рис було використано метод Нелдера–Міда, який дозволяє працювати з широким класом моде-





**Рис. 4.** Ключові антропометричні точки обличчя, перенесені в тривимірну систему координат: *a* – положення ключових точок на 3D-зображенні обличчя; *б* – положення ключових точок на координатній сітці

лей, що деформуються, вносити виправлення на будь-якому етапі у випадку некоректного введення даних, сильно «забруднених» зображень та інших дефектів (рис. 3).

Відмінністю цієї моделі від відомих є відсутність проміжної стадії, 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 точне – сплайнами.

### 3D-модель півмаски

3D-моделювання півмаски виконували за допомогою спеціальної функції, визначеної методом лінійної інтерполяції. Вона дозволяє задавати форму кривої за контрольними точками, які в нашому випадку відповідають ключовим антропометричним розмірам. Координати точок задано з параметричної моделі голови.

Нехай функція  $f(x)$  відома тільки у вузлах деякої сітки, яка задана таблицею  $\{x_i, f_i = f(x_i), i = \overline{1, N}\}$ . Для визначення цієї невідомої функції побудуємо спочатку іншу функцію  $\varphi(x; a)$ , яка залежить від вектора параметрів  $a = (x_p, a_1, \dots, a_N)^T$ , так, щоб

$$\varphi(x_i; a_1 \dots a_N) = f_i, \quad i = \overline{1, N}.$$

Для розв'язання цієї задачі розглянемо лінійну інтерполяцію, тоді задану функцію можна подати у вигляді

$$\varphi(x; a_1 \dots a_N) = \sum_{k=1}^N a_k \varphi_k(x),$$

де  $\varphi_k(x)$ ,  $k = \overline{1, N}$  – набір деяких заданих функцій.

Для знаходження параметрів  $a$  необхідно розв'язати систему лінійних рівнянь:

$$\sum_{k=1}^N a_k \varphi_k(x_i) = f_i.$$

Скористаємось відомим підходом для визначення сплайн-функції, яка задовольняє умовам інтерполювання у вузлах «склеєної» за умовою неперервності функції  $\varphi(x; y)$ . Розглянемо рівняння повної вільної енергії вигнутої деякої пластинки, яка описується двомірною сплай-поверхнею [25]:

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

Коефіцієнти  $C_1, C_2, \dots, C_N, A, B, D$  визначаються з рівнянь  $\varphi(x_i, y_i) = f_i, i = \overline{1, N}; \sum_{i=1}^N C_i = 0; \sum_{i=1}^N C_i x_i = 0; \sum_{i=1}^N C_i y_i = 0$ . Для розрахунку коефіцієнтів було складено дві матриці на основі дев'яти наявних координат (рис. 4):

$$\begin{aligned} z_1(x_1, y_1) &= C_1 [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2] \times \\ &\times \ln [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2] + Ax_1, By_1 + D; \\ z_2(x_2, y_2) &= C_2 [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] \times \\ &\times \ln [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] + Ax_2, By_2 + D; \\ z_N(x_N, y_N) &= C_N [(x_{N-1} - x_N)^2 + (y_{N-1} - y_N)^2] \times \\ &\times \ln [(x_{N-1} - x_N)^2 + (y_{N-1} - y_N)^2] + \\ &+ C_N [(x_{N-1} - x_N)^2 + (y_{N-1} - y_N)^2] + Ax_2, By_2 + D; \end{aligned}$$

