

С.І. Чеберячко, О.О. Яворська, Ю.І. Чеберячко

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ОДНОРАЗОВИХ ПІВМАСОК НА ЇХ ЕРГОНОМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

*Опубліковані результати дослідження ергономічних властивостей фільтрувальних півмасок різних конструкцій. Наведено також результати з оцінки впливу вологості повітря на опір диханню засобів індивідуального захисту органів дихання.*

---

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ОДНОРАЗОВЫХ ПОЛУМАСОК НА ИХ ЭРГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Опубликованы результаты исследований эргономичных свойств фильтровальных полумасок разных конструкций. Приведены также результаты оценки влияния влажности воздуха на сопротивление дыханию средств индивидуальной защиты органов дыхания.*

---

### INVESTIGATION OF CONSTRUCTION INFLUENCE OF HALF MASK DESIGN ON THEIR ERGONOMIC PROPERTIES

*In t article research results of ergonomic properties of different design filtering half masks is published. The results of assessing the influence of air moisture on breathing resistance of personal respiratory protection are shown.*

---

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одноразові фільтрувальні респіратори широко розповсюджені в промисловості для захисту органів дихання працівників перш за все завдяки зручності при експлуатації та низькій собівартості. Вони складаються зі спеціального фільтрувального елемента, який одночасно є і каркасом, оголів'я (спеціальні стрічки для закріплення респіратора на голові), носового затискача й обтюратора (рис. 1). Фільтрувальний елемент півмаски призначений для захисту органів дихання від забрудненого повітря і виготовляється з кількох шарів спеціального матеріалу, найбільш розповсюджено – три (рис. 2).

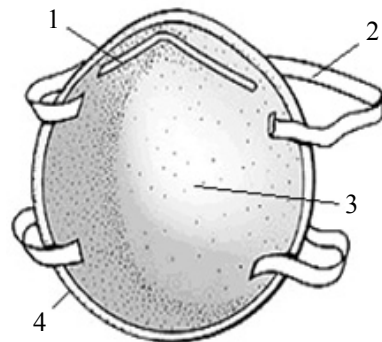


Рис. 1. Одноразова фільтрувальна півмаска:  
1 – носовий затискач; 2 – оголів'я;  
3 – фільтрувальний шар; 4 – обтюратор

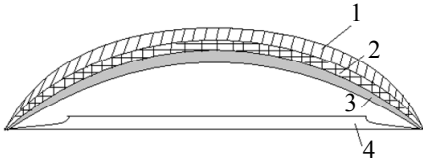


Рис. 2. Будова фільтрувальної півмаски:  
 1 – зовнішній каркасний шар; 2 – фільтрувальний шар;  
 3 – внутрішній каркасний шар;  
 4 – обтюратор

Перший (зовнішній каркасний) шар виконує функції захисту фільтрувального матеріалу від механічного пошкодження, забезпечує стійкість респіратору до деформації, оскільки він має більшу жорсткість (виконаний з грубих волокон). Він також видаляє з повітряного потоку найбільші частинки пилу, що дозволяє підвищити термін дії ЗІЗОД. Другий (фільтрувальний), призначений для очищення повітря від шкідливих домішок. Визначає ступінь захисної ефективності респіратору. Третій (внутрішній каркасний) – опора для фільтрувального матеріалу. Оскільки цей шар прилягає до обличчя, то має бути максимально приємним на дотик і не подразнювати шкіру. Крім того, часто його виконують гідрофільним для збільшення вбирання вологи, що видихається.

Необхідність у покращенні захисних і ергономічних показників респіраторів, викликаних такими причинами як підвищення надійності ЗІЗОД, конкуренція, постійне удосконалення вимог нормативних ак-

тів з охорони праці та інше, призводить до постійного пошуку і розробки нових типів одноразових півмасок. Крім того, забезпечення захисту органів дихання працівників протягом всієї робочої зміни зі значним заповненням робочої зони вимагає у виробників ЗІЗОД збільшувати фільтрувальну поверхню півмасок. Вважаємо, що, чим вона більша, тим нижчі опір диханню та коефіцієнт проникнення аерозолу, отже підвищується термін захисної дії, адже швидкість фільтрування у такому випадку зменшується. Звертаємо увагу і на існування вимоги до роботодавців у більшості країн Європи щодо можливості вибору фільтрувального респіратору робітником з декількох запропонованих типів для зменшення підсмоктувань за смугою обтюрації. Таким чином, дослідження, спрямовані на виявлення шляхів підвищення якості ЗІЗОД через пошук слабких місць півмасок і удосконалення їх конструкцій, особливо смуги обтюрації або структури фільтрів, забезпечення оцінки захисних властивостей є сьогодні досить актуальними.

