

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

ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ БЕЗПЕЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПІРАТОРІВ

Розроблено методику вибору фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання й удосконалено методику з визначення опору диханню, захисних властивостей за тест-аерозолями та стійкості до запилення респіраторів, які впроваджені у випробувальній лабораторії технічної експертизи засобів колективного й індивідуального захисту органів дихання працюючих ТОВ ПМТП «Спецнаб».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТИВОПЫЛЕВЫХ РЕСПИРАТОРОВ

Разработана методика выбора фильтрующих способов индивидуальной защиты органов дыхания и усовершенствована методика по определению сопротивления дыхания, защитных свойств по тест-аэрозолям и стойкости к запылению респираторов, которые внедрены в испытательной лаборатории технической экспертизы средств коллективной и индивидуальной защиты органов дыхания рабочих ООО ПМТС «Спецнаб».

DETERMINATION OF DUST RESPIRATOR SAFETY APPLICATION FIELD

The technique of filter selection methods of respiratory protection is developed. The technique for determining of the respiratory resistance, protective features via test-aerosols and durability to dust that implemented in the test laboratory of technical examination of collective and individual respiratory protection of workers LLC PMTC "Specsnab" is improved.

АКТУАЛЬНІСТЬ

Використання неякісних засобів індивідуального захисту органів дихання, або які втратили захисні властивості в процесі експлуатації, призводить до суттєвих помилок в оцінці пилового навантаження і пагубно впливають на здоров'я працівників [1]. В результаті – збільшення кількості професійних захворювань. Тому актуальною є завдання визначення часу безпечно-го використання респіраторів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для її вирішення скористаємось методом Монте-Карло, який дозволяє моделювати найгірші умови для оцінки захисних властивостей ЗІЗОД.

Для визначення відповідного і належного засобу індивідуального захисту органів дихання відповідно до ДСТУ EN 529:2006 необхідно визначити мінімально необхідний захист респіраторів [2]

$$K_3^{min} = \frac{C_0}{ГДК^{\delta}},$$

де C_0 – концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони, мг/м^3 ;

ГДК – гранично допустима концентрація шкідливої речовини, мг/м^3 .

Необхідною умовою для використання цієї формули є віднесення обох величин до одного проміжку часу (8 годин).

Отримане значення порівнюють із коефіцієнтом захисту фільтрувального респіратора, який визначається в лабораторних умовах за формулою

$$K_3 = \frac{C_0}{C_i},$$

де C_i – концентрація шкідливих речовин у підмасковому просторі ЗІЗОД, мг/м^3 .

Рахуємо, що респіратор можна використовувати, коли виконується умова $K_3^{\min} < K_3$ [2]. У цьому випадку концентрація шкідливих речовин під маскою респіратора повинна бути нижче ГДК. Однак, при цьому невраховується ймовірна зміна захисних властивостей ЗІЗОД протягом їх експлуатації. Адже відомі факти погіршення коефіцієнта захисту через накопичення пилового осаду і збільшення підмокувань через нещільності смуги обтюрації, дефектів клапанів видиху, сповзання півмаски й ослаблення натягу оголів'я. Зараз не існує оцінки з визначення безпечно-го часу використання ЗІЗОД, коли концентрація шкідливих речовин у підмасковому просторі буде нижче ГДК. Також виникає питання у правомірності порівняння вищезгаданих показників для вибору ЗІЗОД, оскільки їх визначення відбувається різними шляхами.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Для проведення оцінки рівня захисту працівників при використанні ЗІЗОД на вугільних шахтах необхідно врахувати результати досліджень запиленості повітря гірничих виробок та захисної ефективності респіраторів у виробничих умовах.

Більшість результатів вимірів забрудненості повітря гірничих виробок можна описати логарифмічно-нормальним законом розподілу. Важливими показниками є середня геометрична концентрація $GM C_0$ і стандартне геометричне відхилення $GSD C_0$. Дослідження про рівень запиленості гірничих виробок різних шахт опубліковано в роботі Медведєва (рис. 1) [3]. На базі цих досліджень був вибраний діапазон значень $GM C_0$, які найчастіше зустрічаються в гірничій промисловості (табл. 1).