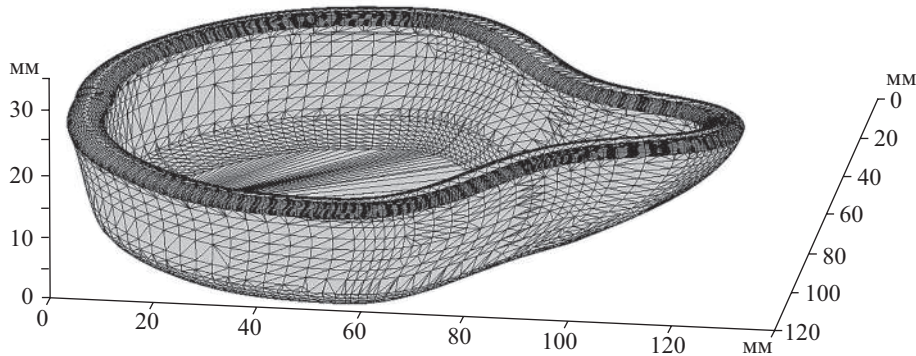


Рис. 5. Поверхня півмаски, отримана шляхом лінійної інтерполяції

$$0 = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N;$$

$$0 = C_1 x_1 + C_2 x_2 + C_3 + \dots + C_N x_N;$$

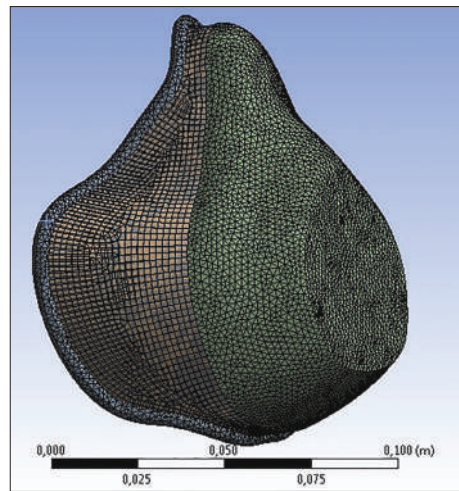
$$0 = C_1 y_1 + C_2 y_2 + C_3 + \dots + C_N y_N.$$

У результаті розрахунків отримали коефіцієнти для функції, яка описує сплайн-поверхню, що інтерполює значення заданих точок, де  $A = -0,56$ ;  $B = 0,87$ ;  $D = 16,3$ :

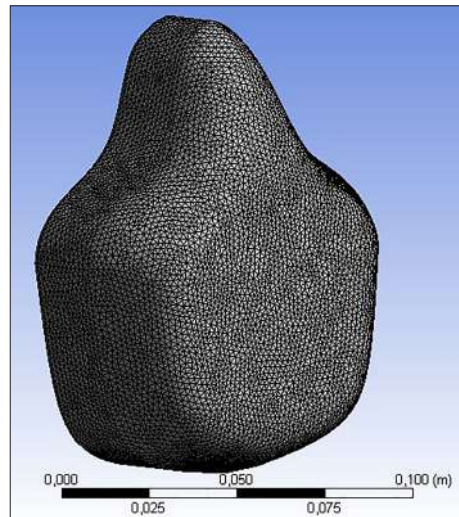
$$X := \begin{pmatrix} 65,5 \\ 105,6 \\ 130,3 \\ 62,5 \\ 0 \\ 35,6 \\ 65,2 \\ 65,2 \\ 65,2 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 120,5 \\ 100,3 \\ 70,6 \\ 0 \\ 70,6 \\ 100,3 \\ 35,3 \\ 70,6 \\ 100,3 \end{pmatrix} \quad Z := \begin{pmatrix} 30,5 \\ 30,5 \\ 40,0 \\ 30,5 \\ 30,5 \\ 30,5 \\ 15,2 \\ 0 \\ 10,2 \end{pmatrix} \quad C := \begin{pmatrix} 2,479 \\ 3,113 \\ 10,177 \\ -0,393 \\ 2,236 \\ -0,18 \\ 0,56 \\ 5,4 \\ -2,1 \end{pmatrix}.$$

За виразом отриманої функції було побудовано поверхню півмаски (рис. 5), яка проходить через визначені точки та використовує їх як вузли інтерполяції.

