

© Ю.І. Чеберячко<sup>1</sup>, О.О. Бойко<sup>1</sup>, І.М. Книш<sup>1</sup>, А.А. Юрченко<sup>1</sup>, О.О. Шустов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ОЦІНКА ЩІЛЬНОСТІ ПРИЛЯГАННЯ ЕЛАСТОМІРНОЇ ПІВМАСКИ ДО ОБЛИЧЧЯ

© Yu. Cheberiachko<sup>1</sup>, O. Boyko<sup>1</sup>, I. Knish<sup>1</sup>, A. Yurchenko<sup>1</sup>, O. Shustov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## ESTIMATION OF ADJUSTMENT DENSITY ELASTOMERIC HALF-MASK TO THE FACE

**Мета.** Розробка методу з оцінки щільності прилягання еластомірної півмаски до обличчя працівників за термографічним знімком обтюратора.

**Методи.** Оцінка базується на застосуванні статичного підходу оцінки термографічних зображень смуги обтюраторної півмаски за допомогою вбудованих функцій в математичному середовищі MATLAB із застосуванням інтегративного алгоритму найближчих точок – методу ICP.

**Результати.** Запропонований метод з оцінки щільності прилягання півмаски до обличчя за термографічним знімком поверхні обтюратора, еластомерної півмаски респіратору, який дозволяє за рахунок обробки і порівняння зображення з еталонним знімком смуги обтюраторної розрахувати коефіцієнт щільності прилягання півмаски до обличчя з урахуванням сили натягу наголів'я. Ітеративний підхід базується на вирішенні задачі з мінімізації виникнення нещільностей по смузі обтюраторної фільтрувального респіратору що дозволять знизити помилки при проектуванні її геометричних розмірів та уникнення алгебраїчних помилок при їх оцінюванні.

**Наукова новизна.** Розроблено метод вимірювання температури поверхні обтюратора тепловізором на основі опрацювання вихідних сигналів, що дозволяє здійснювати оперативний контроль місць утворення зазорів уздовж смуги обтюраторної, виявляти погіршення ізолювальних властивостей протипилового респіратору та обчислювати коефіцієнт його захисту

**Практична цінність.** Запропонований метод дозволяє швидко визначити відповідність півмаски обличчю працівника при виконанні різних виробничих операцій. Забезпечить контроль притискних зусиль еластомірної півмаски респіратору до обличчя людини при його виборі та сприятиме зменшенню підсмоктування нефільтрованого повітря у підмасковий простір.

**Ключові слова:** півмаска, термограма, обтюратор, коефіцієнт щільності прилягання.

**Вступ.** Оцінка досконалості засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) і їх компонентів здійснюється за показниками захисної і ергономічної ефективності відповідно до технічного регламенту на засоби індивідуального захисту [1]. Зокрема, півмаски респіраторів оцінюються за коефіцієнтом підсмоктування аерозолі по смузі обтюраторної, оскільки «підсмоктування» (проникнення) токсичних аерозолів (аеродисперсних частинок, газів і парів) в підмасковий простір відбувається, головним чином, крізь щілини між обличчям і обтюратором [1, 2].

**Стан питання.** Вище наведене приводить до необхідності проведення перевірки відповідності вибраного респіратору до працівника у виробничих умовах

на робочому місці, саме за щільністю прилягання півмасок до обличчя по смугі обтюраторії. Для цього існують якісні і кількісні методи відповідно до ДСТУ EN 529:2006.

Якісні методи для перевірки захисних властивостей респіраторів повинні бути відносно простими та швидкими. Вони засновані на суб'єктивній реакції органів чуттів на різкий запах розпорошених безпечних аерозолів: сахарину, бітрексу, ізоамілацетату та інших. Їх сутність полягає в тому, що працівнику з правильно одягненим респіратором (відповідно до рекомендацій виробника) надітим на голову спеціальним ковпаком, що ізолює повітряний простір біля органів дихання потрібно визначити чи потрапляє в обхід фільтрів розпорошена в середні відома речовина [2, 3].

До їх недоліку відносять різний індивідуальний поріг чутливості людей, який в деяких випадках може перевищувати гранично допустимі концентрації аерозолів, що не дозволяє достовірно оцінити коефіцієнт захисту також не відомим є і місце проникнення його через смугу обтюраторії.

Кількісні – засновані на інструментальній перевірці. Вони кращі за вище згадані, так як використовують спеціальне обладнання, яке фіксує наявність просочування аерозолу під півмаску. Найбільш поширеним є визначення коефіцієнта підсмоктування за тест-аерозолями на робочому місці так званий «fit-test» [4, 5]. Сутність полягає у визначенні співвідношення зовнішньої його концентрації до підмаскової. Дещо пізніше з'явився більш простий спосіб вимірювання захисних властивостей респіраторів за допомогою підтримки постійного тиску у підмасковому просторі еластомерних респіраторів – Quantifit test [6, 7]. Сутність полягає у встановленні величини підсмоктування повітря при створеному розрядженні під півмаскою, за допомогою невеликого насоса і датчика тиску. Випробувач з одягненим респіратором, у якого фільтри щільно закриті спеціальними насадками, затримує на кілька секунд дихання і в цей час включається насос, приєднаний через клапанну систему, який відкачує трохи повітря. При цьому створюється розрідження, що фіксується датчиком тиску. Через різницю у перепадах тиску і просочування повітря під маску воно буде зменшуватись. Однак, на зміну реагує датчик тиску, який знову включає насос і відкачує повітря до початкового значення розрідження. Кількість повітря, що відкачується точно відповідає пониклому через нещільності. Вся процедура займає всього 7 - 10 секунд. Цей спосіб відрізняється порівняно низькою вартістю обладнання, але його не можна застосувати для фільтрувальних півмасок.