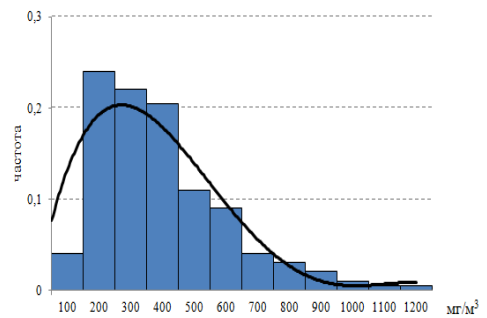


Рис. 1. Розподіл запиленості повітря у гірничій виробці [3]

Дослідженню захисної ефективності вітчизняних респіраторів у виробничих умовах вугільних шахт присвячено не так і багато робіт [4]. У той же час є досить багато подібних досліджень у зарубіжних виданнях [5 – 9]. У табл. 2 наведено середні значення коефіцієнту захисту і кількість зроблених вимірів у кожному дослідженні. Зазначимо, що у зарубіжних дослідженнях використовувались подібні респіратори до вітчизняного РПА. Вони мали резинову півмаску і по два фільтри другого класу захисту.

Виходячи з результатів наведених досліджень, шляхом аналізу зміни коефіцієнтів захисту, було взято середній коефіцієнт захисту між наведеними дослідженнями, який потім використовувався у подальшому моделюванні.

Шахта	Красноармійськвугілля	Добропіллявугілля	Павлоградвугілля	Селидіввугілля	Укрзахідвугілля
Середня геометрична концентрація пилу $GM C_0$, мг/м ³	317	305	286	212	164
Стандартне геометричне відхилення $GSD C_0$	5	3	4	4	2

РЕЗУЛЬТАТИ ВИРОБНИЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ РЕСПІРАТОРІВ

Таблиця 2

Автор досліджень	Місце проведення дослідження	Кількість вимірів, шт.	Марка ЗІЗОД	Середній коефіцієнт захисту ЗІЗОД
Чеберячко(4)	Вугільні шахти	30	РПА	
Семенов (5)	Вугільні шахти	20	РПА	200 ± 3,3
Нельсон (6)	Робота з азбестом	26	Еластомерні півмаски	168 ± 5,8
Колтон (7)	Ремонт кораблів	47		205 ± 3,5
Танахил (8)	Видалення азбесту	30		120 ± 4,7
Джансен (9)	Шліфування	25	MSA	1100 ± 5,3

Концентрація шкідливих речовин у підмасковому просторі залежить від коефіцієнта проникнення аерозолі через фільтри (K_n^ϕ) і коефіцієнта проникнення через витоки за смугою обтюрації та через нещільність клапану видиху (K_n^e). Для її розрахунку можна скористатися виразом [10]

$$C_i = \frac{(Q - Q_v) K_n^\phi C_0 + Q_v K_n^e C_0}{Q}, \quad (1)$$

де Q – загальна витрата повітря через респіратор, м³/с;

Q_v – витрата повітря через щілини у смузі обтюрації, м³/с;

K_n^ϕ – коефіцієнт проникнення через фільтрувальний елемент;

K_n^e – коефіцієнт проникнення через витоки за смугою обтюрації.

Витрату повітря через витоки за смугою обтюрації можна оцінити за формулою

$$Q_B = k_B (\Delta p)^a (d_B)^b,$$

де Q_B – витрата повітря через витоки за смугою обтюрації, л/хв;

k_B , a , b – константи, які визначаються експериментально для кожного типу півмасок;

d_B – розмір отворів між обтюратором і обличчям людини.

При правильній підгонці півмаски розмір зазорів може бути у діапазоні від 0,7 до 3,5 мм); k , a і b – емпіричні коефіцієнти (становлять 1,5; 0,65; 2,7 відповідно [10]).

Дослідження зміни перепаду тиску від накопичення пилового осаду на фільтрах респіратора РПА при постійному повітряному потоці 30 дм³/хв і різних концентраціях вугільного пилу в камері наведено в табл. 3. Отже, виходячи з цих даних можна оцінити величину підсмоктування через зазори за смугою обтюрації протягом робочої зміни та встановити зміну захисної ефективності респіратора РПА у часі.

У табл. 4 наведено значення коефіцієнтів проникнення через фільтри та нещільності смуги обтюрації, які використовували при моделюванні. Для визначення рівня захисту респіраторів використовувався метод Монте-Карло, який дозволяє змоделювати велику кількість ймовірних значень концентрації пилу в підмасковому просторі.