З отриманої поверхні надалі було створено два типи дизайну еластомерної півмаски (рис. 6). У першому варіанті враховано ширину обличчя, ширину носа, відстань від перенісся до підборіддя та ширину лиця на рівні кутів нижньої щелепи. Тоді як у другому взято до уваги відстань від перенісся до підборіддя, ширину носа та довжину губ. На підставі отриманих даних та середніх значень замірів, наведе-

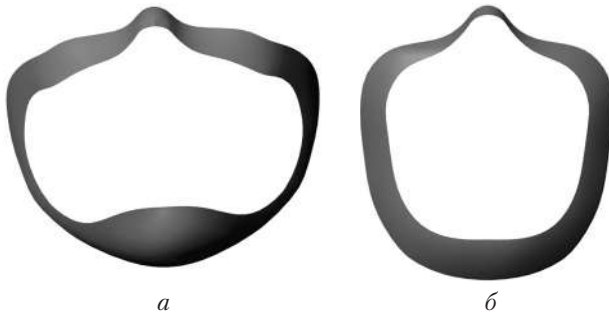


а



б

Рис. 6. 3D-моделі еластомерних півмасок виготовлені за дизайном варіанту 1 (а) та варіанту 2 (б)



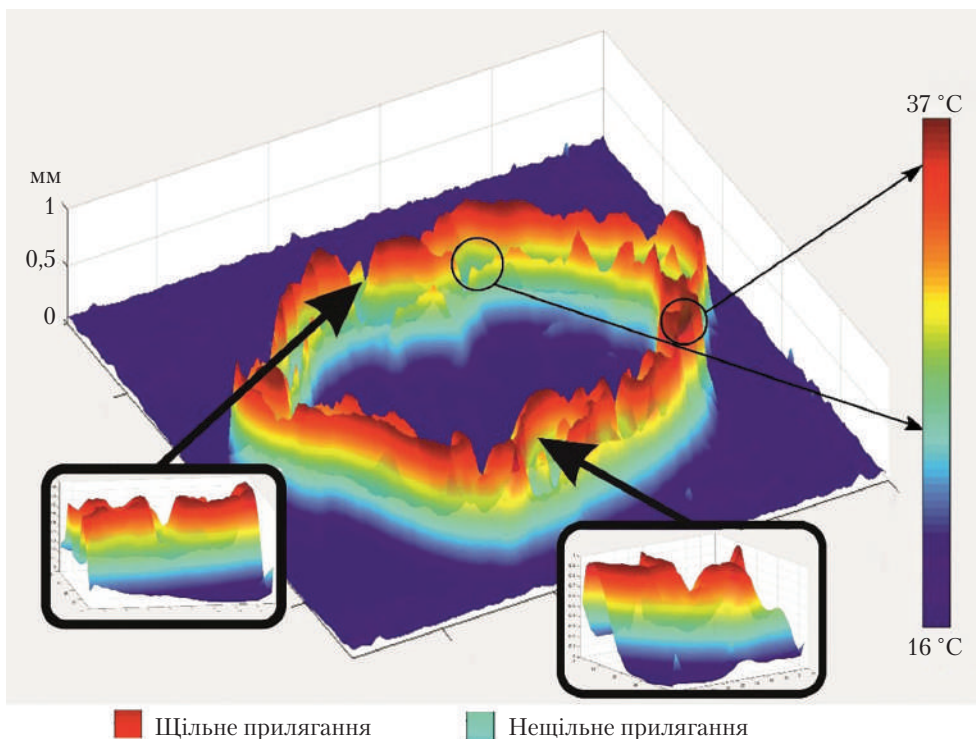
**Рис. 7.** Зона контакту півмаски з обличчям (смуга обтюраторії) в моделі за варіантом 1 (а) та в моделі за варіантом 2 (б)

них у табл. 3, було запропоновано розміщення ключових точок для побудови смуги обтюраторії на обличчі. Однаковим в обох варіантах є ширина носа та відстань від перенісся до підборіддя. Тоді як відмінність полягає у виборі або ширини обличчя або довжини губ. Таким чином, контур обтюратора вузький у верхній частині обличчя та розширюється до низу, щоб

покрити щоки. На наш погляд у першому варіанті зменшується вплив міміки обличчя при розмові та поворотах голови. У другому – контур зосереджено навколо носа і рота. Він потребує значно меншої кількості матеріалу.

