

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАЩИТЫ ФИЛЬТРУЮЩИХ РЕСПИРАТОРОВ

В.И. Голинько, С.И. Чеберячко, Н.Н. Наумов, Ю.И. Чеберячко, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина

Проанализирована теоретическая зависимость между коэффициентом защиты и расходом воздуха сквозь зазоры у полумасок. Экспериментально подтверждено, что при достаточно больших отверстиях защитная эффективность респиратора не зависит от качества фильтра

Введение

Подземная добыча полезных ископаемых связана не только с риском для жизни, но и с воздействием вредных производственных факторов – пыли, шума, вибрации и др. По данным Госгорпромнадзора порядка 70% шахтёров работают во вредных условиях. Например, запылённость при работе проходческих комбайнов может превышать 1 г/м^3 , а в среднем может составлять более 300-400 мг/м^3 [1]. В этих условиях правительство Украины в разные годы предприняло ряд действий для защиты здоровья шахтёров. Прежде всего были разработаны и внедрены Законы Украины о охране труда и о всеобщем государственном социальном страховании от несчастного случая на производстве и профессионального заболевания, которые привели к утере трудоспособности. Введены в действие Указ Президента Украины «О структурной перестройке угольной промышленности и программа повышения безопасности на угольно-добывающих предприятиях на 2010 – 2017 годах, которые направлены на улучшение условий труда усовершенствование процесса социальной защиты горнорабочих от профзаболеваний. Кроме этого, были приняты государственный стандарт ДСТУ EN 529:2006 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, використання, догляду і обслуговування» и ДНАОП 0.00-1.04-07 «Правила выбора и применения средств индивидуальной защиты органов дыхания», которые призваны регулировать выбор и организацию применения средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). Вместе с тем, несмотря на использование СИЗОД на рабочих местах с высокой степенью запылённости, диагноз "пневмокониоз" и "профессиональный пылевой бронхит" – далеко не редкость [2]. Для того, чтобы фильтрующий респиратор защитил рабочего от воздушных загрязнений, он должен обеспечить: надежную изоляцию органов дыхания от окружающего загрязнённого воздуха зоны дыхания, и снабжение рабочего отфильтрованным воздухом, пригодным для дыхания. Если при использовании достаточно эффективных фильтров решить вторую задачу сравнительно просто, то решить первую гораздо сложнее – у людей разные лица (по форме и размеру). В то же время согласно требованиям EN 140 и EN 149 подсос нефильтрованного воздуха по полосе обтюрации у полумасок должен быть не более 5 % для 46 из 50 измерений. Кроме того, у восьми испытателей из десяти средний результат не должен быть выше 2 %. Причём согласно требованию стандартов к испытаниям привлекаются «практически здоровые лица без бороды, ознакомленные данными или подобными фильтрующими полумасками с характером испытаний и условиями их проведения, в количестве 10 человек». Отметим важное требование, что не следует привлекать к испытаниям людей, для которых невозможно добиться удовлетворительного прилегания фильтрующей полумаски. То есть, по существу, испытанный респиратор может быть рекомендован лишь для работников с лицами соответствующей формы. Поэтому исследования эффективности фильтрующих респираторов, которые помогут оценить реальную их степень защиты для конкретного человека, являются, сегодня весьма актуальными.

Состояние вопроса. Для правильного выбора фильтрующего респиратора для известных условий работы, необходимо установить его значения коэффициента защиты. Считается, что для большинства рабочих правильное использование исправного респиратора позволит сни-

зять концентрацию вредного вещества до безопасных величин. Но использующиеся величины коэффициентов защиты основываются на измерениях в лаборатории, когда группа испытуемых в испытательной камере, заполненной аэрозолем контрольного вещества, в одетых респираторах, выполняет определённые движения. Принято считать, что эта проверка предсказывает ту степень защиты, которая может быть получена на рабочем месте. Десятки исследований показали, что степень защиты респиратора зависит от величины просачивания аэрозоля через неплотности полосы обтюрации [3]. Поэтому учитывая, отсутствие требований о проверке коэффициентов проникания СИЗОД на рабочем месте, возникает задача в разработке модели, которая позволит оценить реальные защитные свойства фильтрующих респираторов с учетом возможных неплотностей.