Тип фільтра до респіраатора РПА	Початковий перепад тиску, Па	Зміна перепаду тиску, Па/год, при запыленні вугільним пылом			
		25	50	100	300
ФРПА Р2	15	0,8	2,5	5,9	15,7
ФП-110-50 (Р3)	35	1,0	3,4	7,8	18,6

ЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНІХ КОЕФІЦІЕНТІВ ПРОНИКНЕННЯ ФІЛЬТРІВ
ДО РЕСПІРАТОРА РПА

Таблиця 4

Тип фільтра до респіраатора РПА	ФРПА Р2	ФП-110-50 (Р3)
Середній коефіцієнт проникнення фільтрів $GM K_n^\phi$, %	0,5	0,01
Стандартне геометричне відхилення $GSD K_n^\phi$, %	0,1	0,01
	0,2	0,02
	0,3	0,03
	0,4	0,04

ГРАНИЧНО ДОПУСТИМА КОНЦЕНТРАЦІЯ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ

Таблиця 5

Вміст двоокису кремнію, %	ГДК вугільного пылу, мг/м ³
10 – 70	2
2 – 10	4
< 2	10

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Послідовність розрахунків цим методом полягає у встановленні параметрів логарифмічно-нормальних розподілів зовнішньої концентрації пылу та коефіцієнта проникнення через фільтри, які потім підставляли у формулу (1) для визначення розподілу значень концентрації пылу під маскою ЗІЗОД. Обчислення виконувались за допомогою спеціальної комп'ютерної програми Cristall Ball, яка автоматично вибирала вид розподілу для кожного конкретного випадку. Розглянемо приклад одного набору значень для C_0 , K_n^ϕ , і K_n^e , при витраті повітря 30 л/хв. Найбільш вірогідні значення – моди (пікові значення концентрації пылу) кожного із параметрів з визначеною частотою прояву вводиться у рівняння (1) і розраховується значення C_i . Цей процес повторювався для великої кількості незалежних змінних (10000 ітерацій). Результат представляється у вигляді

діаграми, яка дозволяє побачити всі можливі значення і вірогідність їх отримання (рис. 2).

На рис. 3 наведено результати розрахунків концентрації пылу у підмасковому просторі респіраторів виходячи зі зміни концентрації пылу у робочій зоні.

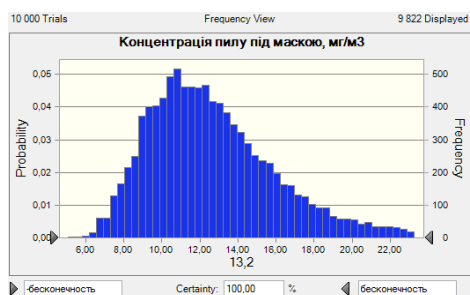


Рис. 2. Діаграма розподілу ймовірності значень концентрації пылу під маскою респіраатора РПА, яка побудована для $GM C_0 = 317$ мг/м³; $GSD C_0 = 4$; $GM K_n^\phi = 0,5\%$; $GSD K_n^\phi = 0,1$; $K_n^e = 0,005$, для витрати повітря 30 дм³/хв

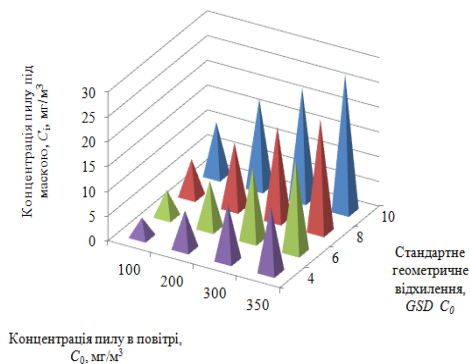


Рис. 3. Діаграма розподілу середніх значень концентрації пилу у підмасковому просторі респіратору РПА з фільтрами ФРПА Р2

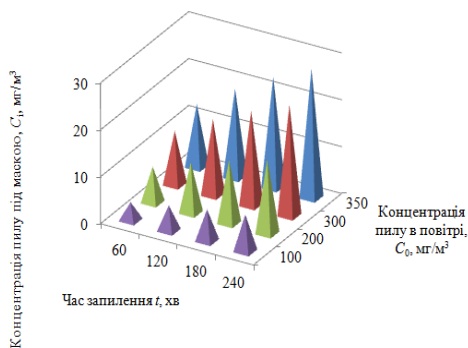


Рис. 4. Діаграма розподілу середніх значень концентрації пилу у підмасковому просторі респіратору РПА з фільтрами ФРПА Р2 у часі