Досить новим якісним методом перевірки щільності прилягання півмасок до обличчя є термографування поверхні обтюратора за допомогою тепловізора і подальшого аналізу одержаної термограми. Місця нещільного прилягання півмаски до обличчя легко визначаються: на термограмі вони, на відміну від місць щільного прилягання обтюратора до обличчя, мають інше забарвлення оскільки встигають нагрітись менше (рис. 1).

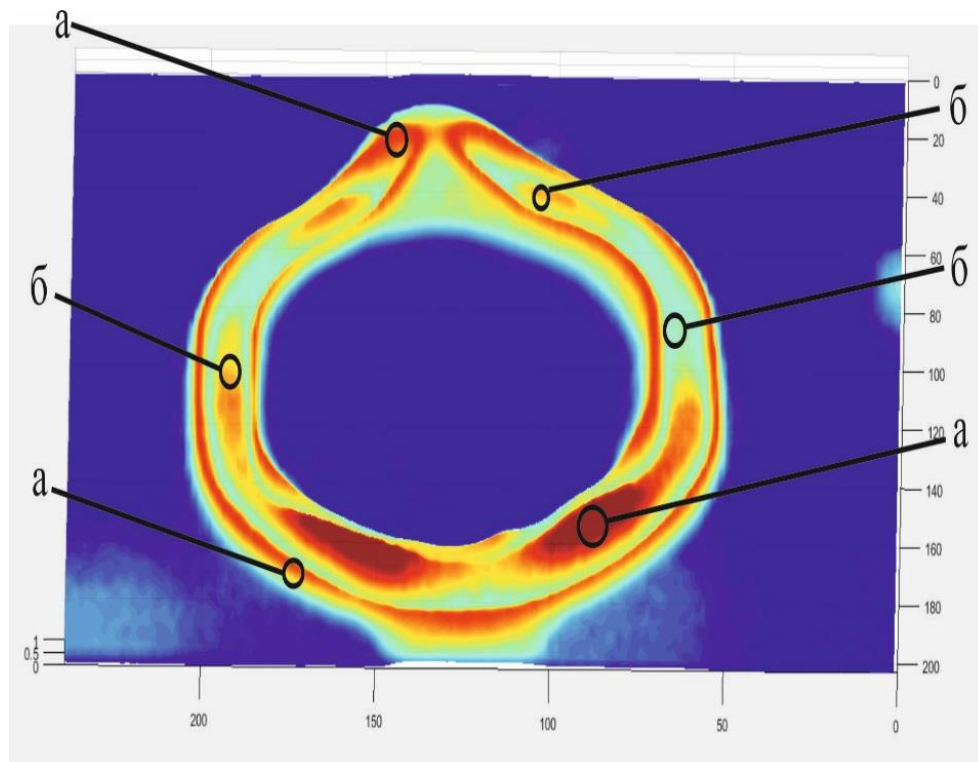


Рис. 1. Термограма обтюратора півмаски: а – при щільному приляганні до обличчя (червоне забарвлення); б – при нещільному приляганні до обличчя забарвлення змінюється від світло-зеленого до помаранчевого, в залежності від величини зазору між обличчям і обтюратором півмаски

Однак на обробку графічної інформації для контролю ізолювальних властивостей півмасок значно впливають суб'єктивні фактори. Тому в зазначеній сфері досліджень перевагою повинні користуватись не графічні редактори, які мають розвинені інструменти для роботи з графікою, а математичні середовища, в яких є можливість виразити особливості графічних зображень числами і, відповідно, провести необхідну математичну обробку для визначення коефіцієнту щільності прилягання півмаски – як відношення площі реального прилягання обтюратора до обличчя за інтенсивністю теплового випромінювання поверхні обтюратора у інфрачервоному діапазоні на дисплеї тепловізора до загальної (проектної) площі обтюратора з подальшим розрахунком коефіцієнта захисту.

Вважаємо даний метод перспективним, який потребує подальших досліджень. Оскільки для розрахунку коефіцієнта захисту респіратору на конкретному працівнику не потрібно ніякого спеціального обладнання, крім тепловізора і відповідного програмного забезпечення, яке дозволить обробити саме зображення і отримати відповідні показники.

**Мета роботи.** Розробка методу з оцінки щільності прилягання еластомірної півмаски до обличчя працівників за термографічним знімком обтюратора.

