

Опрацьована гіпотеза можливості підвищення захисних властивостей фільтрувальних респіраторів при зниженні опору їх фільтрів (без зміни величини коефіцієнта проникнення). Доказано, що зменшення опору фільтрів респіраторів, призводить до підвищення їх захисної ефективності, зниження енергетичних витрат на виконання важкої роботи, а також до збільшення тривалості використання респіраторів

Ключові слова: фільтрувальний респіратор, опір дихання, працездатність, захисна ефективність, клапан видиху

Проработана гипотеза о возможности повышения защитных свойств фильтрующих респираторов при снижении сопротивления их фильтров (без изменения величины коэффициента проникания). Доказано, что уменьшение сопротивления фильтров респираторов приводит к повышению их защитной эффективности, снижению затрачиваемой энергии на выполнение тяжелой работы, а также к увеличению продолжительности использования респираторов

Ключевые слова: фильтрующий респиратор, сопротивление дыхания, работоспособность, защитная эффективность, клапан выдоха

УДК 614.89

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.41210

ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ РЕСПИРАТОРОВ

В. И. Голинько

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: golinko@nmu.org.ua

С. И. Чеберячко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: sihc@yandex.ru

Ю. И. Чеберячко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: intruder@hotmail.com

Д. И. Радчук

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: riko2509@ukr.net

*Кафедра аэрологии и охраны труда

Государственное высшее учебное заведение

«Национальный горный университет»

пр. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, Украина, 49017

1. Введение

В структуре профессиональных заболеваний первое место принадлежит болезням органов дыхания – до 70 % от общего количества по Украине. Это обусловлено тем, что добыча угля и других полезных ископаемых и их переработка часто приводит к чрезмерному загрязнению воздуха пылью из-за несовершенства технологических процессов и недостатков используемого оборудования, средств коллективной и индивидуальной защиты. К примеру, на угольных шахтах среднесменная запыленность воздуха на рабочих местах составляет 200–600 мг/м³ при норме от 2 до 10 мг/м³ в зависимости от вида пыли. Развитие профессиональных заболеваний пылевой этиологии зависит от концентрации загрязняющих веществ, количества свободного диоксида кремния, а также от внедрения следующих мероприятий, которые связаны с:

- устранением воздушных загрязнений в источнике образования;
- предотвращением или снижением загрязнение воздуха;
- использованием фильтрующих средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД).

Использование технических средств коллективной защиты (вентиляции; местных отсосов, встроенных в комбайн; воздушных душей; дистанционного управления комбайном; и др.) позволяет снизить запыленность в зоне дыхания практически до допустимой величины. В перспективе переход на такие технологии необходим и неизбежен. К сожалению, трудно ожидать, что улучшение условий труда произойдет сразу и повсеместно – так как внедрение новых технологий и эффективных средств коллективной защиты требуют реконструкции оборудования и горных машин. Поэтому в настоящее время единственным средством защиты, благодаря которому можно повысить степень защищенности рабочих является фильтрующий респиратор.

Для уменьшения количества вдыхаемой пыли с помощью средств индивидуальной защиты органов дыхания необходимо обеспечить: высокую очистку вдыхаемого воздуха и надежную изоляцию органов дыхания от окружающей среды [1].

Решение первой задачи связано с производством высокоэффективных фильтров для любых условий эксплуатации. Однако, при больших скоростях фильтрации, которые возникают при тяжелых работах, резко возрастает сопротивление дыханию, что ухуд-

шает самочувствие рабочего и его работоспособность. Сопротивление также повышается из-за накапливания загрязнений на фильтре и приводит к снижению защитного действия респираторов.

Решение второй задачи достаточно сложное. Десятки исследований эффективности респираторов в производственных условиях при непрерывном и одновременном использовании показали, что она определяется просачиванием неотфильтрованного воздуха через зазоры между полумаской и лицом, а не прониканием через фильтры. Статистическая обработка результатов производственных исследований эффективности СИЗОД разных конструкций позволила установить ограничения области допустимого применения респираторов всех типов [2].

Поэтому повышение защитных свойств фильтрующих полумасок за счет снижения сопротивления фильтров является весьма актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Задачу повышения защитной эффективности респираторов можно решить, увеличивая площадь поперечного сечения фильтрующих элементов [3], но это приводит к ухудшению обзора, и изолирующих свойств за счет перераспределения усилий по полосе обтюрации, появления дополнительных зазоров за счет сползания полумаски во время работы из-за увеличения веса и громоздкости фильтрующих коробок. Следующим шагом является повышение изолирующих свойств полумасок путем применения надувных обтюраторов либо с двойной или тройной усиливающей полосой [4]. Однако такие конструкции значительно повышают стоимость респиратора и сложность его обслуживания. Повысить защитные свойства полумасок возможно за счет увеличения их времени использования при снижении нагрузки на человека [5].