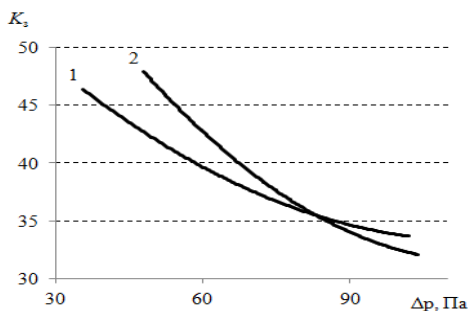


Рис. 5. Зміна коефіцієнта захисту респіратору РПА при збільшенні перепаду тиску на фільтрах ФРПА Р2 (1) і ФП-110 – 50 Р3 (2) при витраті повітря 30 л/хв

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Порівнюючи отримані показники із ГДК вугільного пилу (табл. 5) бачимо, що на відміну від раніше встановлених рекомендацій (до 400 мг/м³), ефективне використання респіратору РПА можливе тільки при концентраціях до 100 мг/м³, оскільки перевищення цієї величини призведе до потрапляння небезпечної кількості пилу до легенів працівників. Відзначимо, що з часом захисні властивості респіратору погіршуються, бо зростає опір фільтрів від накопиченого пилу (табл. 3), що збільшує підмаскову концентрацію пилу. З рис. 4 чітко видно, що навіть використання респіратору при концентрації 100 мг/м³ не забезпечує надійний захист протягом 4 годин. Також можна сказати, що якість фільтра не вплине на кінцевий результат, оскільки фільтри третього класу захисту, які виконані з матеріалу «елефлен», характеризуються незначним опором дихання (рис. 5).

Для оцінки результатів моделювання було використано метод біноміальної статистики, запропонований Уорреном Майерсом [11], його можна проілюструвати графічно (рис. 6). Так, по осі абсцис відкладаємо коефіцієнт забруднення повітря – відношення концентрації пилу у робочій зоні до гранично допустимої концентрації. Також ця величина є мінімально необхідного ступеня захисту, який повинен забезпечити респіратор.



Рис. 6. Розподіл різних можливих випадків коефіцієнта захисту респіратору і забруднення повітря, які можуть виникнути при використанні ЗГОД

На осі ординат відкладемо коефіцієнт захисту респіратора. Тоді лінія АЖ показує, коли коефіцієнт захисту респіратора дорівнює мінімально необхідному захисту, тобто коли $K_3 = K_{3н}$ або концентрація у під масковому просторі C_i дорівнює ГДК. У разі розміщення отриманого результату лівіше лінії АЖ можна говорити про забезпечення більшого ступеня захисту вибраного ЗІЗОД чим вимагається. Тому робітник захищений достатньою мірою. Якщо показники знаходяться з правого боку лінії АЖ, то респіратор не забезпечує необхідного захисту і концентрація аерозолу під маскою буде більше ГДК. Лінія ДЕ відповідає $K_3 = 9,09$, відповідно до ДСТУ EN 529 – це мінімальний коефіцієнт захисту для респіраторів другого класу. Лінія ВГ відповідає мінімально допустимій концентрації аерозолу, за якої можна використовувати даний клас ЗІЗОД. Забрудненість повітря, яка знаходиться праворуч лінії ВГ, перевищуватиме 12 ПДК, що унеможливує використання цих респіраторів. Діапазон, який знаходиться між лініями АБ і ВГ, відповідає умовам, в яких можна користуватись півмасками другого класу захисту. Зрозуміло, при коефіцієнті забруднення менше одиниці ЗІЗОД не потрібний.

