

А.Ю. Бушманов, В.П. Зиновьев, О.А. Лебедева, В.В. Гудкова, А.Г. Сеитова,
И.О. Усачев, Е.Г. Зарипова, Т.П. Кузнецова, А.О. Лебедев, М.Р. Попченко

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ФПП И МЕЛЬТБЛАУН ПО ТЕСТ-АЭРОЗОЛЮ NaCl

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Виктор Павлович Зиновьев, e-mail: zvp.2013@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Актуальность: Одними из важнейших защитных характеристик средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) являются проницаемость противоаэрозольного фильтра (ПАФ) и коэффициент подсоса и проницаемости СИЗОД. Для определения этих характеристик проводят испытания ПАФ и СИЗОД по тест-аэрозолям, получаемым обычно путём пневматического распыления жидкости или путём конденсации пересыщенного пара малолетучего вещества, например минерального масла. Эти аэрозоли являются полидисперсными, то есть обладают довольно широкими спектрами размеров частиц.

В настоящее время наиболее распространённым методом оценки защитных свойств материалов для СИЗОД и непосредственно изделий из них является измерение концентрации тест-аэрозоля до образца фильтрующего материала и после него при прохождении тест-аэрозоля через исследуемый образец. При использовании такого метода наибольшее распространение получило использование тест-аэрозолей на основе минерального масла (масляный туман) или микрокристаллов поваренной соли (NaCl), получаемых при испарении капель тумана её раствора. Наиболее вредными и трудновыводимыми из организма являются наиболее мелкие частицы с размерами менее 0,3 мкм (далее малые размеры).

Поскольку массовая доля крупных частиц в тест-аэрозоле существенно больше массовой доли мелких, то даже коэффициент защиты, равный 99,9, чрезвычайно близкий к 100 %, не в полной мере информативен, так как не отражает защитные свойства материала в области малых размеров частиц.

Цель: Исследование защитных свойств материалов для СИЗОД в диапазоне малых размеров аэрозольных частиц как наиболее вредных, а также сравнение результатов испытаний по этому показателю разных материалов, используемых в производстве СИЗОД.

Материал и методы: Проведены испытания фильтрующих материалов ФПП-15-1,5 и Мельтблаун с определением коэффициентов защиты и проникания в соответствии с ГОСТ 12.4.119-82.

Результаты и обсуждение: Результаты проведённых исследований показали принципиальную возможность определения коэффициента защиты материала в различных размерных классах аэрозольных частиц. Оценка защитных свойств материалов с использованием спектральной плотности частиц по их размерам позволит выявить материалы с наиболее высокими защитными свойствами и более низкими для облегчения выбора средств индивидуальной защиты органов дыхания предприятиями с вредными условиями труда.

Выводы: Результаты проведённых исследований показали практическую ценность применения метода оценки проницаемости аэрозольных частиц по их размерному спектру, так как он позволяет научно обосновать выбор материалов с наиболее высокими защитными свойствами по аэрозольной проницаемости.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты, аэрозольные частицы, аэрозольная проницаемость, коэффициент защиты, размерный спектр

Для цитирования: Бушманов А.Ю., Зиновьев В.П., Лебедева О.А., Гудкова В.В., Сеитова А.Г., Усачев И.О., Зарипова Е.Г., Кузнецова Т.П., Лебедев А.О., Попченко М.Р. Сравнительные испытания аэрозольной проницаемости материалов ФПП и Мельтблаун по тест-аэрозолю NaCl // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 6. С. 136–142. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-136-142

A.Yu. Bushmanov, V.P. Zinoviev, O.A. Lebedeva, V.V. Gudkova, A.G. Seitova,
I.O. Usachev, E.G. Zaripova, T.P. Kuznetsova, A.O. Lebedev, M.R. Popchenko

Comparative Tests of Aerosol Permeability of FPP and Meltblown Materials Using NaCl Test Aerosol

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: V.P. Zinoviev, e-mail: zvp.2013@yandex.ru

ABSTRACT

Relevance: One of the most important protective characteristics of personal respiratory protection equipment (PPE) is the permeability of the anti-aerosol filter (PAF) and the coefficient of suction and permeability of the PPE. To determine these characteristics, PAF and SIЗОD tests are carried out using test aerosols, usually obtained by pneumatic spraying of a liquid or by condensation of supersaturated vapor of a volatile substance, such as mineral oil. These aerosols are polydisperse, that is, they have a fairly wide range of particle sizes. Currently, the most common method for assessing the protective properties of materials for SIЗОD and products made from them is to measure the concentration of the test aerosol before and after the sample of the filter material when the test aerosol passes through the test sample. When using this method, the most widespread is the use of test aerosols based on mineral oil (oil mist) or microcrystals of table salt (NaCl) obtained by evaporation of mist droplets of its solution. It is known that the smallest particles with sizes less than 0.3 microns are the most harmful and difficult to remove from the body. Since the mass fraction of large particles in the test aerosol is significantly higher than the

mass of small ones, even the protection coefficient of 99.9, which is extremely close to unity, is not fully informative, since it does not reflect the protective properties of the material in the field of small particle sizes.