## ВИДІЛЕННЯ НЕВИРШЕНОЇ ПРОБЛЕМИ

Для задоволення вимог споживачів виробники фільтрувальних ЗІЗОД пропонують декілька типів сучасних протипилових півмасок: чашкоподібну (рис. 3, а), двохскладчасту (горизонтальній поверхні або вертикальній площині) (рис. 3, б, в), типу «конверт». (рис. 3, г).

а



б



в



г

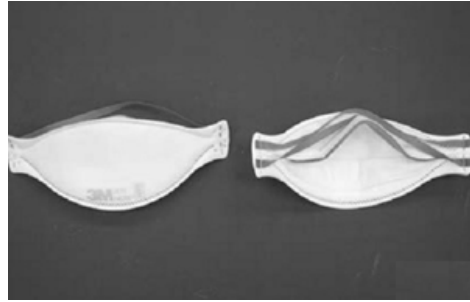


Рис. 3. Конструкції одноразових фільтрувальних півмасок: чашкоподібна (а), двоскладчаста горизонтальній (б), вертикальній (в) площині, «конверт» (г)

Виникає завдання у встановленні впливу на ефективність захисної дії фільтрувальних півмасок взаємозв'язків із параметрами фільтрувального шару і формою півмасок.

#### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідженням перепаду тиску на фільтрувальних респіраторах присвячено багато як теоретичних [1 – 2] так і експериментальних робіт [3 – 6]. Встановлено, що залежність опору дихання від витрати повітря є лінійною [1, 3]. Визначено і затрати енергії працівників, через зміни частоти дихання, серцевих скорочень від зростання повітряного навантаження на півмаски [4], а також збільшення перепаду тиску ЗІЗОД від темпу роботи [5]. Є публікації і з оцінки впливу вологи на закупорювання пор між волокнами фільтрувального матеріалу [6]. Однак не зустрічались статті, де була проведена оцінка різноманітних форм і конструкцій фільтрувальних півмасок на їх ергономічні показники. Хоча схожі роботи були проведені серед хірургічних півмасок у зв'язку з необхідністю захисту від епідемії грипу [7].

#### ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

Метою роботи є визначення впливу конструкції фільтрувального елемента півмасок на перепад тиску для встановлення взаємозв'язків із параметрами фільтрувального шару і формою півмасок.

#### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для дослідження були відібрані фільтрувальні півмаски різних типів з клапанами і без клапанів видихання: три моделі чашкоподібної форми і по дві моделі двоскладчастих півмасок і типу конверт. Всі респіратори були другого класу захисту.

Експериментальні дослідження півмасок проводили в два етапи. На першому визначали залежність перепаду тиску різних типів півмасок від величини витрати повітря з метою оцінки ефективності використання їх фільтрувальної поверхні. На другому етапі встановлювали вплив вологості повітря на зростання перепаду тиску на фільтрувальних респіраторах. Дослідження проводились відповідно до методики, наведеної в ДСТУ EN 149 – 2003. Випробувальний стенд наведено на рис. 4.

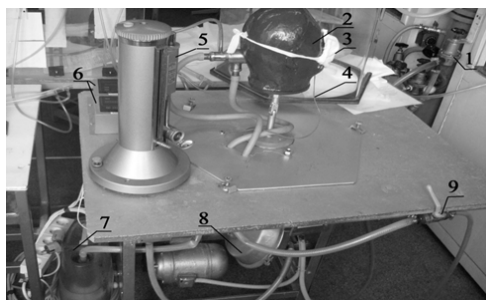


Рис. 4. Стенд для дослідження впливу температури і вологості повітря на основні показники фільтрувальних респіраторів: 1 – стабілізатор тиску; 2 – муляж голови; 3 – респіратор; 4 – датчик температури; 5 – мікроманометр; 6 – індикатори; 7 – зволожувач; 8 – дихальна машина; 9 – вентиль для регулювання витрати повітря

Перепад тиску на ЗІЗОД вимірювали за допомогою спеціального електронного манометра Testo 512 при різній витраті повітря у діапазоні (10 – 70 л/хв), технічні характеристики якого дозволяють визначати швидкість руху повітря, перепад тиску, розрідження та диференційний тиск.