Выделение нерешенной проблемы.

Для вычисления просачивания через зазоры разработано несколько математических моделей [4 - 6]. В работе [4] расход воздуха через зазор вычисляется как,

$$Q_B = k\Delta p^a d_0^b, \quad (1)$$

где Q_B – расход воздуха через зазор между лицом и полумаской, мл/мин; k , a и b – эмпирические коэффициенты, Δp – перепад давления у фильтра респиратора, Па; d_0 – диаметр отверстия, м. Применение предложенной формулы без экспериментальной проверки коэффициентов для конкретного респиратора затруднительно.

В другой работе [5] предложена линейная взаимосвязь между просачиваниями и перепадом давления, тогда величина расхода через зазор составляет

$$Q_B = k(\Delta p_r - \Delta p)$$

где Δp_r – перепад давления на респираторе без подсоса, определенный на манекене, Па; Δp – перепад давления на респираторе, определенный на человеке, Па.

Однако, в этой модели может возникнуть погрешность связанная с определением режима дыхания у человека и воспроизведением его при испытаниях на манекене.

Также коэффициент проникания фильтрующего респиратора можно определить по формуле с учетом турбулентного режима течения воздуха через зазоры [6]

$$K_n = \frac{2\Delta p K_{n\phi} Q}{(R_{n\phi} Q - \Delta p)^2 + \left(\sqrt{R_{n\phi}^2 + \frac{4\Delta p K_{n\phi} Q}{(R_{n\phi} Q - \Delta p)^2} - R_{n\phi}} \right) (1 - K_{n\phi})} Q,$$

где Q – суммарный расход воздуха через фильтр и зазоры, дм³/мин; $K_{n\phi}$ – коэффициент проникания аэрозоля сквозь фильтр; $R_{n\phi}$ – сопротивление воздушному потоку фильтра, Н·с/м⁵.

Формирование целей. Основным показателем эффективности фильтрующих респираторов является коэффициент защиты, который позволяет оценить возможность снижения вдыхаемой концентрации аэрозоля

$$K_z = \frac{C_0}{C_i}, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация аэрозоля в окружающей среде, мг/м³; C_i – концентрация аэрозоля в подмасочном пространстве СИЗОД, мг/м³.

Для определения вдыхаемой концентрации аэрозоля представим, что неочищенный воздух может поступать в подмасочное пространство по двум каналам: через фильтр и неплотности полосы обтюрации, дефекты клапанов выдоха. (Рис. 1).

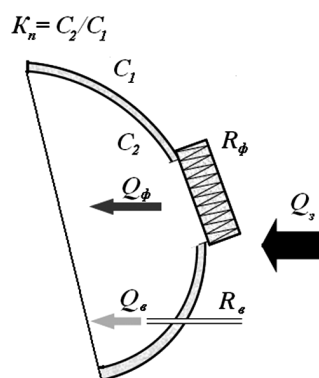


Рис. 1. Схема поступления воздуха в подмасочное пространство

Тогда концентрацию аэрозоля в подмасочном пространстве можно определить по формуле

$$C_i = \frac{(Q - Q_\epsilon)K_{нф}C_0 + Q_\epsilon K_{нэ}C_0}{Q}, \quad (3)$$

где $K_{нэ}$ – коэффициент проникания через зазоры.

Тогда коэффициент защиты с учетом (3) можно рассчитать

$$K_3 = \frac{Q_\epsilon}{(Q - Q_\epsilon)K_{нф} + Q_\epsilon K_{нэ}} = \left[K_{нф} + \frac{Q_\epsilon}{Q}(K_{нэ} - K_{нф}) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Это уравнение показывает, что защитная эффективность респиратора зависит и от величины зазоров, и от свойств фильтра. Кроме того, на коэффициенты проникания также влияют размер частиц аэрозоля, скорость воздуха, что тоже отразится на защитной эффективности СИЗОД. Учитывая исследования Л. Баррета и А. Руссо, которые показали, что эффективность улавливания фильтров при их запылении увеличивается (стремится к нулю) [7], в первом приближении коэффициент проникания аэрозоля сквозь фильтр приравняем нулю, тогда

$$K_3 = \frac{Q}{Q_\epsilon K_{нэ}}, \quad (5)$$

Для расчета количества воздуха, которое проникает через зазоры можно воспользоваться формулой (1). Однако возникает задача в определении размеров зазоров. Для ее решения используется имитация различных по величине зазоров через установку капилляров разного диаметра по периметру обтюратора на манекене (Рис. 2). Сравнивая величины перепадов давления на СИЗОД, которые определены на человеке и на манекене, можно выяснить общий размер утечек. Для уменьшения погрешности измерения необходимо устанавливать имитационные трубочки в местах наибольшего выявления зазоров (Рис. 3)[8].