Purpose: The study of the protective properties of materials for SIZOD in the range of small sizes of aerosol particles as the most harmful, as well as the comparison of test results for this indicator of different materials used in the production of SIZOD, is an urgent task, which to a certain extent is being solved in the current study.

Material and methods: Filter materials FPP-15-1,5 and Meltblown were tested to determine protection and penetration factors in accordance with GOST 12.4.119-82.

Results and discussion: The results of the conducted studies have shown the fundamental possibility of determining the material protection coefficient in various size classes of aerosol particles. Evaluation of the protective properties of materials using the spectral density of particles by their size will allow us to identify materials with the highest protective properties and with the lowest to facilitate the selection of personal respiratory protection equipment by enterprises with harmful production conditions.

Conclusions: The results of the conducted research have shown the practical value of using the method of assessing the permeability of aerosol particles based on their size spectrum, as they allowed us to scientifically select materials with the highest protective properties in terms of aerosol permeability.

Keywords: *personal protective equipment, aerosol particles, aerosol permeability, protection coefficient, size spectrum*

For citation: Bushmanov AYu, Zinoviev VP, Lebedeva OA, Gudkova VV, Seitova AG, Usachev IO, Zaripova EG, Kuznetsova TP, Lebedev AO, Popchenko MR. Comparative Tests of Aerosol Permeability of FPP and Meltblown Materials Using NaCl Test Aerosol. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(6):136–142. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-136-142

Введение

Как показано ранее [1–4], если крупные аэрозольные частицы размером более 1 мкм осаждаются на горизонтальных поверхностях под действием силы тяжести, а частицы менее 0,02 мкм удаляются из воздуха благодаря диффузии, последующей коагуляции и осаждению на любых поверхностях, то частицы промежуточных размеров от 0,02 до 0,2 мкм остаются в воздухе наиболее долго. Эти частицы и представляют наибольшую опасность, так как могут долго витать в воздухе, в твёрдом виде подвергаться сдвигу с поверхностей и являются наиболее проникающими через большинство фильтрующих материалов и систем.

Таким образом, задача по определению защитных свойств респираторов, а также материалов для их производства, в области малых размеров аэрозольных частиц становится чрезвычайно актуальной для решения вопроса о выборе и приобретении наилучших изделий СИЗОД.

В настоящий момент на рынке средств индивидуальной защиты представлено множество различных респираторов с использованием фильтрующих материалов с самыми разными свойствами, определяемыми как видами составляющих их волокон, так и структурными особенностями. Соответственно, сделать правильный выбор, остановившись на вполне конкретном материале или изделии – задача не столько экономическая, сколько медицинская, поскольку защитная эффективность СИЗОД напрямую связана с сохранением здоровья персонала опасных производств, которые присутствуют, в том числе, и на предприятиях ГК «Росатом» [3, 4].

Многолетний опыт применения респираторов ШБ-1 «Лепесток-200», в котором применяется фильтрующий материал ФПП с классом защиты FFP3, изготовленный на базе синтетических волокон, полученных способом электроформования, показывает, что в настоящее время нет другого способа получения экстраординарных волокон, обеспечивающих такую высокую защитную эффективность [2, 3].

Поэтому назрела необходимость сравнить между собой два фильтрующих материала, состоящих из волокон, полученных методом электроформования, широко применяющихся в производстве СИЗОД, и зарекомендовавших себя с наилучшей стороны. Причём сравнение должно быть проведено по защитным свойствам материала с применением метода оценки коэффициента защиты [1] по каждому размерному классу из размерного спектра частиц.

Материал и методы

Образцы фильтрующих материалов, подвергнутые испытаниям, – материал ФПП производства компании «Зеленский групп» и материал Мельтблаун производства КНР. Основные паспортные характеристики этих материалов содержатся в табл. 1.

Таблица 1

Основные паспортные характеристики материалов ФПП и Мельтблаун
Main passport characteristics of FPP and Meltblown materials

Свойства материалов	ФПП-15-1,5 «Зеленский групп»	Мельтблаун фирмы JOFO, КНР
Номинальная поверхностная плотность, г/м ²	30	60
Сопrotивление, мм вод. ст	1,1–1,7	≤ 13
Проницаемость, %	0,01	< 0,05
Тест-аэрозоль	(масляный туман)	(доломитовая мука)

Испытания проводились с использованием испытательной установки, схема которой приведена на рис. 1, в соответствии с методикой испытаний проницаемости аэрозольных частиц по ГОСТ 12.4.028-76, а также принятой в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в качестве СТО с использованием тест-аэрозоля NaCl [2, 5].

Методика испытаний

По согласованию с заинтересованными сторонами – ООО «Респираторный комплекс» и ООО «Атом-СИЗ» – испытания аэрозольной проницаемости по твёрдым аэрозолям (NaCl) пакетов материалов, применяемых для производства респираторов типа «Лепесток-200» («ФПП-15-1,5») и «Алина» («МЕЛТБЛАУН»), проводились по методике, описанной в ГОСТ 12.4.028-76 [2]. В качестве тест-аэрозоля использовался аэрозоль после ультразвукового генератора аэрозольных частиц – «ВУЛКАН-1» с 2 % рабочим раствором NaCl.