Наступним етапом роботи було визначення площі дотику смуги обтюраторії до обличчя. Для цього за допомогою «ІСР-методу» (*iterative closest point*) *MatLab* співставляли «хмару» точок півмаски і обличчя, відмічаючи координати тих, які співпали [24]. Потім отриманий результат аналізували у програмі *Solidworks*, було побудовано поверхню (рис. 7) та визначено її площу. Результати обрахунку площі обтюратора наведено у таблиці 4.

Попередню перевірку захисних властивостей півмасок можна провести шляхом теоретичного розрахунку коефіцієнта захисту. Для цього визначимо підсмоктування повітря через нещільності між обтюратором та обличчям при рівномірному розподілі контактної напру-



**Рис. 8.** Оцінювання інфрачервоного зображення обтюратора в середовищі *MathLab* на основі тепловізійної зйомки



ги за шириною зони обтюратора (ущільнювача)  $l$  за формулою [25]:

де  $C_g = \frac{k_{\max} \Delta p}{l \mu}$ ;  $k_{\max}$  – максимальний діаметр зазору на ущільнювачі, м;  $\Delta p$  – перепад тиску, Па;  $l$  – ширина ущільнювача, м;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, Па с;  $C_u$  – коефіцієнт проникності через нещільності [26].

$$C_u = \frac{k_g}{8(1 - k_g)},$$

де  $k_g$  – коефіцієнт ефективності використання поверхні обтюратора півмаски;  $\zeta$  – коефіцієнт місцевих втрат.

Райнер Е.С. рекомендує визначити коефіцієнт місцевих втрат для щілин за формулою [25]:

$$\zeta = 2,5 + 5,5 \times 10^{-4} \left( \frac{l}{k_{\max}} \right).$$

Коефіцієнт ефективності використання поверхні обтюратора півмаски визначається за формули

$$k_g = \frac{F_e}{F_o},$$

де  $F_e$  – робоча або ефективна поверхня обтюратора, яка добре прилягає до обличчя, м<sup>2</sup>;  $F_o$  – загальна площа обтюратора півмаски, м<sup>2</sup>.

Ефективну поверхню обтюратора півмаски, а також висоту нерівномірностей на ущільнювачі можна визначити за допомогою термографування його внутрішньої сторони, який було

одягнуто на обличчя людини та дані опрацьовано у програмі *MathLab* (рис. 8).

Алгоритм перетворення теплової енергії в зображення передбачає, що найбільш холодному об'єкту, від якого до телевізора надходить найменше енергії відповідає чорний колір (довжина хвилі складає 8 мкм); найбільше гарячому – світло-червоний колір (довжина хвилі складає 12 мкм). Надалі весь динамічний діапазон від самого холодного до самого гарячого ділиться на 256 градацій, кожному значенню якого рівномірно присвоюється свій відтінок. Чим менше енергія випромінювання, тим ближче відтінок до чорного, і навпаки, чим більше енергія, тим колір наближається до світло-червоного.

Термограма поверхні смуги обтюратора, дозволить визначити місця нещільного прилягання за інтенсивністю теплового випромінювання поверхні обтюратора у інфрачервоному діапазоні та відображення теплового поля на дисплеї тепловізора у вигляді кольорового зображення, де місця проникнення аерозолі у підмасковий простір крізь щілини між обтюратором і обличчям, мають різне забарвлення. Іншими словами, місце локальної температурної аномалії на поверхні смуги обтюратора визначається за зміною забарвлення термограми. Результати визначення коефіцієнта захисту респіраторів наведено в табл. 5.