Существует предположение, что на степень поступления нефильтрованного воздуха в подмасочное пространство респиратора влияет, прежде всего сопротивление фильтров. Соответствующую закономерность впервые теоретически проанализировал Д. Кампбелл (D. Campbell) [6]. Согласно его выводам, величина сопротивления дыханию непосредственно влияет на защитные свойства респиратора, которые ухудшаются по мере роста перепада давления на нем. Этот теоретический вывод экспериментально подтвердили Т. Нельсон (T. Nelson) и К. Колтон (C. Colton) [7]. Они выявили возрастание просачивания загрязненного воздуха в 4 раза при росте сопротивления с 56 до 196 Па. С другой стороны существуют исследования, которые показывают, что на величину просачивания загрязненного воздуха влияет вид выполняемой работы. С увеличением нагрузки возрастает скорость воздушного потока, что снижает величину коэффициентов захвата аэрозольных частиц, обусловленные механизмами фильтрации [8]. Поэтому возникает задача в изучении комплексного подхода по определению влияния на защитную эффективность фильтрующих респираторов и сопротивления и темпа выполнения работы.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является обоснование возможности улучшения защитных свойств фильтрующих респираторов на основе применения в них фильтров с меньшим сопротивлением дыханию за счет снижения просачивания не фильтрованного воздуха через зазоры полосы обтюрации.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- установить зависимость коэффициента защиты респиратора от величины сопротивления фильтров и величины зазора по полосе обтюрации;
- проанализировать влияние сопротивления дыханию эластомерных полумасок на показатели физиологического состояния работника;
- экспериментально исследовать защитные свойства респиратора с фильтрами разного сопротивления.

4. Материалы и методы исследования влияния сопротивления фильтров на защитную эффективность респираторов и работоспособность человека

Для достижения поставленной цели воспользуемся подходом, который применял М. Клэйтон (M. Clayton) [9] для определения допустимой области применения респиратора (по концентрации загрязнителя), т. е. ожидаемого коэффициента его защиты (ОК_з), при ограниченном количестве испытаний. Суть подхода заключается в сравнении величин относительного сопротивления дыханию анализируемого и подобного ему защитного устройства, коэффициент защиты которого уже известен. Полагалось, что при близких сопротивлениях дыханию просачивание нефильтрованного воздуха через неплотности у таких респираторов тоже будет близким. Тогда, при прочих равных условиях, в частности одинаковых изолирующих свойствах (способности маски респиратора ограждать органы дыхания человека от окружающей загрязненной атмосферы), степень защиты респираторов также будет одинаковой. Такой подход использовался в Британском стандарте BS 4275:1997 – «Рекомендации по внедрению эффективной программы защиты органов дыхания» для получения ожидаемых коэффициентов защиты (APF) респираторов, которые не проходили достаточной проверки. Отсутствующая информация дополнялась данными исследований, проведенными в США, которые базировались на соответствии между европейской и американской классификацией, выполненной по величине сопротивления фильтров [10].

Таким образом, можно предположить, что у фильтрующих респираторов одного класса защиты при снижении сопротивления их фильтров (без изменения величины коэффициента проникания) должен повыситься коэффициент защиты. Чтобы подтвердить это предположение, необходимо сравнить коэффициенты защиты респираторов одного класса, которые имеют разное сопротивление фильтров, но одинаковый коэффициент проникания.

Для сравнения воспользуемся известной зависимостью коэффициента защиты респиратора от величины зазоров, расхода воздуха и других параметров фильтра, предложенной Бенджамином Лю (Liu Benjamin) [11]:

$$K_3 = \frac{Q}{(Q - Q_1)K_{нф} + Q_1K_{н1}} = \left[K_{нф} + \frac{Q_1}{Q}(K_{н1} - K_{нф}) \right]^{-1}, \tag{1}$$

где Q – суммарный расход воздуха через фильтр и зазоры, дм³/мин; Q₁ – расход воздуха через зазор, дм³/мин; K_{нф} – коэффициент проникания аэрозоля через фильтр, %; K_{н1} – коэффициент проникания через зазоры, %.