Враховуючи, що більшість показників повинні знаходитись між лініями ВБ і ВГ, їх можна розділити на дві групи – адекватний захист, який знаходиться у трапеції АБВЗ і неадекватний – Δ АЗГ. Результати моделювання з різними рівнями забруднення повітря робочої зони і коефіцієнтами проникнення через фільтр і підсмоктування через зазори при використанні респіратора РПА відображались на цій діаграмі. Вірогідність того, що респіратор забезпечить адекватний захист (P) дорівнює кількості результатів, які опинились в трапеції АБВЗ, поділену на загальну кількість результатів. Вірогідність того, що респіратор не забезпечить необхідний ступінь захисту, відповідає відношенню кількості випадків, які потрапили у трикутник

Δ АЗГ, до повної кількості результатів моделювання. Для визначення 95% довірчого інтервалу ймовірності адекватного захисту використовували функцію біноміального розподілу (БІНОМРАСП) в програмі Excel.

На рис. 7 нанесено результати ймовірних коефіцієнтів захисту респіратора РПА, які отримані при моделюванні за допомогою методу Монте-Карло, виходячи з ГДК вугільного пилу 10 мг/м^3 . При розрахунках було використано наступні значення концентрації аерозолу: 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300 мг/м^3 ; значення коефіцієнта проникнення фільтрів – з табл. 4. З кожного розподілу було взято 10 – 15 значень з ймовірністю появи не нижче 0,5.

Із 120 результатів 94 (78%) знаходяться вище лінії АЖ, із них 90 були вище за лінію ДЕ, тобто $K_3 > 9,09$. Якщо взяти результати, які знаходяться тільки в зоні використання ЗІЗОД, то 84 результати із 86 відповідають адекватному захисту, тоді як 2 – потрапили в Δ АЗГ, що становить всього 2,3%. Середні значення коефіцієнта захисту становить $GМК_3 = 116,5$, $GSDK_3 = 15,6$. Якщо розрахувати довірчий інтервал з ймовірністю $p = 0,95$, то отримаємо $K_3 = 133,2 \pm 11,5$.

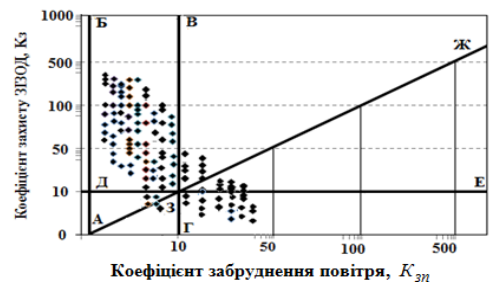


Рис. 7. Вірогідні результати коефіцієнтів захисту респіратора РПА відповідно до величини забруднення повітря при $K_{3н} = 10$, а $K_3 = 9$

Якщо лінію ДЕ провести у відповідності до вимог ЗІЗОД третього класу захисту ($K_3 = 50$), то отримаємо майже половину

результатів, які не відповідають вимогам (рис. 8). Із них у 32 випадках концентрація у підмасковому просторі перевищуватиме ГДК, а це майже 30%.

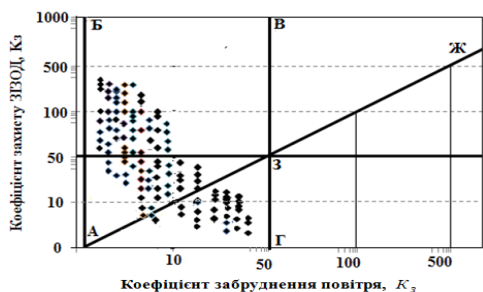


Рис. 8. Вірогідні результати коефіцієнтів захисту респіратор РПА відповідно до величини забруднення повітря при $K_{zn} = 50$, а $K_3 = 50$

Отже, використання фільтрувального респіратора РПА з фільтрами третього класу захисту не призводить до підвищення ступеня захищеності працівників. Навпаки, збільшення області використання ЗІЗОД призведе до підвищення ризику захворювання на пневмоконіоз. Якщо розглянути випадок при ГДК вугільного пилу – 2 мг/м^3 , кількість півмасок, які в змозі забезпечити відповідний захист зросте до 60%. Це говорить про необхідність встановлення чітких меж для використання ЗІЗОД, які б визначались за виробничими дослідженнями.