Для расчета коэффициента проникания через зазоры воспользуемся формулой предложенной Хигсом [9]

$$K_{нэ} = 1 - 5,5k_2^{\frac{2}{3}} + 3,77k_2, \quad \text{при } k_2 < 0,009, \quad (6)$$

$$K_{нэ} = 0,819 \exp(-11,5k_2) + 0,0975 \exp(-70,1k_2), \quad \text{при } k_2 > 0,009, \quad (7)$$

где $k_2 = \frac{DL_1}{Q_\epsilon}$; L_1 – длина щели, м; D – коэффициент диффузии.



Рис. 2. Схема расположения капилляров по полосе обтюрации

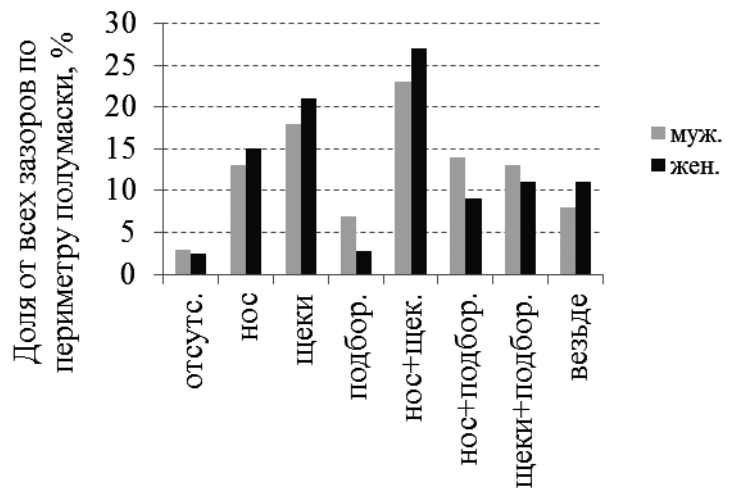


Рис. 3. Места образования зазоров по полосе обтюрации полумасок [8]

Экспериментальная часть.

На Рис. 4. показана схема испытательной установки по тест-аэрозолю хлорид натрия, используемая в этом исследовании. Она состоит из генератора частиц аэрозоля; измерительной системы – спектрофотометра с программным обеспечением, определяющей распределение частиц по размерам; и испытательной камеры с манекеном головы.

Генератор аэрозоля отвечает требованиям ДСТУ EN 140-2004. Частицы аэрозоля получают путем испарения солевого конденсата, и высушивания в осушителе. После пары NaCl разбавляются чистым воздухом, для обеспечения необходимой концентрации, образуя мелкодисперсный аэрозоль.