Это выражение (1) можно упростить, с учетом результатов исследований Л. Баррета и А. Руссо [12], предложивших пренебречь величиной коэффициента проникания аэрозоля через фильтр, поскольку при загрязнении фильтра (пылью) этот коэффициент значительно уменьшается, стремясь к нулю. В таком случае коэффициент защиты станет равным

$$K_3 = \frac{Q}{Q_1K_{н1}}. \tag{2}$$

Подсос воздуха через зазоры по полосе обтюрации можно рассчитать по формуле, предложенной Д. Кэмпбеллом (D. Campbell) [6].

$$Q_1 = K(\Delta P)^a d_0^b, \tag{3}$$

где K, a и b – константы, (K=0,05 – 0,1, a=0,56–0,92, и b=0,5–1); ΔP – перепад давления на фильтре респиратора, Па; d₀ – диаметр отверстия, эквивалентного зазору, мм.

Как видим, при определении подсоса воздуха через зазоры респиратора важно определить величину зазора по полосе его обтюрации. Недавно проведенные исследования показали, что диаметр отверстия, эквивалентный зазору между полумаской респиратора и лицом, находится в диапазоне от 0,7 до 1,3 мм [13]. Допустимый размер зазора и другие недостающие параметры для расчета подсоса воздуха через зазоры по полосе обтюрации можно оценить, обобщая данные разных нормативных документов. В частности, согласно EN 140, коэффициент подсоса по полосе обтюрации для эластомерных полумасок в среднем не должен превышать 2%. В соответствии с EN 143, для фильтров класса P2 сопротивление дыханию должно составлять не более 240 Па при скорости фильтрации 95 дм³/мин, а коэффициент проникания – не более 6%. В EN 529 указана область применения респираторов многообразового использования второго класса, которая составляет 12 ПДК загрязнителя.

Учитывая приведенные нормативные показатели, после преобразования формулы (1), выразим количество воздуха, проходящего через зазоры полосы обтюрации как

$$Q_1 = \frac{QK_3}{(K_{н1} - K_{нф})(K_{н1}K_{нф} - 1)}. \tag{4}$$

Величину диаметра отверстия, эквивалентного зазору, получим из формулы (3) при известном сопротивлении фильтра и заданном расходе воздуха:

$$d_0 = \sqrt[b]{\frac{Q_1}{K(\Delta P)^a}}. \tag{5}$$

Следующим важным критерием для эффективной защиты органов дыхания является время использования респираторов в течении смены. Так, согласно публикациям, одной из главных причин уменьшения времени ношения респираторов является физический дискомфорт, вызванный повышенным сопротивлением дыханию, особенно при выполнении тяжелой работы. Поэтому, оценка влияния респиратора на физиологическое состояние человека, а, значит, его работоспособность, является необходимым условием для определения области их применения по уровню загрязнения воздуха. Соответствующие эмпирические зависимости получил Д. Каретти (D. Caretti) [14] при испытаниях респираторов на людях, нагружаемых на беговой дорожке. Эти зависимости позволили оценить снижение работоспособности при использовании фильтрующих эластомерных полумасок (табл. 1).

Таблица 1

Зависимости показателей физиологического состояния работника от сопротивления дыханию эластомерных полумасок [9]

Показатели физиологического состояния работника	Эмпирические зависимости в виде линейных уравнений
Продолжительность работы, мин	Y=10–0.57·X
Оценка работоспособности (%)	Y=100–5.08·X
Изменение минутного расхода воздуха V _е , дм ³ /мин	Y=78.97–1.96·X
X – сопротивление (смН ₂ О/дм ³ ·сек)	

Для количественной оценки влияния респиратора на выполнение производственных заданий, экспериментальные данные нормировались в пределах от 0 до 100%. Максимальный показатель соответствовал отсутствию снижения работоспособности, а минимальный – полной неработоспособности. Например, если наличие респиратора ухудшит работоспособность на 25%, то работоспособность работника составит 75% от величины, полученной при выполнении работы без респиратора. Иначе говоря, рабочий в респираторе сделает работу за 4 часа, а без респиратора – за 3, либо при одинаковых затратах времени – без респиратора потребуется 3 рабочих, а в респираторе – 4.

5. Результаты исследований характеристик фильтрующих респираторов

Авторами статьи выполнены расчеты коэффициента защиты двух выпускаемых типов респираторов с разными сопротивлениями фильтров. При этом оценивалось снижение работоспособности при работе в таких респираторах, и определялись другие показатели, которые представлены в табл. 2.