Условия проведения испытаний

Испытания проведены при температуре воздуха в помещении 25 °С, относительной влажности 60 %.

Начальное сопротивление воздушному потоку измерялось при установлении расхода воздушного потока 30 дм³/мин.

Коэффициент проникания аэрозолей – с применением в качестве аэрозоля частиц NaCl со средним диаметром 0,28–0,34 мкм и 0,6–0,8 мкм (табл. 2 ГОСТ 12.4.028–76).

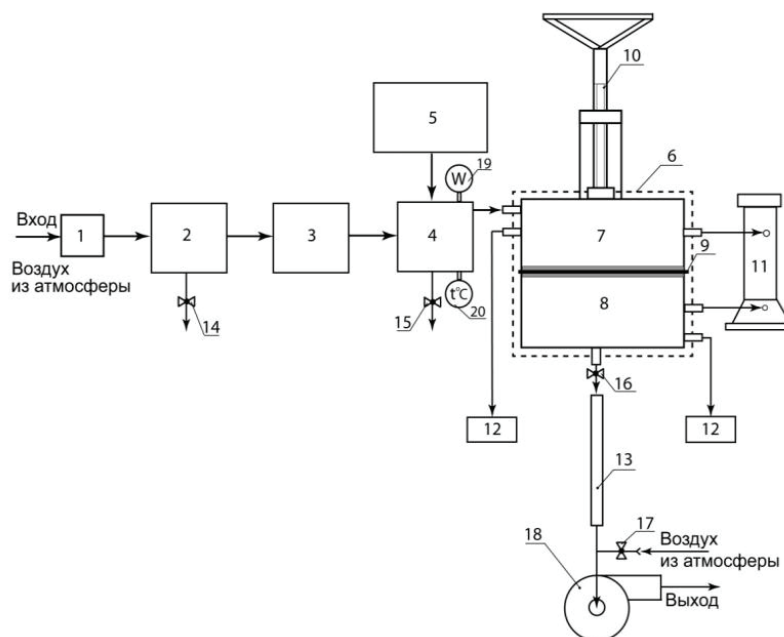


Рис. 1. – Схема установки для испытания проникания твёрдого высокодисперсного аэрозоля через материал респиратора или спецодежды
 1 – Фильтр входящего потока воздуха; 2 – Осушитель; 3 – Нагреватель; 4 – Камера подготовки аэрозоля; 5 – Генератор частиц аэрозоля (NaCl); 6 – Испытательная камера; 7 – Верхний отсек испытательной камеры (для входящего потока воздуха); 8 – Нижний отсек испытательной камеры (для проникающего потока воздуха); 9 – Испытываемый образец; 10 – Винт зажимной; 11 – Микроманометр компенсационный МКВ-250, класс 0,002; 12 – Счётчики частиц; 13 – Ротаметр; 14 – Вентиль сброса конденсата; 15 – Вентиль сброса воздушной смеси с аэрозолем; 16 – Вентиль точной настройки разрежения между верхней и нижней камерами; 17 – Вентиль грубой настройки разрежения между верхней и нижней камерами; 18 – Воздушный центробежный насос (пылесос); 19 – Прибор для измерения влажности; 20 – Термометр

Fig. 1. – Schematic diagram of the setup for testing the penetration of a solid fine aerosol through a respirator or special clothing material
 1 – Incoming air flow filter; 2 – Dehumidifier; 3 – Heater; 4 – Aerosol preparation chamber; 5 – Aerosol particle generator (NaCl); 6 – Test chamber; 7 – Upper compartment of the test chamber (for the incoming air flow); 8 – Lower compartment of the test chamber (for the penetrating air flow); 9 – Test sample; 10 – Clamping screw; 11 – MKV-250 compensating micromanometer, class 0.002; 12 – Particle counters; 13 – Rotameter; 14 – Condensate drain valve; 15 – Air mixture with aerosol drain valve; 16 – Valve for fine adjustment of the vacuum between the upper and lower chambers; 17 – Coarse adjustment valve for vacuum between the upper and lower chambers; 18 – Air centrifugal pump (vacuum cleaner); 19 – Humidity measuring device; 20 – Thermometer

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний по показателям поверхностной плотности фильтрующих материалов и проницаемости по каждому образцу материалов приведены в табл. 2–5.

Таблица 2

Поверхностная плотность образцов фильтрующих материалов «Мельтблаун» и «ФПП-15»
Surface density of samples of filter materials Meltblown and FPP-15

«Мельтблаун»		«ФПП-15»	
№ образца	Поверхностная плотность, г/м ²	№ образца	Поверхностная плотность, г/м ²
1	62,4	1	30,4
2	61,9	2	30,1
3	61,8	3	29,9
4	62,1	4	30,2
5	61,8	5	29,8
6	61,7	6	30,1
Среднее значение	61,95/61,67 ÷ 62,22	Среднее значение	30,08/29,86 ÷ 30,31

Примечание. Во всех приведённых в отчёте таблицах в числителе приводится среднее значение исследуемого показателя, в знаменателе – его доверительный интервал для распределения Стьюдента при доверительной вероятности 95 %

Пример регистрации проведённого испытания с использованием счётчика аэрозольных частиц Lighthouse Solair 3100+ представлен на рис. 2.