Таблиця 4. Площа прилягання півмаски до обличчя

Варіант	Площа обтюратора відповідно до зон обличчя, см <sup>2</sup>				Загальна площа контакту, см <sup>2</sup>	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

Таблиця 5. Захисна ефективність півмасок

Варіант	Показники						
	Перепад тиску, $\Delta p$ , Па	Загальна витрата повітря, $Q_0$ , м <sup>3</sup> /с	Максимальна висота нерівномірностей, $k_{\max}$ , мм	Коефіцієнт ефективності, $k_g$	$C_g$ , м <sup>3</sup> /с	Коефіцієнт проникності, $C_u$	Коефіцієнт захисту $K_s = Q_0/Q_1$
1			0,04	0,8	$5,2 \times 10^{-5}$	1,25	28,7
2	75	0,0015	0,06	0,7	$8,4 \times 10^{-5}$	0,74	17,9

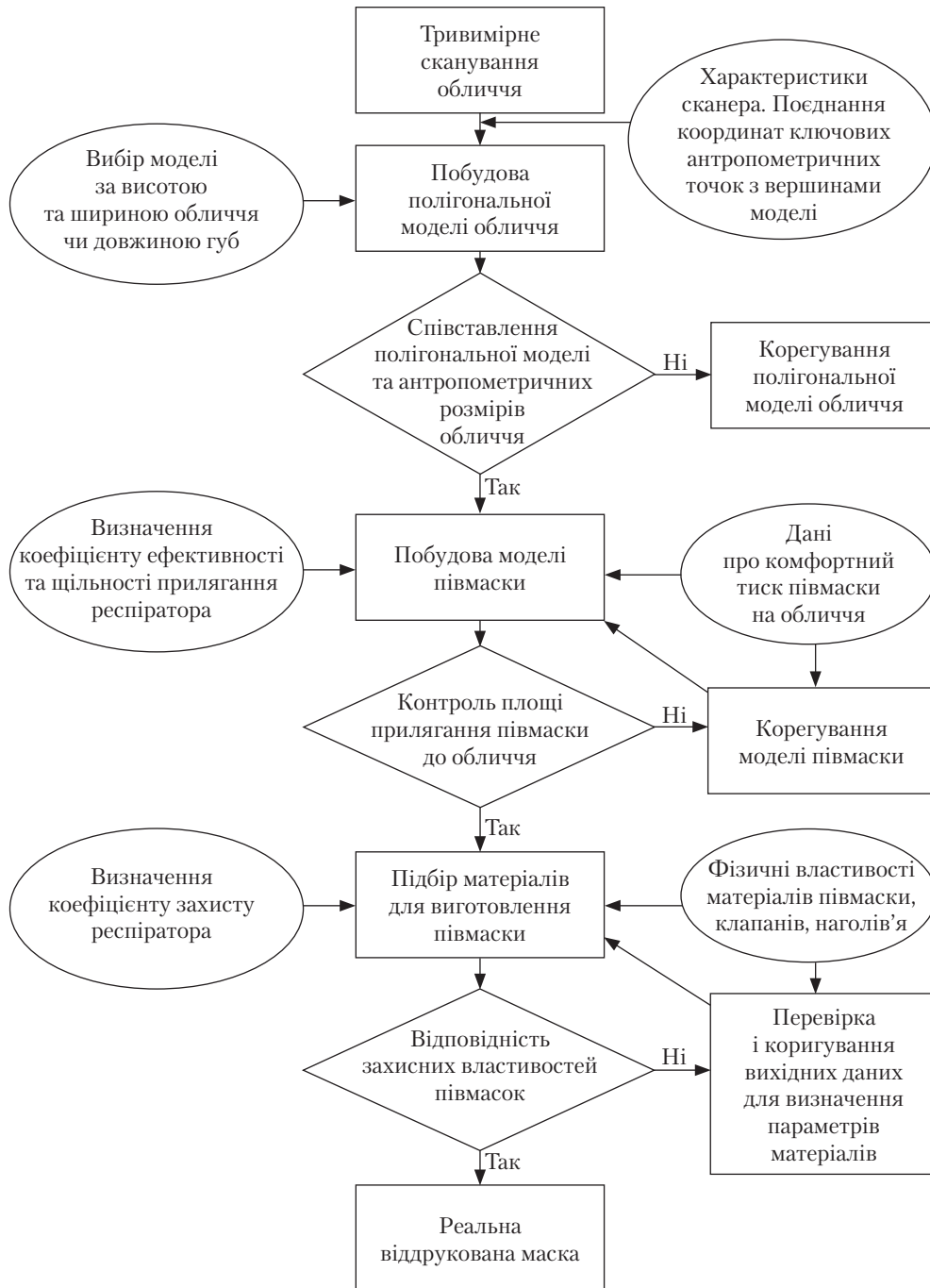


Рис. 9. Схема конструювання фільтрувальної півмаски

Отже, у півмасок, сконструйованих за основними розмірами довжини та ширини обличчя, площа обтюратора у 1,4 рази більша, ніж у півмасок, модель яких будували за довжиною