Согласно проведенным расчетам, длительность выполнения задания испытуемыми, которые бежали по беговой дорожке в респираторах (с перепадом давления 240 Па) со скоростью 15 км/ч до тех пор, пока не устанут, должна составить 6–6.5 минут. Затрачиваемая при этом мощность составила 440 Вт, что соответствует выполнению тяжелой работы. Ухудшение работоспособности в этом случае составило 22%. При

использовании фильтров с меньшим сопротивлением (с перепадом давления 90 Па) потеря работоспособности составила 12 %.

Таблица 2

Характеристики фильтрующих респираторов с фильтрами разного сопротивления дыханию

Показатели фильтрующих респиратора	Значения показателей для двух респираторов с эластомерной полумаской второго класса при расходе воздуха 95 дм ³ /мин* с сопротивлением фильтров:	
	240 Па (согласно EN 143)	90 Па (фильтрующий элемент ФРПА**)
Коэффициент проникания фильтров, $K_{пф}$, %	не более 6	
Коэффициент подсоса по полосе обтюрации, $K_{п1}$, %	не более 2	
Суммарный расход воздуха через зазоры полосы обтюрации, Q_1 , дм ³ /мин	4,16	2,12
Эквивалентный диаметр зазора, d_0 , мм	1,3	
Коэффициент защиты, K_3	11,5	22,3
Снижение работоспособности, %	22	12
Время выполнения задания, мин	6,5	8

Примечания: * – в среднем перепад давления, создаваемый фильтрами класса P2 (различных производителей) воздушному потоку с расходом 95 дм³/мин, находится пределах от 150 до 170 Па; ** – фильтрующие элементы ФРПА класса P2 производства ООО НПП «Стандарт» (г. Днепропетровск) по ТУ У 32.9-25533002-003:2013, результаты испытания которых подтверждены протоколом № ЕС/С/1997/2012, выданным Центральным институтом охраны труда (г. Лодзь, Польша)

6. Обсуждение результатов исследования влияния сопротивления фильтров на защитные свойства фильтрующих респираторов

Таким образом, снижение сопротивления дыханию фильтров, при одинаковых прочих параметрах, увеличивает коэффициент защиты респиратора почти в два раза и замедляет накопление респираторной усталости.

Похожие результаты получил Д. Кэмпбелла (D. Campbell) [6], который сравнивал коэффициенты защиты полумасок с фильтрами малой эффективности и низким сопротивлением с фильтрами повышен-

ной эффективности, но высоким сопротивлением. Выяснилось, что в первом случае показатели были лучше. Так, фильтр с коэффициентом проникания 0.001 и сопротивлением, оцениваемым перепадом давления в 25 Па и фильтр с прониканием 0.05 и сопротивлением 10 Па обеспечивают коэффициент защиты респиратора 70 и 106, соответственно. Характерно, что у фильтров второго класса, по сравнению с фильтрами третьего класса, – больше проникание, но меньше сопротивление, что позволяет уменьшить подсос не фильтрованного воздуха через зазоры полосы обтюрации и тем самым уменьшить разницу в классах защиты.

Конечно, для более достоверного подтверждения полученного результата необходимо проведение масштабных производственных испытаний фильтрующих респираторов. Однако анализ опубликованных результатов уже проведенных производственных испытаний таких респираторов показал отсутствие существенной разницы в показателях защитной эффективности между вторым и третьем классом СИЗОД [15]. Авторы объясняют это прониканием вредных веществ по полосе обтюрации. Поэтому высококачественные фильтры из-за высокого сопротивления могут ухудшить коэффициент защиты респиратора. Кроме того, надо учитывать, что величина зазоров непостоянна во времени. Она может увеличиваться при смещениях полумаски, поворотах головы или наклонах туловища, что тоже приведет к снижению степени защиты респиратора.

7. Выводы

Проведенные исследования позволили установить зависимость между коэффициентом защиты респиратора величиной сопротивления фильтров и размеров зазора по полосе обтюрации. Результаты эксперимента показывают, что уменьшение сопротивления фильтров противопылевых респираторов в три раза, при прочих равных условиях, приводит к повышению их защитной эффективности почти в два раза.

Выявлена взаимосвязь между уменьшением перепада давления на фильтрах и увеличением работоспособности человека. Показано, что снижение сопротивления фильтров с 240 до 90 Па позволит работающему персоналу в респираторах, снизить энергию, затрачиваемую на выполнение тяжелой работы почти два раза, и тем самым сократить время ее выполнения.

Доказано, что использование респиратора с фильтрами второго класса защиты более низкого сопротивления дыханию увеличит время его использования и повысит область их применения с 12 до 20 ПДК.