Витрату повітря забезпечували за допомогою дихальної машини з об'ємом повітря за один хід 2 л, яка дозволяє змінювати кількість циклів за хвилину у діапазоні (5 – 40). Контроль і регулювання кількості повітря, яке проходило через випробувальний респіратор, здійснювали за допомогою відкаліброваного ротаметра РМ-25ГУЗ.

Вплив типу (форми фільтра) півмаски на її ергономічні показники можна оцінити за допомогою коефіцієнта ефективності використання фільтрувальної поверхні півмаски

$$k = \frac{F_{роб}}{F_{заг}},$$

де  $F_{роб}$  – робоча або ефективна фільтрувальна поверхня півмаски, м<sup>2</sup>;

$F_{заг}$  – загальна площа фільтрувальної поверхні півмаски м<sup>2</sup>.

Ефективну поверхню півмаски розраховуємо за формулою

$$F_{роб} = \frac{QR}{\Delta P_{pec}},$$

де  $R$  – опір фільтрувального шару, (Н·с)/м<sup>3</sup>;

$Q$  – витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta P_{pec}$  – перепад тиску на півмасці, Па.

Виходячи з того, що опір фільтрувального шару є постійною величиною для кожного типу респіратора і залежить від товщини фільтра, діаметра волокон, щільності їх упакування та динамічної в'язкості повітря його можна оцінити експериментально. Для цього вирізаємо з півмаски, яка бере участь у експериментах, рівномірний шматок фільтрувальної поверхні площею 0,005 м<sup>2</sup> і визначаємо на ньому перепад тиску при заданій витраті повітря 50 л/хв

$$R = \frac{\Delta P_{ш} F_{ш}}{Q},$$

де  $F_{ш}$  – площа шматка фільтрувальної поверхні, м<sup>2</sup>;

$\Delta P_{ш}$  – перепад тиску, Па.

Схема установки наведена на рис. 5.

Перед початком випробувань на вплив вологості повітря півмаски зважувались на вагах марки ВЛО 200. Потім їх встановлювали на муляж голови і забезпечували циклічну витрату повітря 50 л/хв. Випробування проводили протягом чотирьох годин. При цьому підтримували температуру (37 °С) і вологість (100%) повітря, за допомогою зволожувача Вонесо 7133. Контроль здійснювали спеціальними датчиками (ТЕРА ДВ-03, ТЕРА РТ1-01). Періодично, через кожні 20 хв, півмаску повністю знімали і знову одягали на муляж голови. В кінці випробувань визначали перепад тиску і масу півмасок з накопиченою вологою.

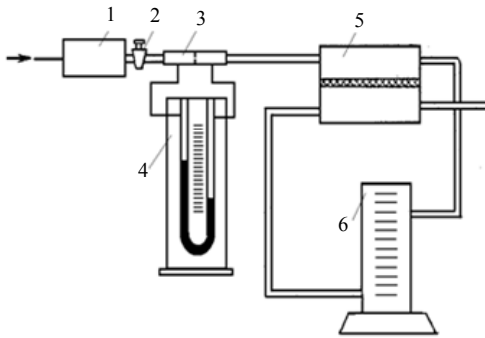


Рис. 5. Схема і загальний вигляд стенда для визначення перепаду тиску на фільтрувальному матеріалі: 1 – стабілізатор тиску; 2 – вентиль; 3 – діафрагма; 4 – манометр; 5 – затиск; 6 – компенсаційний мікроманометр

## РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Результати залежності перепаду тиску від витрати повітря різних типів фільтрувальних півмасок з клапаном і без клапана видихання наведені в табл. 1 і 2.