обличчя і губ. Проведені дослідження дозволили систематизувати існуючі підходи до конструювання півмасок і створити алгоритм розробки ЗІЗОД (рис. 9).

У результаті роботи було опрацьовано й удосконалено алгоритм з проектування та виготовлення фільтрувальних півмасок. Він складається з декількох етапів. На першому етапі необхідно визначити розміри обличчя потенційних споживачів, нанести на 3D модель голови отримані розміри, за якими проектується контур обтюратора півмаски. У результаті отримано форму моделі півмаски, у якій необхідно розрахувати площу контакту з обличчям. Звісно, при розрахунку виникають складнощі, пов'язані з різною товщиною та пружністю частин обличчя. Однак, мінімізація їхнього впливу на конструкцію обтюратора досягається за рахунок проведення натурних досліджень виготовленого експериментального зразка. Надалі здійснюється підбір відповідної структури фільтра (кількість шарів, необхідність клапану видихання) за концентрацією і властивостями прогнозованих вдихуваних аерозолів та умовами експлуатації, а також тип фільтрувального матеріалу. Цей процес докладно розкрито у багатьох публікаціях [4, 27]. Варто зазначити, що сучасний асортимент фільтрувальних матеріалів дозволяє забезпечити високу ступінь очищення повітря.

Наведені вище розрахунки дозволяють визначити величину коефіцієнта ізолювання півмасок. Логічно, що зі збільшенням площі смуги обтюратора зменшується ймовірність утворення додаткових каналів підсмоктування аерозольних частинок у підмасковий простір. Є думка [28], що для забезпечення достатнього ступню герметичності, необхідно обтюратор виготовляти окремо від півмаски з м'яких еластомерних матеріалів, які можуть повторювати контури обличчя. Існують подібні розробки півмасок у відомих виробників (наприклад, респіратор *Advantage 200*). Проте таке припущення потребує подальшої перевірки.

Варто зазначити необхідність проведення подальших досліджень з розробки дизайну об-

тюратора для різних типів обличчя та здійснення натурних досліджень проєктованих в такий спосіб півмасок.

Таким чином, в ході дослідження визначено основні антропометричні риси обличчя, які найбільше впливають на конструкцію півмасок, надалі з них було побудовано полігональну 3D-модель голови людини. За встановленими базовими координатами останньої методом інтерполяції визначено поверхню півмаски, а ІСР-методом розраховано площу прилягання півмаски до обличчя. Розраховано площу смуги обтюратора та її периметр, а також коефіцієнт ізолювання півмасок. Показано, що у півмасок, побудованих за основними розмірами довжини та ширини обличчя, площа обтюратора у 2,5 рази більша, ніж у півмасок, які спроектовано за довжиною обличчя і губ. Проведені дослідження дозволили систематизувати наявні підходи до проектування півмасок і розробити алгоритм проектування ЗІЗОД. Розроблено алгоритм 3D-проектування півмасок, який відрізняється від інших тим, що додатково на кожному етапі перетворення сканованого 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. Розроблено методику перевірки якості респіраторів на основі визначення площі прилягання півмаски та притискних зусиль 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.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стрілець В.М., Васильєв М.В. Аналіз захисних властивостей засобів індивідуального захисту, які призначені для роботи в умовах викиду небезпечних хімічних речовин. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. Т. 1, № 23. С. 197–200.