**Теоретичні дослідження.** Для одержання необхідних відомостей, фільтрувальний респіратор, встановлений на обличчі з дотриманням правил виробника та попередньою перевіркою величини натягу наголів'я динамометром після її одягання, утримують на обличчі декілька хвилин, а потім здійснюють зйомку та

візуальний аналіз одержаної термограми обтюатора. Отримане таким чином зображення обтюатора переміщують у відповідне програмне забезпечення, де проводиться низка послідовних перетворень для виявлення характерних ознак передачі тепла за рахунок теплопровідності між деякою ділянкою на обличчі з температурою  $t_1$  до щільно прилеглої ділянки півмаски з температурою  $t_2$ . При цьому у нещільних ділянках відбувається передача тепла через тонкий прошарок повітря, що призводить до появи температурних контрастів на поверхні обтюатора з достатньою різницею, що описується законом Планка. Таким чином, розподіл температур по поверхні обтюатора  $T(x, y)$  несе інформацію про ефективність ізолювальних властивостей респіраторів та наявність локальних температурних аномалій, обумовлених прихованими дефектами конструкції півмасок чи невідповідністю їх антропометричним параметрам обличчя.

Засобами MATLAB зображення термограми при використанні функції `imread` можна перетворити в масив даних із заданим діапазоном значень від 0 до 255. (рис. 2). Цей масив, шляхом статистичної обробки, дозволяє отримати стаціонарну функцію розподілу температури на поверхні обтюатора, яку представимо у вигляді [8]

$$F(x, y) = \sum \sum T(x, y).$$

де  $T(x, y)$  - температура точки з координатами  $(x, y)$ .

Потужність теплових процесів на поверхні обтюатора обмежених координатами  $[x_1; x_n]$ ,  $[y_1, y_n]$  в розраховуємо за формулою

$$P = \iint_i^n F(x, y) x y dx dy.$$

Потім проводимо аналіз, порівнюючи одержані значення з тепловою потужністю «еталоного» обтюатора який щільно прилягає до обличчя (тобто проектна площа обтюатора відповідає 100 % прилягання обтюатора до обличчя і має відповідне однорідне забарвлення). Отже, для аналізу фотографій, отриманих тепловізійною зйомкою проводиться сегментація зображення за ознакою яскравості білого кольору, що свідчить про щільне прилягання обтюатора до обличчя. Глобальний опис виходить при інтегруванні найбільших кластерів на зображеннях, які вимірюються в пікселях. В результаті можна отримати гістограми, які дозволяють в кількісному значенні оцінити коефіцієнт щільності прилягання на зразках за виразом

$$K_{щ} = \frac{P_{max} - P_p}{P_{max}},$$

де  $P_{max}$ ,  $P_p$  – теплова потужність «еталоного» обтюатора і розрахованого, відповідно.

Рангова шкала для оцінки щільності прилягання наведена на у табл. 2. Побудована за принципом максимально щільному прилягання відповідає – 1; відсутність прилягання – 0.