Аналізуючи отримані дані бачимо, що при вдиханні перепад тиску на фільтрувальних півмасках дещо більший, ніж при видиханні. Це пояснюється тим, що при видиханні частина повітря може оминати фільтр через нещільність смуги обтюрції, яка в

цей час збільшується. Наявність клапана видихання дещо вирівнює величину перепаду тиску у різних типах півмасок, тоді як у ЗІЗОД без клапана його показники мають незначні розбіжності. Найменший перепад тиску було зафіксовано у респиратора типу «конверт», найбільший – у чашкоподібної півмаски. Така ж картина спостерігається і при визначенні перепаду тиску під час вдихання, бо протипиловий респиратор типу «конверт» має найбільшу фільтрувальну поверхню серед перевірених півмасок.

ПЕРЕПАД ТИСКУ ПРИ ВДИХАННІ НА ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ПІВМАСКАХ ПРИ РІЗНІЙ ВИТРАТІ ПОВІТРЯ

Таблиця 1

Витрата повітря, л/хв	Перепад тиску (Па) при вдиханні на фільтрувальних півмасках типу			
	«чашка»	двоскладчаста		«конверт»
		горизонтальна	вертикальна	
	без клапана видихання			
10	8,1	7,4	7,3	7,1
20	14,1	13,2	13,1	12,8
30	19,3	18,3	18,4	18,1
50	29,2	27,5	27,5	28,1
60	34,5	33,8	33,7	33,1
70	40,3	39,3	39,1	38,9
	з клапаном видихання			
10	7,9	7,1	6,9	6,8
20	13,9	12,9	12,8	12,7
30	19,1	18,1	18,1	17,8
50	29,0	27,2	27,2	27,9
60	34,3	33,5	33,4	33,1
70	40,1	39,3	39,1	38,8

Витрата повітря, л/хв	Перепад тиску (Па) при видиханні на фільтрувальних півмасках типу			
	«чашка»	двоскладчаста		«конверт»
		горизонтальна	вертикальна	
	без клапана видихання			
10	5,1	4,3	4,5	4,1
20	9,7	8,6	9,1	8,4
30	14,5	12,9	13,5	12,8
50	24,1	21,5	22,5	20,6
60	29,1	25,8	26,9	24,9
70	33,5	30,1	31,5	28,8
	з клапаном видихання			
10	4,7	4,1	4,2	4,0
20	8,5	8,4	8,8	8,3
30	13,1	12,7	13,2	12,7
50	21,5	21,3	21,6	20,5
60	25,4	25,6	24,8	24,8
70	28,5	29,9	28,6	28,7

У табл. 3 наведено розрахунки коефіцієнта ефективності використання фільтрувальної поверхні ЗІЗОД. Вони дають підставу стверджувати про існування оптимальної площі фільтрувальної півмаски, коли будуть забезпечені найкращі ергономічні показники ЗІЗОД. Дійсно, збільшення площі фільтра призводить до зменшення

швидкості фільтрування, а отже, до зниження величини перепаду тиску. Однак існує певна межа, перевищення якої призведе до появи перевантажених і недовантажених ділянок фільтрувальної поверхні півмасок через зміну динаміки повітряних потоків у підмасковому просторі.

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ З ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЕФЕКТИВНОСТІ  
ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРУВАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПІВМАСОК

Таблиця 3

Тип півмаски	Перепад тиску (Па) на шматку поверхні респіратору	Опір фільтрувального шару, $R_f$ , (Н·с)/м <sup>3</sup>	Перепад тиску (Па) на півмасці	Робоча площа поверхні півмаски, м <sup>2</sup>	Загальна площа поверхні півмаски, м <sup>2</sup>	Коефіцієнт ефективності використання фільтрувального матеріалу
«чашка»	75,5	471,87	22,1	0,017081	0,0188	0,91
горизонтальна	74,6	466,25	21,5	0,017349	0,0217	0,80
вертикальна	74,5	465,62	22,5	0,016556	0,0211	0,78
горизонтальна	75,1	469,37	21,8	0,017225	0,0202	0,85
«конверт»	76,2	476,25	20,6	0,018495	0,0255	0,73

Підтвердження цього припущення можна знайти при порівнянні коефіцієнтів ефективності використання фільтрувального матеріалу між двома двоскладчастими у горизонтальній площині півмасками,

які мають різну загальну площу фільтра. Хоча у першого респіратору опір фільтрувального матеріалу нижчий, а загальна площа фільтра більша, все ж таки його поверхня використовуються на 80%, на від-

міну від другого із загальною площею фільтра меншою на 8%, коефіцієнт ефективності склав 85%. Найгірші показники має півмаска типу «конверт», в якій майже 25% поверхні не працює.