2. Кириллов В.Ф., Бучнев А.А., Чиркин А.В. О средствах индивидуальной защиты органов дыхания работающих. *ФГБУ «НИИ медицины труда» И РАМН*. 2013. № 4. С. 25–31. doi: 10.17686/sced\_rusnauka\_2013–1033.
3. Kovacs L., Immermann A., Brockmann G. Three-dimensional recording of the human face with a 3D laser scanner. *J. Plast. Reconstr. Aesthet. Surg.* 2006. No. 59. P. 1193–1202.
4. Эннан А.А., Белинский Е.Е., Климова Л.В., Байденко В.И. Математическое моделирование конструкций облегченного респиратора типа «Снежок». *Тр. 1-й Международ. науч.-практ. конф. «Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве»*, (сентябрь 2002, г. Одесса). Одесса, 2002.
5. Третьякова Л.Д., Подобед І.М., Зубков А.А. Новітні засоби індивідуального захисту для здійснення аварійно-рятувальних робіт. *Інформаційний бюлетень з охорони праці*. 2014. Т. 1, № 72. С. 98–103.
6. Ковальов П.А., Стрілець В.М., Єлізаров О.В., Безуглов О.Є. *Основи створення та експлуатації апаратів на стисненому повітрі*. Харків: АЦЗУ, 2005. 359 с.
7. Андрусак З.В., Болибрух Б.В., Лоик В.Б., Красутская И.М. Проблема создания эффективной индивидуальной защиты спасателей при авариях на опасных химических объектах. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 2015. V. 56, no. 4. P. 111–134.
8. Остапенко Н.В., Луцкер Т.В., Рубанка А.І., Колісніченко О.В. Узагальнена систематизація виробів спеціального призначення. *Теорія і практика дизайну*. 2016. № 10. P. 122–143.
9. Колосніченко М.В., Зубкова Л.І., Пашкевич К. Л., Полька Т.О., Остапенко Н.В., Васильєва І.В., Колосніченко О.В. *Ергономіка і дизайн. Проектування сучасних видів одягу*: навч. посіб. Київ, 2014. 386 с.
10. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І., Фрундін В.Ю. Експериментальні дослідження впливу вологості повітря на захисні властивості електретних фільтрів. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2016. Т. 1, № 96. С. 59–66.
11. Васильєв М.В., Стрілець В.М., Коврегін В.В. Аналіз герметичності комплексу засобів індивідуального захисту першого типу. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. № 11. С. 29–38.
12. Anderson N.J., Cassidy P.E., Janssen L.L., Dengel D.R. Peak Inspiratory Flows of Adults Exercising at Light, Moderate and Heavy Work Loads. *Journal Int. Soc. Respir. Prot.* 2006. No. 23. P. 53–61.
13. Eshbaugh J.P., Gardner P.D., Richardson A.W. №95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow. *Journal Occup. Environ. Hyg.* 2009. V. 6, no. 1. 52–61.
14. Haruta H., Honda T., Eninger R. Experimental and theoretical investigation of the performance of №95 respirator filters against ultrafine aerosol particles tested at constant and cyclic flows. *Journal Int. Soc. Respir. Prot.* 2009. No. 25. P. 75–88.
15. Потапенко І.А. Гидродинамическое сопротивление фильтрующего элемента противопылевого респиратора. *Горноспасательное дело: сб. науч. тр.* 2010. № 47. С. 133–141.
16. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І. Методика підбору випробувачів для дослідження фільтрувальних респираторів. *Метрологія та прилади*. 2016. № 2. С. 36–40.
17. Oestenstad R.K., Dillion H.K., Perkins L.L. Distribution of faceseal leak sites on a half-mask respirator and their association with facial dimensions. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1990. V. 5, no. 51. P. 285–290. doi:10.1080/15298669091369664.
18. Oestenstad R.K., Perkins L.L. An assessment of critical anthropometric dimensions for predicting the fit of a halfmask respirator. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1992. V. 53, no. 6. P. 639–644.
19. Oestenstad R.K., Elliot L.J., Beasley T.M. The effect of gender and respirator brand on the association of respirator fit with facial dimensions. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. V. 4, no. 12. P. 923–930.
20. Brazile W.J., Buchan R.M., Sandfort D.R., Melvin W., Johnson J.A., Charney M. Respirator fit and facial dimensions of two minority groups. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 1998. No. 13. P. 233–237. doi: 10.1080/1047322X.1998.10390073.
21. Han D.H., Choi K.L. Facial dimensions and predictors of fit for half-mask respirators in Koreans. *AIHAJ*. 2003. V. 64, no. 6. P. 815–822. doi: 10.1202/501.1.
22. Zhuang Z., Bradtmiller B., Shaffer R.E. New respirator fit test panels representing the current U.S. civilian work force. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2007. V. 4, no. 9. P. 647–659. doi: 10.1080/15459620701497538.
23. Alma Maria Jennifer A. Gutierrez, Melissa D. Galang, Rosemary R. Seva, Michelle C. Lu, Diana Rose S. Designing an improved respirator for automotive painters. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2014. V. 44, no. 1. P. 131–139.
24. Blanz V., Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces. *In: 26<sup>th</sup> Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM Press, Los Angeles*. 1999. P. 187–194.
25. Ashkenazy A.V. *Basic theory and computational algorithms*: Tutorial. Tver: Pub. house of the Tver State University. 2003. P. 82.