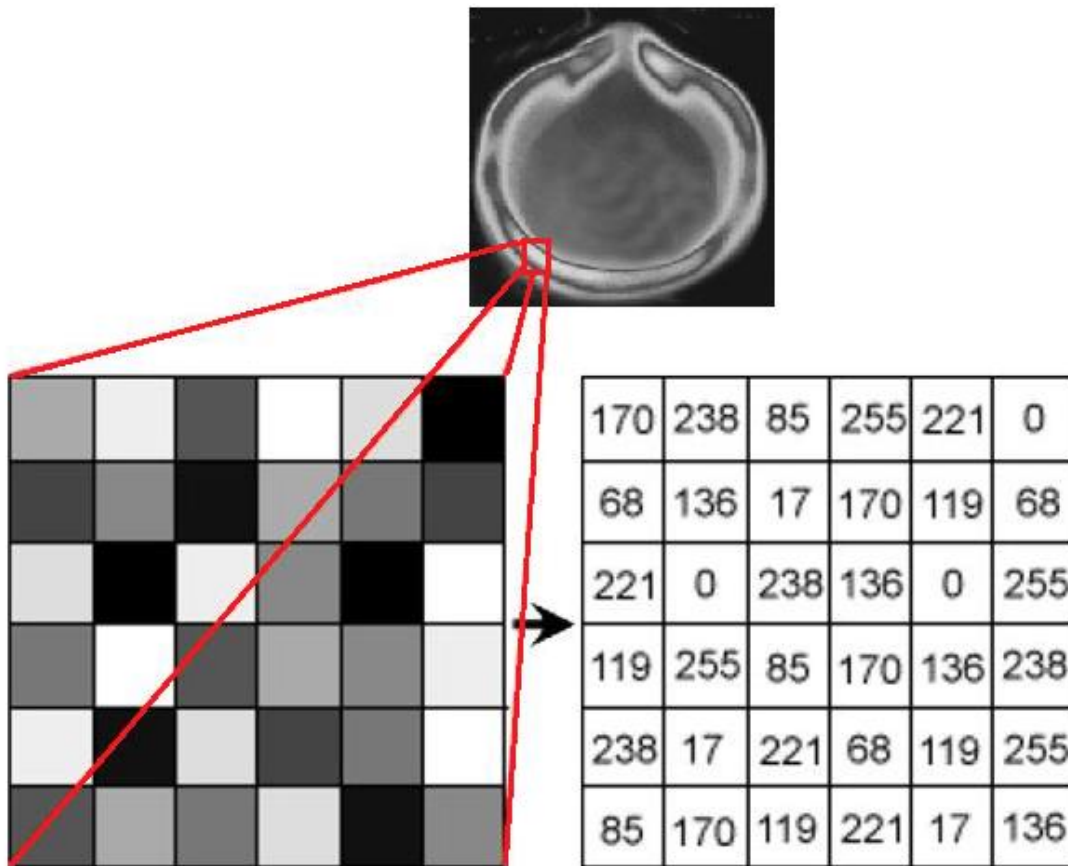


Рис. 2. Приклад перетворення зображення у цифровий формат

Таблиця 1

Оцінка щільності прилягання півмаски до обличчя

Оцінка щільності	Відмінна	Добра	Задовільна	Допустима	Недопустима
$K_{щ}$	до 0,9	0,9 – 0,8	0,8 – 0,7	0,7 – 0,6	менше 0,6

**Матеріали і методи.** Для проведення експериментальних досліджень використовували респиратори типу РПА-ТД, які попередньо охолоджували і одягали на добровольців на п'ять хвилин. При цьому контролювали силу натягу наголів'я динамометром (марка Force gauge NK 50 виробник Industrial & Scientific), щоб вона була в межах 4 – 5 Н. Потім півмаску знімали і смугу обтюратору фотографували на тепловізор марки Flir TG130.

Подальші дії полягають у розрахунку реальної площі прилягання півмаски за результатами обробки отриманого зображення термограми у програмі Matlab. Для цього, скориставшись функцією `imread`, зчитуємо різнокольорове зображення, а командою `surf` отримуємо відображення поверхонь з різним фоном (рис. 3 а). Далі за допомогою команди `thresholding` дістаємо бінарне зображення, на якому, скориставшись функцією `whos`, можна оцінити розмір і кількість елементів різного кольору (рис. 3 б). Потім функцію пошуку `find` аналізуємо масив

даних від локального теплового мінімуму до максимуму для визначення процентного співвідношення між відтінками. Максимально щільному приляганню відповідає – 1; відсутність прилягання – 0 (рис. 4).

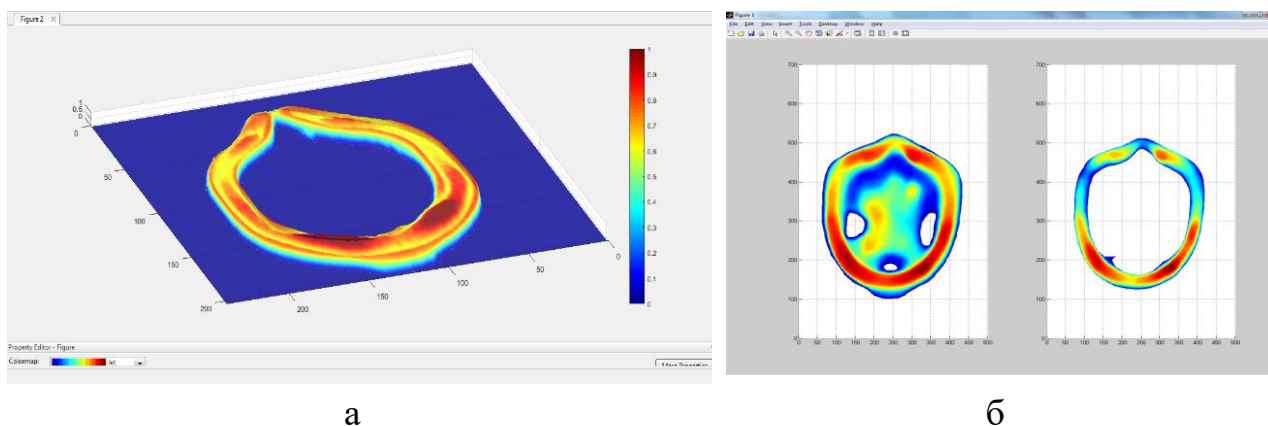


Рис. 3. Термографічний аналіз смуги обтюраторії

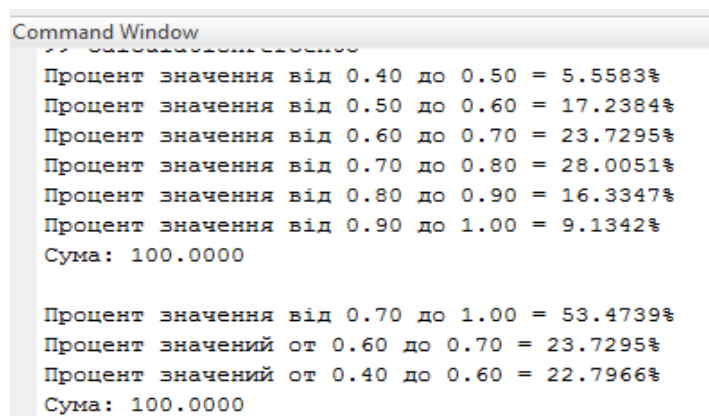


Рис. 4. Вигляд вікна з аналізом відтінків на обтюраторії які задавались шкалою від 0 до 1

За визначеними даними розраховуємо коефіцієнт щільності прилягання, рахуючи, що теплова потужність «еталонного» обтюратора складає 100 %.