Литература

1. Warren, R. M. Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators: Developing Probability Estimates to Evaluate the Adequacy of an APF of 10 [Text] / R. M. Warren, Z. Zhuang // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1998. – Vol. 59, Issue 11. – P. 796–801. doi: 10.1080/15428119891010983
2. Кириллов, В. Ф. О средствах индивидуальной защиты органов дыхания работающих [Текст] / В. Ф. Кириллов, А. А. Бунчев, А. В. Чиркин // ФГБУ "НИИ Медицины труда" Российской академии медицинских наук Медицина труда и промышленная экология. – 2013. – № 4. – С. 25–31.

3. Myers, W. R. Field Performance Measurements of Half-Facepiece Respirators—Foundry Operations [Text] / W. R. Myers, Z. Zhuang, T. Nelson // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1996. – Vol. 57, Issue 2. – P. 166–174. doi: 10.1202/0002-8894(1996)057<0166:fpmohr>2.0.co;2
4. Cohen, H. J. Determining and validating the adequacy of airpurifying respirators used in industry Part I – Evaluating the Performance of a Disposable Respirator for Protection Against Mercury Vapor [Text] / H. J. Cohen // International Society for Respiratory Protection Journal of the International Society for Respiratory Protection. – 1984. – Vol. 2, Issue 3. – P. 296–304
5. Galvin, K. Variability in protection afforded by half-mask respirators against styrene exposure in the field [Text] / K. Galvin, S. Selvin, R. C. Spear // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1990. – Vol. 51, Issue 12. – P. 625–639. doi: 10.1080/15298669091370266
6. Zhuang, Z. Head-and-Face anthropometric survey of U.S. respirator users [Text] / Z. Zhuang, B. Bradtmiller // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. – 2005. – Vol. 2, Issue 11. – P. 567–576. doi: 10.1080/15459620500324727
7. Campbell, D. L. The theoretical effect of filter resistance and filter penetration on respirator protection factors [Text] / D. L. Campbell. – J. Int. Soc. Respir. Prot. 2, 1984. – P. 198–04.
8. Nelson, T. J. The effect of inhalation resistance on facepiece leakage [Text] / T. J. Nelson, C. E. Colton // AIHAJ. – 2000. – Vol. 61, Issue 1. – P. 102–105. doi: 10.1202/0002-8894(2000)061<0102:teiro>2.0.co;2
9. Clayton, M. P. Review of Assigned Protection Factors of Various Types and Classes of Respiratory Protective Equipment with Reference their Measured Breathing Resistances [Text] / M. P. Clayton, B. Bancroft, B. A. Rajan // The Annals of Occupational Hygiene. – 2002. – Vol. 46, Issue 6. – P. 537–547. doi: 10.1093/annhyg/mef071
10. Nicas, M. Variability in respiratory protection and the assigned protection factor [Text] / M. Nicas, J. Neuhaus // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. – 2004. – Vol. 1, Issue 2. – P. 99–109. doi: 10.1080/15459620490275821
11. British Standards Institution. BS 4275: Guide to implementing an effective respiratory protective device program [Text] / London: British Standards Institution, 1997.
12. Benjamin, Y. Haskelle Mullins & Susan G. Danisch. Respirator Leak Detection by Ultrafine Aerosols [Text] / Y. Benjamin, H. Liu, J.-K. Lee // A Predictive Model and Experimental Study Aerosol Science and Technology. – 1993. – Vol. 19, Issue 1. – P. 15–26.
13. Oestenstad, R. K. Distribution of facesal leak sites in a half-mask respirator and their association with facial dimensions [Text] / R. K. Oestenstad, H. K. Dillion, L. L. Perkins // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1990. – Vol. 51, Issue 5. – P. 285–290. doi: 10.1080/15298669091369664
14. Krishnan, U. Development of dichotomous flow quantitative fit test for half-mask and full-facepiece respirators [Text] / U. Krishnan, K. Willeke, A. Juozaitis, M. Lehtimäki, K. Szewczyk // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1994. – Vol. 55, Issue 3. – P. 223–229. doi: 10.1080/15428119491019069
15. Caretti, D. M. Exercise performance during inspiratory resistance breathing under exhaustive constant load work [Text] / D. M. Caretti, J. A. Whitley // Ergonomics. – 1998. – Vol. 41, Issue 4. – P. 501–511. doi: 10.1080/001401398186973
16. Nelson, T. J. Development of an improved qualitative fit test using isoamyl acetate [Text] / T. J. Nelson, O. T. Skretvedt, J. G. Loschiavo, S. W. Dixon // J. Int. Soc. Respir. Prot. – 1984. – Vol. 2, Issue 4. – P. 225–228.