Натомість у стандарті ДСТУ EN 529 та у ДНАОП 0.00-1.04-07 немає однозначно встановлених очікуваних коефіцієнтів захисту для респіраторів різних конструкцій (які виготовляються в ЄС або США або хоч якось обґрунтованих), а для респірато-

рів-півмасок з протиаерозольними фільтрами вказано коефіцієнт захисту, що отримується в лабораторних умовах (при сертифікації), що не враховує суттєву відмінність лабораторної та реальної ефективності. Більш того, в пункті 6.2.2 (ДНАОП 0.00-1.04-07) рекомендується використовувати півмаски зі змінними фільтрами, стійкими до запилення, при концентрації вугільного пилу $400 - 500 \text{ мг/м}^3$, що навіть при низькому вмісті кварцу й інших токсичних речовин відповідає мінімум $40 - 50$ ГДК.

У той же час у додатку С (ДСТУ EN 529) містяться значення очікуваних коефіцієнтів захисту, які використовуються в країнах ЄС. Однак всупереч посиланням на необхідність їх використання при виборі ефективних респіраторів – у документі не вказані ці значення для України. Формально, він не дозволяє обґрунтувати вибір типу респіратора для забезпечення захисту робітників. У кожній країні ЄС існують свої значення для обмеження використання ЗІЗОД. Наприклад, у BS EN 4275-1997 (Великобританія) вказано, що фільтрувальні півмаски можна використовувати до 20 ПДК.

ВИСНОВКИ

Таким чином, результати даної роботи можна застосовувати для обґрунтування зони використання ЗІЗОД, виходячи як з результатів моделювання, так і реальних досліджень захисної ефективності півмасок на робочих місцях. Так для вугільних підприємств безпечна зона використання респіратора РПА з будь-якими фільтрами становить не більше 10 ПДК.



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кириллов В.Ф. О средствах индивидуальной защиты органов дыхания работающих (обзор литературы) / В.Ф. Кириллов, А.А. Бунчев, А.В. Чиркин // Медицина труда и промышленная экология. – 2013. – № 4. – С. 25 – 31.

2. ДСТУ EN 529:2006 Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Рекомендации относительно выбора, использования, ухода и обслуживания. Инструкция (EN 529:2005, IDT). – Чинний від 10.01.2007.

3. Пылевая обстановка и заболеваемость пневмокониозом на шахтах Украины / [Медведев Э.Н., Кашуба О.И., Кривохижа Б.М., Крутенко С.А.]. – Макеевка – Донбасс: МакНИИ, 2005. – 205 с.

4. Применение противопылевых респираторов на угольных предприятиях / [Чеберячко С.И., Чеберячко Ю.И., Радчук Д.И., Наумов Н.Н.] // Проблемы гірничої технології: матеріали наук.-практ. конф. – Красноармійськ: КІІ ДонТУ, 2010. – С. 168 – 174.

5. Организация и основные результаты сравнительных испытаний противоаэрозольных респираторов повышенной пылеемкости / А.П. Семенов, В.И. Филатов, А.В. Вихлянцева [и др.] // Комплексные решения вопросов охраны труда. – М.: Профиздат, 1982. – С. 34 – 40.

6. Nelson T.J. The assigned protection factor of 10 for half-mask respirators / T.J. Nelson // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1995. – Vol. 56(7). – P. 717 – 724.

7. Colton C.E. A Comparison of the Workplace Performance of Two Different Types of High-Efficiency Filters on Half-Facepiece Respirators / C.E. Colton, J.O. Bidwell // Pa-

per presented at the American Industrial Hygiene Conference and Exposition. – Kansas City, Missouri, 1995. – P. 34 – 45.

8. Tannahill S.N. Workplace Protection Factors of HSE Approved Negative Pressure Full Facepiece Dust Respirators during Asbestos Stripping: Preliminary Findings / S.N. Tannahill, R.J. Willey, M.H. Jackson // Ann. Occup. Hyg. – 1990. – Vol. 34(6). – P. 547 – 552.

9. Johnston A.R. Workplace Protection Factor Study for Airborne Meal Dusts" / A.R. Johnston and H.E. Mullins // Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference and Exposition. – Kansas City, Missouri, 1987. – P. 64 – 75.

10. Danisch Respirator Leak Detection by Ultrafine Aerosols / Benjamin Y., Liu H., Lee Jae-Keun [et al.] / A Predictive Model and Experimental Study Aerosol Science and Technology, 1993. – № 19(1). – P. 15 – 26.

11. Warren R. Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators: Developing Probability Estimates to Evaluate the Adequacy of an APF of 10 / R. Warren, Z. Zhuang // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1998. – № 59(11). – P. 796 – 801.

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.