Для перевірки похибки вимірювань використовуємо інтегративний алгоритм найближчих точок, який відомий як метод-ІСР. Він базується на ітеративній процедурі мінімізації відстані між двома точками на зображенні. Для цього беремо первинну хмару точок з необробленого термографічного зображення смуги обтюраторії і вторинну після глибокого перетворення відповідними функціями у програми Matlab. При поєднанні знімків розраховується середньоквадратичне відхилення між двома парами відповідних точок.

Нехай  $\{S_i^1, S_i^2\}_{i=1}^N$  множина пар найближчих точок для масивів  $S_1, S_2$ , які характеризують первинне і перетворене зображення смуги обтюраторії, тоді в процесі роботи алгоритму розраховується мінімальна відстань між точками цих масивів за формулою [9]



$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(S_i^1, S_i^2) \rightarrow \min,$$

де  $d$  – евклідова відстань між двома масивами точок.

**Результати дослідження** Тепловізійні зображення щільності прилягання півмаски до обличчя при різних силі натягу наголів'я наведені на рис. 5. Звертаємо увагу, що ділянки поверхні обтюратора які прилягають до обличчя з недостатніми притискним зусиллям, мають жовте або жовто-гаряче забарвлення оскільки контакт здебільшого зі шкірою існує, однак при утворенні каналів, наприклад при зміні міміки обличчя, поверхня обтюратора частково охолоджується, що і відображається на теплограммі. У результаті проведеної обробки зображень термограми за вище вказаним алгоритмом будували гістограму, яка характеризувала розподіл кольорової гама на обтюраторі (табл. 2). Результати визначення коефіцієнта щільності прилягання півмаски до обличчя з урахуванням похибки обробки зображень за метод-ІСР наведені у табл. 3. Порівнюючи отримані результати після відповідного обрахунку, можна зробити висновок, що похибка не більше 11 %.