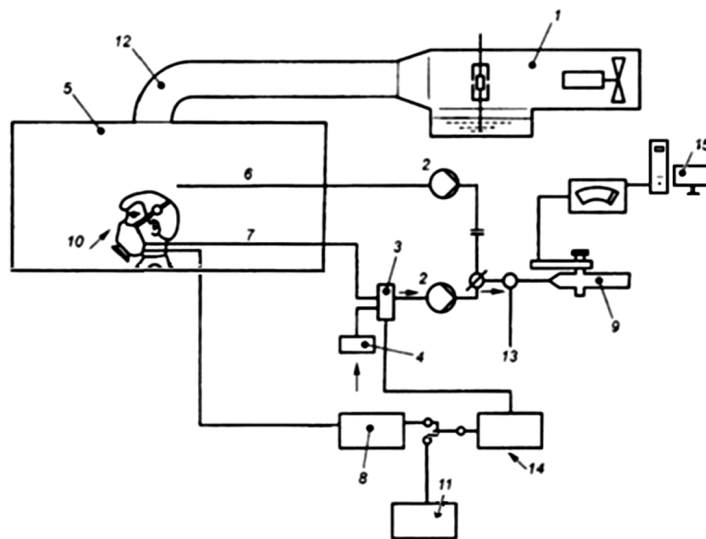


Рис. 4. Схема установки по проверке фильтрующих респираторов по тест-аэрозолю хлорид натрия: 1 - генератор аэрозоля с компрессором; 2 - аспираторы; 3 - многоходовой клапан; 4 - фильтр; 5 - испытательная камера; 6 - патрубок для отбора пробы тест-аэрозоля с камеры; 7 - патрубок для отбора пробы тест-аэрозоля с подмасочного пространства; 8 - датчик давления; 9 - спектрофотометр; 10 - противопылевой респиратор; 11 - дыхательная машина; 12 - воздуховод и распределитель аэрозольной смеси; 13 - патрубок для подачи чистого воздуха; 14 - система распределения фаз вдыхание - выдыхание; 15 – компьютер

Измерение коэффициента проникновения за тест-аэрозолем хлорид натрия выполняется с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра. Он основан на способности атомов избирательно поглощать свет определенной длины волны.

рательно поглощать электромагнитное излучение в различных диапазонах спектра. Пробу материала, анализируемого в виде аэрозоля подают в пламя горелки. В пламени (до 2000° С) молекулы солей диссоциируют на атомы, которые могут поглощать свет. С общего излучения спектральные линии, которые исследуются, выделяют монохроматором, а их интенсивность фиксируют блоком регистрации. Результаты измерения автоматически заносятся в компьютер в программу ААС-2009, где обрабатывались и выдавали результат в форме графиков.

Коэффициент проникания тест-аэрозоля рассчитывается по формуле

$$K_n = \frac{I_2 - I_0}{I_1 - I_0},$$

где I_2 – показатель спектрофотометра после полумаски; I_1 – показатель спектрофотометра перед полумаской; I_0 – фоновый показатель спектрофотометра.

Перепад давления на полумаске определяли согласно ДСТУ EN 143 – 2002 (Рис. 5, 6). Респиратор герметично закрепляли на манекене головы (с помощью силикона). Величину перепада давления фиксировали манометром (МКВ 2500), при различных расходах воздуха от 10 до 100 л/мин.



Рис. 5. Стенд для определения перепада давления на СИЗОД: 1 – трубка; 2 – манекен головы; 3 – дыхальная машина

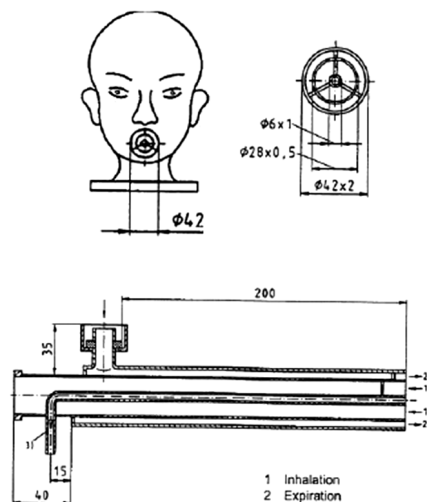


Рис. 6. Чертеж манекена головы согласно ДСТУ EN 143 – 2002

Результаты и обсуждение.

Для эксперимента был взят фильтрующий респиратор РПА с фильтрами первого (Р3) и второго (Р2) классов защиты от производителей АО «Эсфил-Техно» (г. Силламяэ) и «ТПГ «Стандарт» (г. Днепропетровск). Перепад давления проверялся при расходах 10 – 100 л/мин (Рис. 7). Его определение проводили для расчета расхода воздуха через капилляры, установленные по периметру обтюлятора (Рис. 2), которые поочередно открывались для моделирования зазоров разных размеров. Видим, что сопротивление воздушному потоку высокоэффективных фильтров при расходе воздуха 100 л/мин на 50 % больше чем у фильтров второго класса защиты.

Коэффициент проникания фильтров по тест-аэрозолю хлорид натрия приведен в табл. 2. Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением расхода воздуха защитная эффективность снижается. Это объясняется снижением улавливания частиц за счет диффузионного механизма, который работает при невысоких скоростях фильтрации [10]. В то же время эти значения соответствуют максимальному проскоку частиц через респираторы с плотным прилеганием полумаски. При наличии дополнительного просачивания через зазоры, коэффициент проникания еще больше увеличится по сравнению с этими результатами, это позволит определить коэффициент подсоса.