Одновременно с испытаниями по ГОСТ 12.4.028-76, результаты которых отражены в табл. 2–5, рассчитывались и показатели защитных характеристик по каждому размер-

Таблица 3

Начальное сопротивление воздушному потоку 30 дм³/мин для фильтрующих материалов респираторов на основе «Мельтблаун» и «ФПП-15»
Initial air flow resistance 30 dm³/min for respirator filter material packages based on Meltblown and FPP-15

«Мельтблаун»		«ФПП-15»	
№ образца	Начальное сопротивление, Па (мм вод. ст.)	№ образца	Начальное сопротивление, Па (мм вод. ст.)
1	21,56 (2,2)	1	21,56 (2,2)
2	20,58 (2,1)	2	21,56 (2,2)
3	24,50 (2,5)	3	20,58 (2,1)
4	22,54 (2,3)	4	23,52 (2,4)
5	21,56 (2,2)	5	22,54 (2,3)
6	21,56 (2,2)	6	20,58 (2,1)
Среднее значение	22,05/20,48 ÷ 23,62	Среднее значение	21,72/20,25 ÷ 23,19

ному классу. Пример расчёта по счётным и по массовым характеристикам приведён на рис. 3 (стр. 1–4). Пересчёт из счётной концентрации в массовую осуществлялся из допущения о том, что кристаллы NaCl имеют не кубическую форму, а сферическую. С точки зрения наших целей определения защитных свойств материалов, не имеет значения вид принимаемой в расчёте модели, описывающей форму частиц: сферической или кубической. Поскольку и проницаемость и защитные свойства рассчитываются как отношения концентраций, то коэффициенты, определяющие форму частиц, сокращаются.

Данные по изменению размерного спектра аэрозольных частиц до и после фильтрации на примере фильтрующего материала «Мельтблаун» представлены в табл. 6.

Таблица 4

Коэффициент проникания аэрозолей при скорости фильтрации 30 дм³/мин для счётной концентрации аэрозольных частиц. Образцы с фильтрующим материалом «ФПП-15-1,5» для респиратора-полумаски ШБ-1 «Лепесток-200»

Aerosol penetration coefficient at a filtration rate of 30 dm³/min for a countable concentration of aerosol particles. Samples with the FPP-15-1.5 filter material for the ShB-1 Lepystok-200 half-mask respirator

№ образца	Концентрация частиц, част./м ³		Коэффициент проникания, % $K = (C_{\text{после}}/C_{\text{до}}) \cdot 100$	Концентрация частиц, част./м ³		Коэффициент проникания, % $K = (C_{\text{после}}/C_{\text{до}}) \cdot 100$
	До респиратора, C _{до}	После респиратора, C _{после}		До респиратора, C _{до}	После респиратора, C _{после}	
	Средний диаметр частиц 0,28–0,34 мкм			Средний диаметр частиц 0,6–0,8 мкм		
1	220891	1218	0,55	153020	191	0,12
2	279690	646	0,23	25720	55	0,21
3	110508	552	0,50	11715	35	0,30
4	754462	4657	0,62	365637	193	0,05
5	845072	4038	0,48	339566	109	0,03
6	1049487	2866	0,27	266608	123	0,05
Среднее значение коэффициента проникания (0,28–0,34 мкм)	0,44/0,28 ÷ 0,6			Среднее значение коэффициента проникания (0,6–0,8 мкм)		0,13/0,013 ÷ 0,24

Таблица 5

Коэффициент проникания аэрозолей при скорости фильтрации 30 дм³/мин для счётной концентрации аэрозольных частиц. Образцы с фильтрующим материалом «Мельтблаун» для респиратора – полумаски «Алина»

Aerosol penetration coefficient at a filtration rate of 30 dm³/min for a countable concentration of aerosol particles. Samples with Meltblown filter material for the respirator – half-mask Alina

№ образца	Концентрация частиц, част./м ³		Коэффициент проникания, % $K = (C_{\text{после}}/C_{\text{до}}) \cdot 100$	Концентрация частиц, част./м ³		Коэффициент проникания, % $K = (C_{\text{после}}/C_{\text{до}}) \cdot 100$
	До образца, C _{до}	После образца, C _{после}		До образца, C _{до}	После образца, C _{после}	
	Средний диаметр частиц 0,28–0,34 мкм			Средний диаметр частиц 0,6–0,8 мкм		
1	371534	481	0,13	50102	65	0,13
2	153492	641	0,42	14191	52	0,37
3	604938	1886	0,31	255158	108	0,04
4	872927	2190	0,25	261139	133	0,05
5	915584	1834	0,20	275577	72	0,03
6	624753	1875	0,30	343958	164	0,05
Среднее значение коэффициента проникания для частиц (0,28–0,34 мкм)	0,27/0,16 ÷ 0,37			Среднее значение коэффициента проникания для частиц (0,6–0,8 мкм)		0,11/0 ÷ 0,25