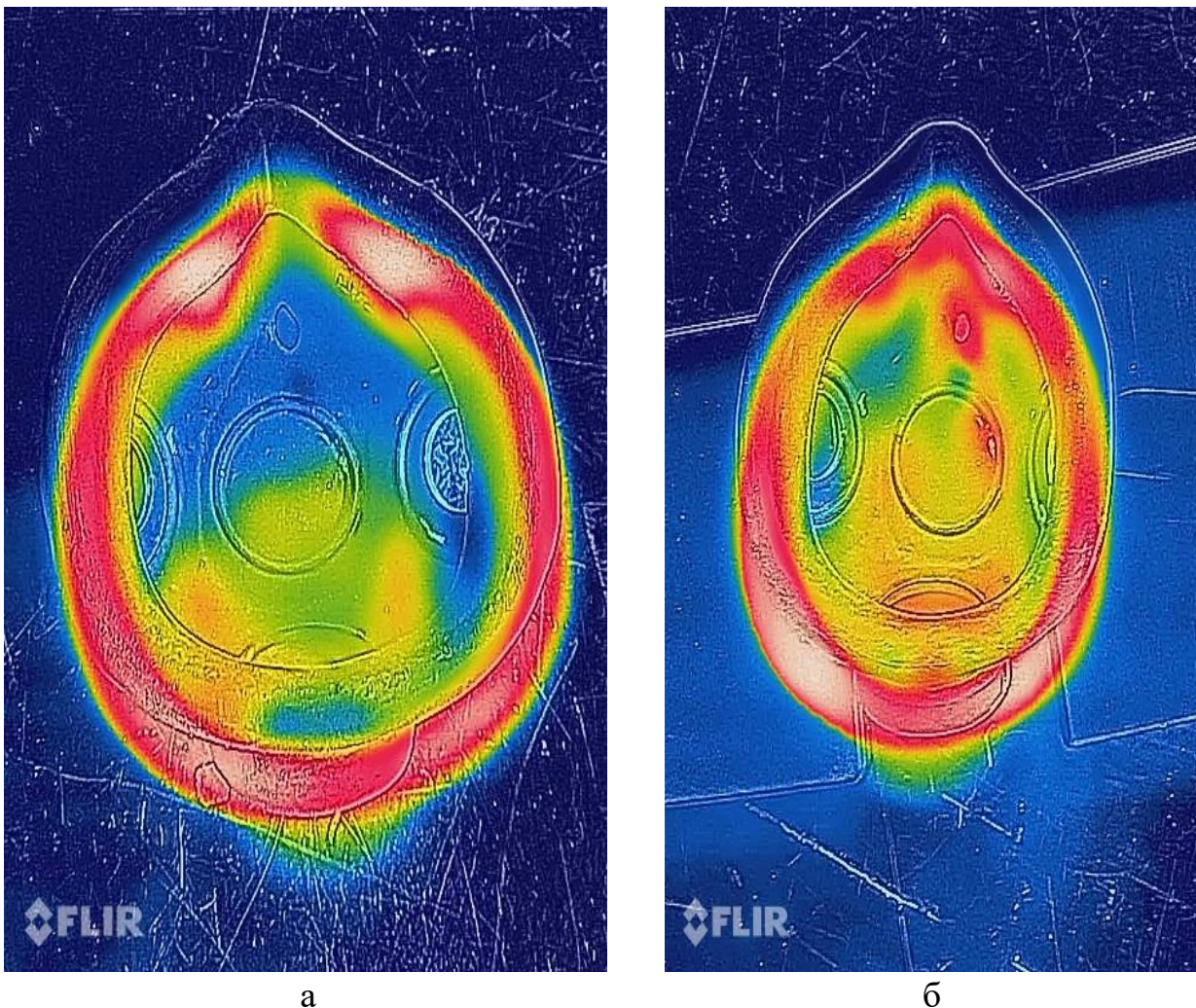
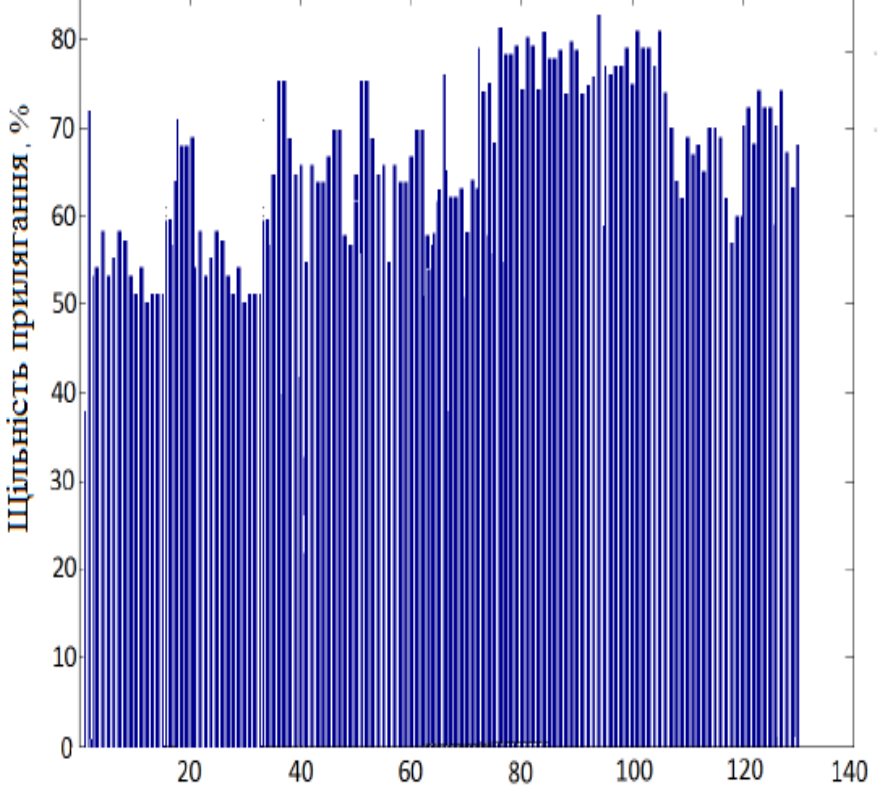
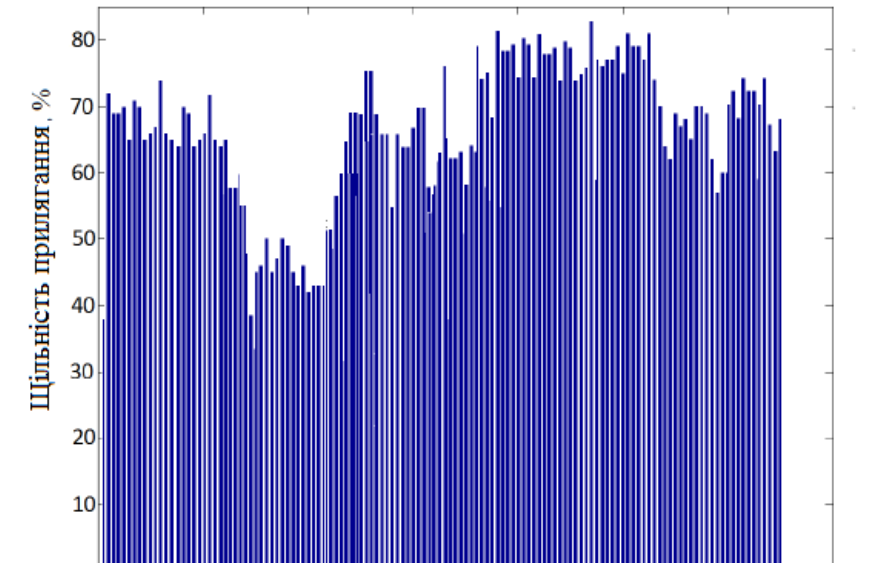