На Рис. 8 показана зависимость относительного расхода воздуха через зазоры от общего расхода через респиратор при разных диаметрах отверстий. Расход воздуха рассчитывался по уравнению (1), с использованием измеренных перепадов давления у СИЗОД и эмпирических коэффициентов рассчитанных Хигсом [9] $a = 0,65$; $b = 2,7$. Отметим, что величина просачиваний сквозь неплотности зависит от сопротивления фильтра. Например, при отверстиях 1 мм у СИЗОД с фильтрами третьего класса относительный расход воздуха составил 12 %, тогда как у этого ж респиратора, но с фильтрами второго класса – 4 %. Естественно, в первом коэффициент подсоса будет больше, что приведет к ухудшению коэффициента защиты (Рис. 9).

Таблица 2

Коэффициент проникания тест-аэрозоля хлорид натрия через фильтры к респиратору РПА

Тип филь-тра	Расход воздуха через фильтры, л/мин				
	10	30	50	70	100
ФРПА Р2	0,015	0,053	0,09	0,24	0,63
ФП-110 – 50 (Р3)	0,0001	0,0012	0,0035	0,015	0,05

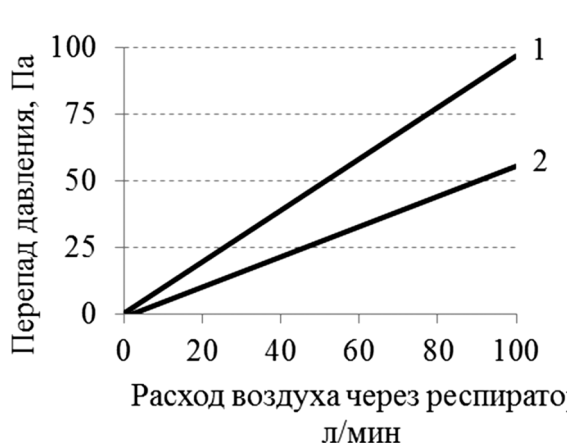


Рис. 7. Зависимость перепада давления на респираторе РПА с фильтрами третьего ФП-110 – 50(1) и второго класса ФРПА Р2 (2) от расхода воздуха

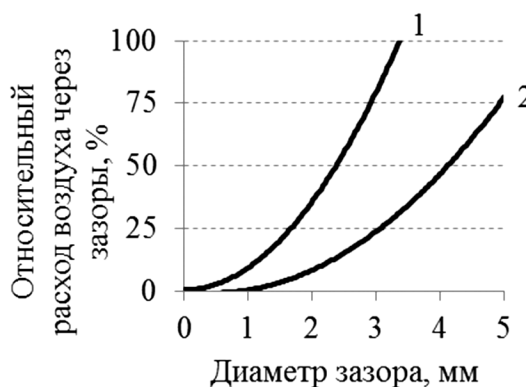


Рис. 8. Зависимость подсоса воздуха на респираторе РПА с фильтрами третьего ФП-110 – 50(1) и второго класса ФРПА Р2 (2) через отверстия по полосе обтюрации при общем расходе воздуха 30 л/мин

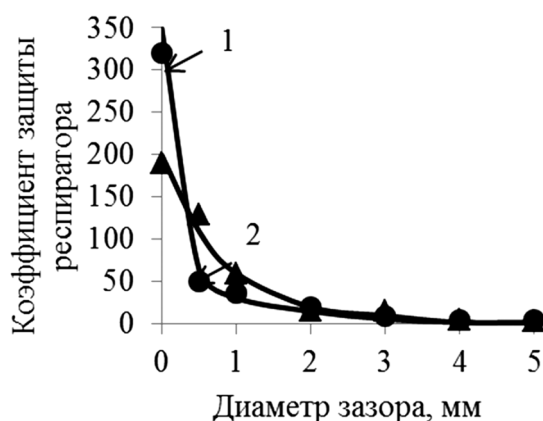


Рис. 9. Зависимость коэффициента защиты респиратора РПА с фильтрами третьего ФП-110 – 50(1) и второго класса ФРПА Р2 (2) от величины зазора при общем расходе воздуха 30 л/мин