Графическая иллюстрация данных, содержащихся в табл. 6, представлена на рис. 4, 5. Основной вывод, который следует сделать из проведённого эксперимента – это увеличение массовой доли малых частиц после фильтрации в общей массовой концентрации частиц, проникших через фильтрующий материал, что свидетельствует о существенно большей проникающей способности частиц малых размеров. И хотя их абсолютное значение как в счётном, так и в массовом представлении невелико, тем не менее, в требованиях к фильтрующим материалам следует особое внимание обратить на филь-

Location: LOC001 10/09/2024, 14:58:05 Sample Time: 00:00:40 Flow: Alert Laser: OK Service Required	Location: LOC001 10/09/2024, 15:06:29 Sample Time: 00:00:40 Flow: Alert Laser: OK Service Required
Particle Counts:	Particle Counts:
Size Diff	Size Diff
0.3 754462	0.3 845072
0.5 756071	0.5 783196
0.7 365637	0.7 339566
1.0 722109	1.0 533392
3.0 2806	3.0 1553
5.0 60	5.0 14
10.0 6	10.0 3
25.0 0	25.0 0

ФПП-15

ФПП-15

Location: LOC001 10/09/2024, 15:00:04 Sample Time: 00:00:40 Flow: Alert Laser: OK Service Required	Location: LOC001 10/09/2024, 15:07:52 Sample Time: 00:00:40 Flow: Alert Laser: OK Service Required
Particle Counts:	Particle Counts:
Size Diff	Size Diff
0.3 4657	0.3 4038
0.5 943	0.5 562
0.7 193	0.7 109
1.0 189	1.0 108
3.0 0	3.0 2
5.0 0	5.0 0
10.0 1	10.0 0
25.0 0	25.0 0

Рис. 2. Пример регистрации проведённого испытания с использованием счётчика аэрозольных частиц Lighthouse Solair 3100+
Fig. 2. Example of registration of the test performed using the Lighthouse Solair 3100+ aerosol particle counter

Пример расчёта защитных характеристик фильтрующих материалов для респираторов

ORIGIN = 1 i = 1.. 8 - служебные параметры для нормализации работы приложения MathCAD 15

$\rho = 2.15 \frac{\text{мг}}{\text{мм}^3}$ - объёмная плотность вещества аэрозольных частиц (в данном случае это NaCl)

$\xi = \rho \cdot \frac{\pi}{6 \cdot 10^9} = 1.12574 \times 10^{-9}$ Постоянный коэффициент, определяющий частицу как шар с диаметром, относящимся к i - му интервалу $s = \rho \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot (D_i/2)^3 \cdot 10^{-9}$. Величина D_i присутствует в данной константе лишь в виде единицы размерности, чтобы определить величину этой константы. В дальнейшем, при расчёте, на место D_i подставляется фактическое значение i-го размерного класса в мкм.

Фильтрующий материал "Мельтблаун"

Дифференциальное представление средней счётной концентрации частиц до образца

$$\text{CONS1} := C \cdot \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.5 \\ 0.7 \\ 1.0 \\ 3.0 \\ 5.0 \cdot 3 \\ 10.0 \\ 25.0 \end{pmatrix} \cdot \text{PART1} = \begin{pmatrix} 590538 \\ 466638 \\ 200020 \\ 437607 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Первый вектор - диаметры частиц i - го диапазона в третьей степени (D_i)³ в мкм

В скобках второго вектора - количество зарегистрированных частиц в пересчёте на 1 м³ (счётная концентрация)

Умножение постоянной величины "C" и векторов друг на друга даёт общую массовую концентрацию "mm1" аэрозольных частиц в 1 м³.

$$\text{mm1} := \text{CONS1} \cdot \text{PART1} = 6.53477 \times 10^{-4} \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$$

Для представления распределения массовой концентрации аэрозольных частиц в дифференциальной форме аналогично представленной выше счётной концентрации, необходимо произвести поклассовое умножение соответствующих констант CONS, на количество частиц в классе. Тогда дифференциальное представление массовой концентрации будет выглядеть следующим образом.

Рис. 3 (стр. 1). Пример перерасчёта защитных характеристик фильтрующих материалов респираторов для массовой концентрации по результатам испытаний счётной концентрации частиц
Fig. 3 (p. 1). Example of recalculation of protective characteristics of respirator filter materials for mass concentration based on the results of particle count concentration tests