Рис. 5. Вигляд смуги обтюраторії досліджуваних півмасок при силі натягу наголів'я 4 Н (а); 3 Н (б)

Таблиця 2

## Вигляд результатів обробки термограми обтюратора

Оцінка щільності $K_{щ}$	Гістограма	Опис
Варіант а		
0,63 щільність прилягання допустима	 <p style="text-align: center;">Розмір обробленої поверхні, мм</p>	У діапазоні точок $N = 0 - 18, 25-35$ , зафіксовано зниження температурних показників, що вказує на наявність значних щілин
Варіант б		
0,57 щільність прилягання недопустима	 <p style="text-align: center;">Розмір обробленої поверхні, мм</p>	У діапазоні точок $N = 0 - 26-48$ фіксується різке зниження температурних показників, що вказує на наявність значних щілин



Результати досліджень щільності прилягання півмасок до обличчя

Номер випробування	Сила нятягу наголівя, Н	Коефіцієнт щільності прилягання напівмаски до обличчя, %	Похибка вимірювань, %
1	5,2	0,72	0,11
2	4,1	0,63	0,07
3	3,4	0,57	0,10
4	2,5	0,47	0,09

**Обговорення.** Температура поверхні обличчя працівника є інтегральним показником, який можна взяти за основу для вирішення задачі з оцінки коефіцієнта захисту респіратору у виробничих умовах, коли інші методи для визначення захисної ефективності не можна застосувати через низку різних причин. Отже у результаті проведеної роботи була запропонована кількісна оцінка щільності прилягання півмасок до обличчя людини шляхом обробки відповідним програмним забезпеченням знімків термограм смуги обтюрації. Запропонований підхід дозволяє визначати місце підсмоктування, адже при аналізі задаються координати пікселів відповідно до розмірів півмасок.

Судячи з отриманих результатів зразки респіраторів, що досліджувались мають незадовільну щільність прилягання до обличчя. Це можна пояснити тим, що півмаска дійсно невідповідала розмірам обличчя. На правильність даного висновку вказує і те, що збільшення притискних зусиль, за рахунок нятягування наголівя призвело до утворення нових зон з температурними «аномаліями». В іншому випадку збільшення сили нятягу дозволило покращити результат. Звідси можна зробити висновок про важливість попередньої перевірки відповідності півмаски розмірам обличчя випробувачів. Іншою причиною отриманого результату може бути те, що у гумових півмасках складно отримати високі ізолювальні властивості у порівнянні з силіконовими. До того ж є інші подібні дослідження, які також показують низькі ізолювальні властивості гумових півмасок через витoki в області перенісся, де складно забезпечити належну щільність через форму носа [10]. Однак у згаданих дослідженнях автори не аналізували вплив сили нятягу наголівя, що на наш погляд є одним із важливих аспектів для забезпечення високих захисних властивостей респіраторів і потребує подальших досліджень.

Ще однією причиною, яка потребує подальших досліджень є температурна різниця поверхонь обличчя людини, яка може коливатися від 32 до 37 °С, виходячи зі фізичного стану працівника. Ці коливання в деякій мірі можуть вплинути на результат, однак за попередніми висновками цей вплив не перевищує 15 %, що в межах похибки вимірювань.

Відмітимо, що даний метод на відміну від інших вимагає наявності програмного забезпечення при проведенні досліджень, що може здатись на перший погляд не зовсім зручно. З іншого боку використання інших кількісних

методів потребує більш дорогого обладнання і необхідності відповідної підготовки фахівців.

### Висновки

1. Запропонований метод з оцінки щільності прилягання півмаски до обличчя за термографічним знімком поверхні обтюратора, еластомірної півмаски респіратора, який дозволяє за рахунок обробки і порівняння зображення з еталонним знімком смуги обтюратора розрахувати коефіцієнт щільності прилягання півмаски до обличчя з урахуванням сили натягу наголів'я та визначити коефіцієнт захисту респіратора.

2. Для уникнення суб'єктивності при аналізі термограмм під час проведення телевізійного дослідження щільності прилягання обтюратора до обличчя запропонований швидкий метод оцінки щільності прилягання півмаски до обличчя з використанням термографування поверхні обтюратора, який після відповідної обробки зображення і порівняння із заданими умовами, що дозволяє засобами математичної середовища Matlab розрахувати коефіцієнт щільності прилягання півмаски до обличчя з урахуванням сили натягу наголів'я.

Проведено апробацію методу при аналізі термограмм реальної півмаски. В якості критерію оцінки використовується коефіцієнт щільності прилягання.