Теоретически вычисленные значения коэффициента защиты СИЗОД по формуле (5) как функция от размеров зазоров при расходе 30 л/мин хорошо согласуются с эксперименталь-

ными показателями, полученными в соответствии с требованиями ДСТУ EN 140-2004. Результаты измерений нанесены на Рис. 9 в виде точек.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- экспериментальные и теоретические результаты хорошо согласуются друг с другом, погрешность составляет не более 15 %;

- при зазорах, больше 2 мм защитная эффективность обоих респираторов одинаковая и не зависит от качества фильтров, при этом отметим, что у СИЗОД с высокоэффективным фильтром коэффициент проникания уже при отверстии 1 мм хуже чем с фильтром второго класса;

- с увеличением размера отверстий через них проходит гораздо больше загрязнений, чем через фильтры, что очень сильно ухудшает защитную эффективность респиратора при этом качество фильтров не имеет значения.

Выводы.

1. Получена теоретическая зависимость между коэффициентом защиты и расходом воздуха сквозь зазоры у полумасок. Также она учитывает проникание аэрозоля через фильтр и величину перепада давления на респираторе.

2. Измерение защитной эффективности респиратора РПА с фильтрами второго и третьего класса защиты показало, что проникание частиц зависит от расхода воздуха и сопротивления фильтров, размера зазора.

3. Результаты исследования показали, что коэффициент защиты респиратора РПА с высокоэффективными фильтрами даже с отверстием 1 мм хуже чем с фильтрами второго класса защиты. Также экспериментально подтверждено, что при достаточно больших отверстиях защитная эффективность респиратора не зависит от качества фильтра.

4. Коэффициент защиты можно рассчитать при известном проникании аэрозоля через фильтры и размеры отверстия.

Список литературы

1. Романченко С.Б. Технично-технологические проблемы промышленного внедрения систем обеспыливания шахтной атмосферы / С.Б. Романченко, В.Н. Костеренко, Д.О. Макеева, А.В. Дремов // *Аэрология: Сб. научн. тр. по мат. симпозиума «Неделя горняка-2009»*. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) - 2009. - № 13. - С. 176-188.

2. Солодінов А.І. Захворюваність на пневмоконіоз гірників вугільних шахт у донецькій області. // *Вестник гигиены и эпидемиологии. ДонДМУ*, 2006. – №1. – Т.10. – С. 37 – 40.

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

4. Liu B. Y. H. Respirator Leak Detection by Ultrafine Aerosols: A Predictive Model and Experimental Study. / B. Y. H. Liu, J. Lee, H. Mullins, S.G. Danisch // *Aerosol Science and Technology*. – 1993. – № 19(1). – P. 15 – 26.

5. Han D. Simplified Pressure Method for Respirator Fit Testing. / D. Han, M. Xu, S. Foo, W. Pilacinski, K. Willeke // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1991. – № 52(8). – P. 305 – 308.

6. Чеберячко Ю.І. Обґрунтування заходів щодо зменшення пилового навантаження працівників гірничих підприємств при використанні протипилових респіраторів: автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.26.01 / Ю.І. Чеберячко ; Нац. гірн. ун-т. – Д., – 2009. – 19 с.

7. Barret L.W. Aerosol Loading Performance of Electret Filter Media. / L.W. Barret, Al.D. Rousseau // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1998. – № 59(8). – P. 532 – 539.

8. Oestenstad R.K. Distribution of Faceseal Leak Sites on a Half-Mask Respirator and Their Association with Facial Dimensions. / R.K. Oestenstad, H. Kenneth, D.L Perkins, L.L. Perkins // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1990. – № 51(5). – P. 285 – 290.

9. Hinds W. C. Performance of dust respirators with facial seal leaks experimental. // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1987. – № 48(10). – p. 836-841.

10. Средства индивидуальной защиты органов дыхания: Справ. рук-во / П.И. Басманов, С.Л. Каминский, А.В. Коробейников, М.Е. Трубицына. – С.Пб.: ГИПП «ИскусствоРоссии», – 2002. – 399 с.