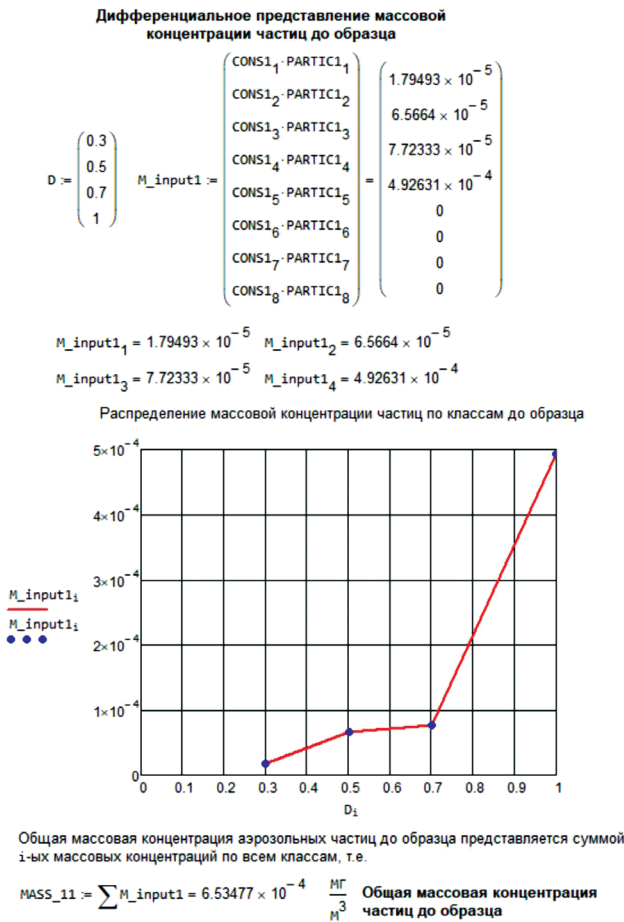


Рис. 3 (стр. 2). Пример перерасчёта защитных характеристик фильтрующих материалов респираторов для массовой концентрации по результатам испытаний счётной концентрации частиц

Fig. 3 (p. 2). Example of recalculation of protective characteristics of respirator filter materials for mass concentration based on the results of particle count concentration tests

Таблица 6
Изменение размерного спектра аэрозольных частиц до и после фильтрации на примере фильтрующего материала «Мельтблаун»
Changes in the size spectrum of aerosol particles before and after filtration using the Meltblown filter material

Размерный класс, мкм	Массовая концентрация частиц до фильтрации, мг/м ³	Массовая концентрация частиц после фильтрации, мг/м ³	Доля массовой концентрации частиц по каждому классу до фильтрации	Доля массовой концентрации по каждому классу после фильтрации
0,3	1,79×10 ⁻⁵	4,5×10 ⁻⁸	0,027	0,171
0,5	6,56×10 ⁻⁵	4,75×10 ⁻⁸	0,100	0,180
0,7	7,23×10 ⁻⁵	4,40×10 ⁻⁸	0,111	0,167
1,0	4,92×10 ⁻⁴	1,27×10 ⁻⁷	0,753	0,481
Общая конц-ия	Σ=6,53×10 ⁻⁴	2,64×10 ⁻⁷	—	—

тующую способность материала к частицам малых размеров из-за их особой вредности.
 Испытания проведены по ГОСТ 12.4.028-76 с применением тест-аэрозоля NaCl и счётчика аэрозольных частиц Lighthouse Solair 3100+.

Доверительные интервалы средних значений испытанных свойств фильтрующих материалов рассчитаны на основе распределения Стьюдента, а не логнормального распределения, обычно используемого для оценки распределения аэрозольных частиц, так как объём выборки равен 6 повторным испытаниям, а для логнормального распределения необходимо хотя бы 20.

На рассматриваемом примере видно, что общая массовая концентрация аэрозольных частиц, определяемая двумя способами: как произведение векторов или сумма концентраций по размерным каналам, даёт один и тот же результат, т.е.

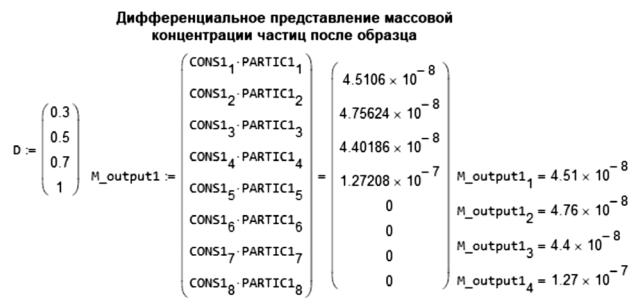
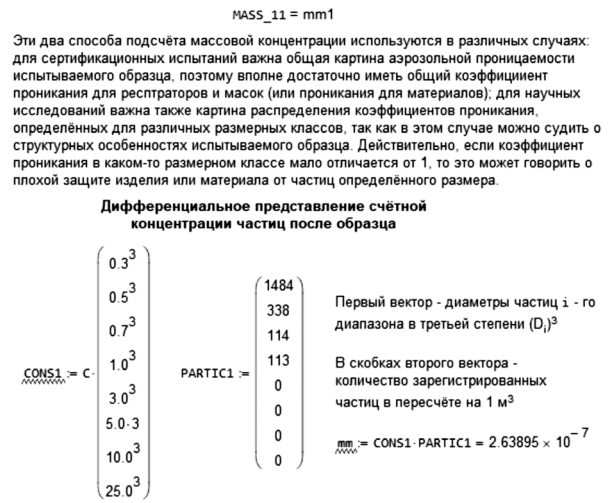


Рис. 3 (стр. 3). Пример перерасчёта защитных характеристик фильтрующих материалов респираторов для массовой концентрации по результатам испытаний счётной концентрации частиц

Fig. 3 (p. 3). Example of recalculation of protective characteristics of respirator filter materials for mass concentration based on the results of particle count concentration tests

Определение поверхностной плотности образцов показало, что этот показатель соответствует заявленным значениям в паспортах на фильтрующий материал.