Необхідно відзначити, що на отримані результати також впливає нерівномірність розподілу щільності упакування волокон. Якщо деяку фільтрувальну поверхню розбити на рівномірні ділянки з однаковою площею (рис. 6), то її розподіл за товщиною для поліпропіленових матеріалів визначають за формулою [8]:

$$g(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta \ln(\sigma_g)}} \exp\left(-\frac{[\ln(\beta) - \ln(\bar{\beta})]^2}{2(\ln(\sigma_g))^2}\right),$$

де  $\beta$  – щільність упакування волокон деякої ділянки поверхні фільтрувального матеріалу з визначеною площею;

$\bar{\beta}$  – середня щільність упакування волокон фільтрувального матеріалу;

$\sigma_g$  – стандартне геометричне відхилення.

Тоді середню швидкість фільтрування через поверхню фільтра з відомою площею можна розрахувати за формулою:

$$\bar{v} = \iint v(\beta) g(\beta) dS,$$

де  $S$  – площа фільтрувальної поверхні

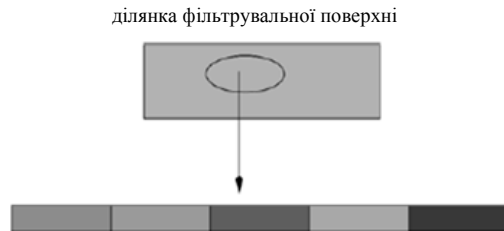


Рис. 6. Поверхня фільтрувального шару з різною щільністю упакування волокон

У табл. 4 наведено результати з перевірки впливу вологості повітря на зростання перепаду тиску на фільтрувальних респіраторах.

ПОКАЗНИКИ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ТА НАКОПИЧЕНОЇ ВАГИ НА ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ПІВМАСКАХ ПІСЛЯ ЧОТИРИГОДИННОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

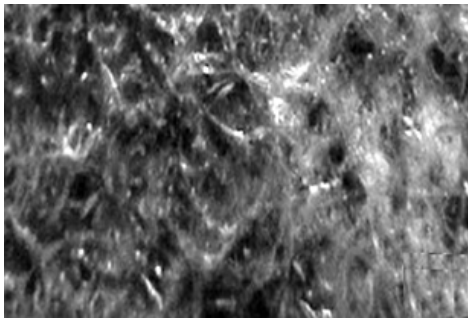
Таблиця 4

Тип півмаски		Перепад тиску півмасок на початку перевірки, Па		Перепад тиску півмасок після перевірки, Па		Вага півмасок, г			Різниця між показниками перепаду тиску до перевірки і після, Па	
		вдих	видих	вдих	видих	до	після	різниця	вдих	видих
«чашка»	з клапаном	14,1	9,7	14,3	9,9	20,8	21,05	0,25	0,2	0,2
	без	13,9	8,5	14,2	8,7	13,1	13,36	0,21	0,3	0,2
двоскладчаста	з клапаном	13,2	8,4	13,7	8,6	20,2	20,61	0,39	0,5	0,2
	без	12,9	8,6	13,5	8,9	12,3	12,75	0,44	0,6	0,3
«конверт»	з клапаном	12,8	8,3	13,3	8,6	22,2	22,62	0,41	0,5	0,3
	без	12,7	8,4	13,1	8,6	15,4	15,72	0,29	0,4	0,2

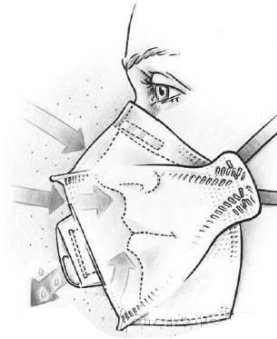
Перепад тиску у півмасках, після чотиригодинного експерименту, при вдиханні