26. Огар П.М., Герасимов С.В., Сухов О.Ю., Глинов С.Н. Моделирование массопереноса через стык шероховатых поверхностей. *Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр./СПбГАСУ*. СПб. 2001. № 7. С. 108–116.
27. Огар П. М., Тарасов В. А., Дайнеко А.А. О некоторых общих закономерностях упругопластического внедрения сферического индентора. *Системы. Методы. Технологии*. 2010. Т. 4, № 8. С. 38–43.
28. Zhuang Z., Coffey C.C., Jensen P.A., Campbell D.L., Lawrence R.B., Myers W.R. Correlation Between Quantitative Fit Factors and Workplace Protection Factors Measured in Actual Workplace Environments at a Steel Foundry. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 2004. V. 64, no. 6. P. 730–739. doi: 10.1202/475.1

Стаття надійшла до редакції / Received 25.04.19

Статтю процензовано / Revised 27.05.19

Статтю підписано до друку / Accepted 10.06.19

*Cheberiachko, S.I., Cheberiachko, Yu.I., and Shaikhislamova, I.A.*

Dnipro Polytechnic National Technical University,  
19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine,  
+380 56 744 1411, +380 56 247 0810, rector@nmu.org.ua

#### DESIGNING OF HALF-MASKS FOR FILTERING RESPIRATORS

**Introduction.** Diseases of the respiratory system head the list of occupational diseases. They are caused by pollution of the working zone air with harmful aerodispersed particles, use of improper individual respiratory protective devices.

**Problem Statement.** The efficiency of filtering respirators depends on two components: time of protective effect and insulating properties of half-masks. This requires conducting relevant research in order to design the half-masks which allow providing high insulating properties.

**Purpose.** Improvement of protective effect of filtering respirators by improving their design with respect to anthropometric peculiarities of workers' faces.

**Materials and Methods.** To develop the surface of a half-mask, the equation of free energy of a bent optional plate was used, which is outlined with a two-dimensional spline-surface, its unknown coefficients are defined by the method of proportional parts based on the data of three dimensional coordinates of the key points of anthropometric facial features.

**Results.** Regularities of forming the surface of half-masks were defined based on the data of three dimensional coordinates of the key points of anthropometric facial features. A method was developed for measuring the temperature of obturator surface with a thermal imagery device based on output signal processing, which allows carrying out on-line control of areas where gaps occur along the obturation line as well as defining deterioration of insulating properties of a dust mask and estimating its protection factor.

**Conclusion.** The algorithm of half-mask design was developed with respect to the results of 3D scanning of faces, digital models of head developing as well as half-masks surface and obturator construction associated with them. The reasonable parameters of filtering box, size of outlet for providing the minimum pressure difference and regular dust distribution on filtering surface were determined.

*Keywords:* model, half mask, respirator, obturator, insulation coefficient.