Значения коэффициента проникания и коэффициента защиты пакетов материалов определялись на основании анализа результатов испытаний образцов по двум размерным классам: 0,3 и 0,7 мкм, что соответствует табл. 2 ГОСТ 12.4.028-76.

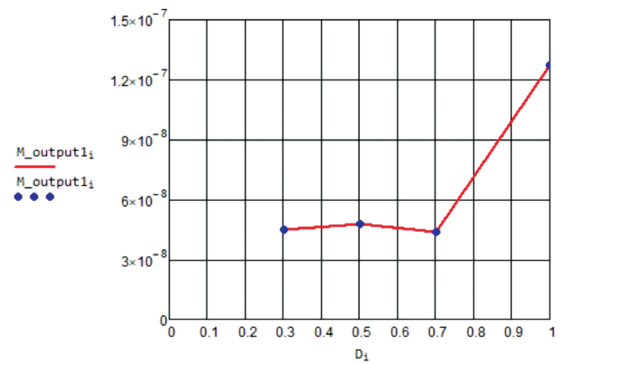
Полученные величины коэффициента проникания для обоих видов пакетов фильтрующих материалов соответствуют нормативным значениям, содержащимся в таблице 2 ГОСТ 12.4.028-76, так как их средние значения находятся в доверительных интервалах исследуемых параметров.

Полученные величины коэффициента проникания для обоих видов пакетов фильтрующих материалов в статистическом смысле равны друг другу. Однако ФПП-15 имеет в два раза меньшую поверхностную плотность, что позволяет говорить о его лучших защитных свойствах по сравнению с материалом «Мельтблаун».

Выводы

1. Сравнимые виды пакетов фильтрующих материалов обладают коэффициентами защиты более 250, что соответствует нормативным значениям ГОСТ 12.4.028-76.
2. Частицы малых размеров (менее 0,3 мкм) обладают существенно большей проникающей способностью через фильтрующий материал, поэтому этот факт не-

Распределение частиц после фильтрующего материала по i-ым размерным классам после образца в мкм: D₁=0.3; D₂=0.5; D₃=0.7; D₄=1



Общая массовая концентрация азрозольных частиц после образца представляется суммой i-ых массовых концентраций по всем классам, т.е.

$$MASS_{21} := \sum M_{output1_i} = 2.63895 \times 10^{-7} \frac{MG}{M^3}$$

$\frac{MASS_{21}}{MASS_{11}} = 0.0004$ - Коэффициент проникания интегральный (общий)
 $\frac{MASS_{11}}{MASS_{21}} = 2476.27394$ - Коэффициент защиты интегральный (общий)

Дифференциальное представление коэффициента проникания по каждому из классов будет выглядеть следующим образом

$\frac{M_{output1_1}}{M_{input1_1}}$	Коэффициент проникания Pr _i по каждому рассмотренному размерному классу i равен:	$Pr_1 = 0.2513$
$\frac{M_{output1_2}}{M_{input1_2}}$		$Pr_2 = 0.07243$
$\frac{M_{output1_3}}{M_{input1_3}}$		$Pr_3 = 0.05699$
$\frac{M_{output1_4}}{M_{input1_4}}$		$Pr_4 = 0.02582$

Рис. 3 (стр. 4). Пример перерасчёта защитных характеристик фильтрующих материалов респираторов для массовой концентрации по результатам испытаний счётной концентрации частиц

Fig. 3 (p. 4). Example of recalculation of protective characteristics of respirator filter materials for mass concentration based on the results of particle count concentration tests

обходимо учитывать при формулировании требований к фильтрующим материалам СИЗОД.

3. Материал ФПП-15 обладает лучшими защитными свойствами, так как при статистическом равенстве коэффициента защиты с материалом «Мельтблаун» он имеет поверхностную плотность в два раза меньшую.

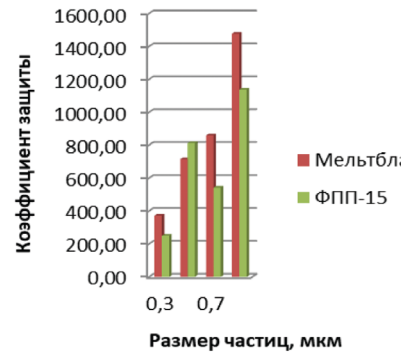
4. Оба сравниваемых фильтрующих пакета материалов пригодны для применения в респираторах-полумасках в области использования атомной энергии.