мав більшу різницю, чим видиханні. Найбільшим приростом відзначились двосклад-

дчасті респіратори. Ймовірно, за рахунок більшого мертвого простору у цих півмасках зростала кількість накопиченої вологи. Краплинки води, які утворювались на волокнах, зменшували розміри пор і тим самим збільшували опір повітряному потоку (рис. 7). Також цей висновок підтверджує те, що фільтрувальні респіратори без клапана видихання мали після експерименту більшу вагу у порівнянні з такими ж півмасками з клапаном. Останній сприяв кращому вентиляванню підмаскового простору. Однак були зафіксовані випадки, коли у перших показники і перепаду тиску і маса води були гірші, ніж у безклапанних. Скоріше за все клапан повністю не спрацьовував. Відзначимо, що при низьких швидкостях у деяких півмасках клапан повністю не активувався, через жорсткість матеріалу з якого він виготовлений. Враховуючи, що він зменшує площу фільтрувальної поверхні, тому погіршується величина опору дихання ЗІЗОД. Також впливає і місце розташування сідловини, кращі результати отримували з розташуванням на прямому видиху (рис. 8).



*Рис. 7. Вид поверхні фільтра після експерименту (волокна вкриті шаром конденсату 500 кратне збільшення)*



*Рис. 8. Розташування клапана видихання*

## ВИСНОВКИ

1. Перепад тиску на фільтрувальних півмасках при вдиханні дещо більший, ніж при видиханні. Хоча найменший перепад тиску було зафіксовано у респіратора типу «конверт», а найбільший – у чашкоподібної півмаски, різниця між показниками незначна і суттєво на фізіологічний стан працівників не вплине. З іншого боку, коефіцієнт ефективності використання фільтрувального матеріалу є важливим показником для виробників ЗІЗОД, який дозволяє визначити розміри півмаски для забезпечення оптимальних ергономічних показників. Також на величину опору повітряного потоку півмасок впливає нерівномірність щільності упакування волокон.

2. Форма півмасок має суттєвий вплив при накопиченні вологи, через наявність у двоскладчастих півмасок збільшеного мертвого простору і неспрацювання клапана видихання. Також на збільшення накопичення вологи впливає тип фільтрувального матеріалу (гідрофобний чи гідрофільний) або наявність додаткового шару для поглинання вологи.





## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Effect on breathing resistance of a surgical mask worn over a N95 filtering facepiece respirator / M.R. Vojtko, M.R. Roberge, R.J. Vojtko [etc.] // *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 2008. – № 25. – P. 1 – 8.

2. Inspiratory Flow Rates During Hard Work When Breathing Through Different Respirator Inhalation and Exhalation Resistances / K. Coyne, D. Caretti, W. Scott [etc.] // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* – 2006. – № 3(9). – P. 490 – 500.

3. Чеберячко С.И. Исследование сопротивления воздушному потоку фильтрующих материалов с полипропиленовых волокон / С.И. Чеберячко // *Вісник Житомирського інж.-техн. ін-ту*. – 2002. – № 18. – С. 183 – 185.

4. Effects of wearing N95 and surgical facemasks on heart rate, thermal stress and subjective sensations / Y. Li, H. Tokura, Y.P. Guo [etc.] // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. – 2005. – № 78. – P. 501 – 509.

5. Чеберячко С.І. Оцінка впливу засобів індивідуального захисту органів дихання на працездатність людини / С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко // *Науковий вісник НГУ*. – 2007. – № 7. – С. 64 – 66.

6. Monaghan W.M. Thermal imaging comparison of maximum surface temperatures achieved on N95 filtering facepiece respirators with and without exhalation valves at sedentary breathing volumes / W.M. Monaghan, M.R. Roberge, M. Rengasamy // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. – 2009. – № 26. – P. 9 – 12.

7. Roberge R.J. Surgical mask placement over N95 filtering facepiece respirators: physiological effects on healthcare workers / R.J. Roberge, A. Coca, W.J. Williams [etc.] // *Respirology*. – 2010. – № 15. – P. 516 – 521.

8. Dhaniyala S. Theoretical modeling of filtration by nonuniform fibrous filters / S. Dhaniyala, Y. Benjamin, H. Liu // *Journal of aerosol science and technology*. – 2001. – № 34. – P. 170 – 178.

## ПРО АВТОРІВ

Чеберячко Сергій Іванович – к.т.н., доцент кафедри аерології та охорони праці Національного гірничого університету.

Яворська Олена Олександрівна – к.т.н., доцент кафедри аерології та охорони праці Національного гірничого університету.

Чеберячко Юрій Іванович – к.т.н., доцент кафедри аерології та охорони праці Національного гірничого університету.