### Перелік посилань

1. EN 529:2005. Respiratory protective devices. Recommendations for selection, use, care and maintenance.
2. Миронов, Л. А. (2002). Значение подсоса загрязненного воздуха в подмасочное пространство фильтрующих респираторов и методы его обнаружения. *Рабочая одежда*, (3), 15-21.
3. Bollinger, N. J. (2004). *NIOSH respirator selection logic*. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health.
4. Janssen, L., Luinenburg, M. D., Mullins, H. E., Danisch, S. G., & Nelson, T. J. (2003). Evaluation of a quantitative fit testing method for N95 filtering facepiece respirators. *AIHA Journal*, 64(4), 480-486.  
<https://doi.org/10.1080/15428110308984843>
5. Coffey, C. C., Lawrence, R. B., Zhuang, Z., Campbell, D. L., Jensen, P. A., & Myers, W. R. (2002). Comparison of five methods for fit-testing N95 filtering-facepiece respirators. *Applied occupational and environmental hygiene*, 17(10), 723-730.  
<https://doi.org/10.1080/10473220290107002>
6. Janssen, L., Luinenburg, M. D., Mullins, H. E., Danisch, S. G., & Nelson, T. J. (2003). Evaluation of a quantitative fit testing method for N95 filtering facepiece respirators. *AIHA Journal*, 64(4), 480-486.  
<https://doi.org/10.1080/15428110308984843>
7. Han, D., Xu, M., Foo, S., Pilacinski, W., & Willeke, K. (1991). Simplified pressure method for respirator fit testing. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 52(8), 305-308.  
<https://doi.org/10.1080/15298669191364776>
8. Janssen, L. L., Luinenburg, M. D., Mullins, H. E., & Nelson, T. J. (2002). Comparison of three commercially available fit-test methods. *AIHA Journal*, 63(6), 762-767.  
<https://doi.org/10.1080/15428110208984767>
9. Гансалес, Р., Вудс, Р., & Эддинс, С. (2006). *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*. Техносфера.

10. Besl, P., & McKay, N. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(2), 239-256. <https://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/class2004/wednesday/report/besl.pdf>
11. Lei, Z., Yang, J., Zhuang, Z., & Roberge, R. (2013). Simulation and evaluation of respirator face seal leaks using computational fluid dynamics and infrared imaging. *Annals of occupational hygiene*, 57(4), 493-506. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes085>

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Разработка метода оценки плотности прилегания эластомерной полумаски к лицу работников за термографическим снимком obtуратора.

**Методика исследования** Оценка базируется на применении статического подхода оценки термографических изображений полосы obtурации полумаски с помощью встроенных функций в математическом среде MATLAB с применением интегративного алгоритма ближайших точек - метода ICP.

**Результаты исследования.** Предложенный метод оценки плотности прилегания полумаски к лицу с термографическим снимком поверхности obtуратора, эластомерной полумаски респиратора, который позволяет за счет обработки и сравнения изображения с эталонным снимком полосы obtурации рассчитать коэффициент плотности прилегания полумаски к лицу с учетом силы натяжения оголовья. Итеративный подход базируется на решении задачи по минимизации возникновения неплотностей по полосе obtурации фильтровальной респиратора которые позволят снизить ошибки при проектировании ее геометрических размеров и избежания алгебраических ошибок при их оценке.

**Научная новизна.** Разработан метод измерения температуры поверхности obtуратора тепловизором на основе обработки выходных сигналов, позволяет осуществлять оперативный контроль мест образования зазоров вдоль полосы obtурации, выявлять ухудшение изолирующих свойств противопылевого респиратора и вычислять коэффициент его защиты.

**Практическое значение** Предложенный метод позволяет быстро определить соответствие полумаски лицу работника при выполнении различных производственных операций. Обеспечит контроль прижимных усилий эластомерной полумаски респиратора к лицу человека при его выборе и будет способствовать уменьшению подсос нефильтрованного воздуха в подмасочном пространстве.

**Ключевые слова:** полумаска, термограмма, obtуратор, коэффициент плотности прилегания.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of a method for estimating the tightness of the elastomeric half-mask to the face of workers according to the thermographic image of the obturator.

**Methodology.** The estimation is based on the application of a static approach to the estimation of thermographic images of the half-mask obturation band using built-in functions in the MATLAB mathematical environment using the integrative algorithm of nearest points - the ICP method.

**Findings.** A method for estimating the tightness of the half-mask to the face by thermographic imaging of the obturator surface, elastomeric half-mask of the respirator, which allows by processing and comparing the image with the reference image of the obturation strip to calculate the coefficient of

tightness of the half-mask to the face. The iterative approach is based on solving the problem of minimizing the occurrence of leaks in the obturation band of the filter respirator that will reduce errors in the design of its geometric dimensions and avoid algebraic errors in their evaluation.

**Scientific value.** A method for measuring the surface temperature of the obturator with a thermal imager based on the processing of output signals has been developed, which allows for operational control of gaps along the obturation strip, detects deterioration of insulating properties of dust respirator and calculates its protection factor

**Practical value.** The proposed method allows you to quickly determine the conformity of the half mask to the face of the employee when performing various production operations. Provides control of the clamping forces of the elastomeric half mask of the respirator to the person's face when choosing it and will help reduce the suction of unfiltered air into the mask space.

**Key words:** *half mask, thermogram, obturator, tightness factor.*