Направления дальнейших исследований в области защитных свойств средств индивидуальной защиты органов дыхания:

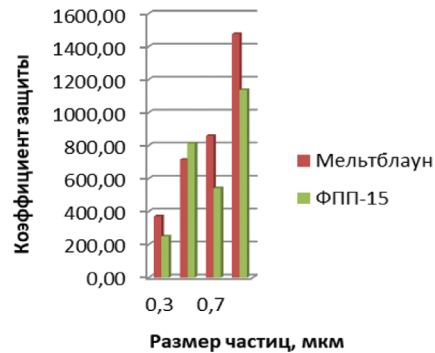
- определение научно обоснованных нормативных значений аэрозольной проницаемости, а также условий проведения испытаний по аэрозольной проницаемости СИЗОД и материалов для них в современных условиях;
- сравнительные исследования величины аэрозольной проницаемости при использовании разного испытательного оборудования с тест-аэрозолем масляного тумана и NaCl;
- разработка методики испытания аэрозольной проницаемости материалов для сертификационных испытаний СИЗОД;
- исследование изменения защитных свойств фильтрующих материалов для СИЗОД в зависимости от условий и сроков хранения;

Сравнение коэффициентов защиты

Коэффициент защиты материала по счётной концентрации

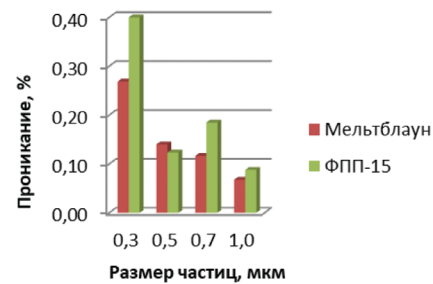


Коэффициент защиты материала по массовой концентрации



Сравнение аэрозольной проницаемости

Коэффициент проникания аэрозольных частиц для счётной концентрации, %



Коэффициент проникания аэрозольных частиц для масс. концентрации, %

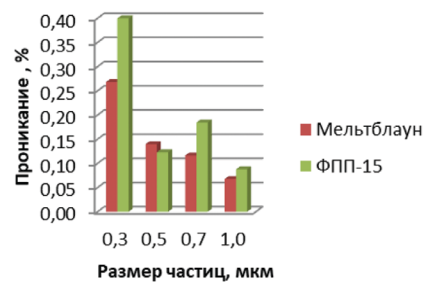


Рис. 4. Коэффициенты защиты и проницаемость аэрозольных частиц разных размерных классов

Fig. 4. Protection factors and permeability of aerosol particles of different size classes

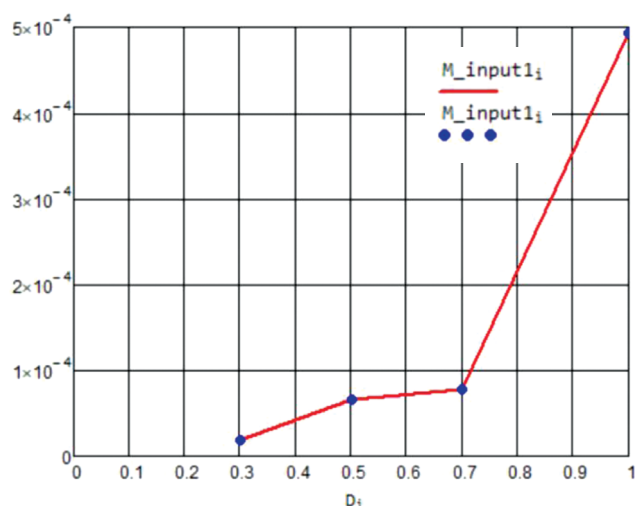


Рис. 5. Распределение массовой концентрации частиц по i -ым размерным классам (в мкм) до фильтрующего материала: $D_1=0,3$; $D_2=0,5$; $D_3=0,7$; $D_4=1$

Fig. 5. Distribution of mass concentration of particles by i -th size classes (in μm) before the filter material: $D_1=0,3$; $D_2=0,5$; $D_3=0,7$; $D_4=1$

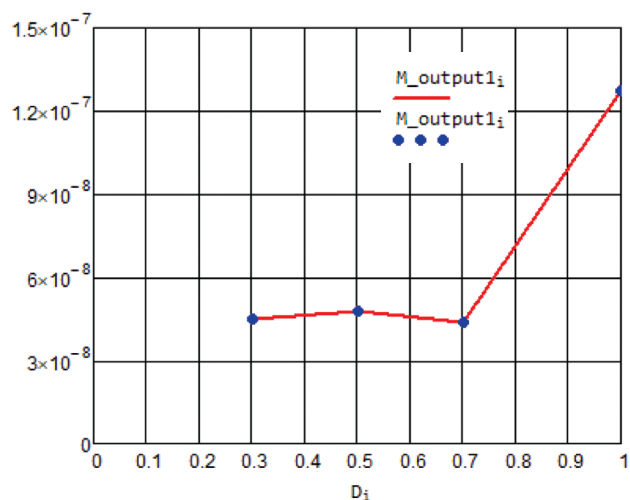


Рис. 6. Распределение массовой концентрации частиц по i -ым размерным классам (в мкм) после фильтрующего материала: $D_1=0,3$; $D_2=0,5$; $D_3=0,7$; $D_4=1$

Fig. 6. Distribution of mass concentration of particles by i -th size classes (in μm) after the filter material: $D_1=0,3$; $D_2=0,5$; $D_3=0,7$; $D_4=1$

- исследование защитных свойств материалов СИЗ и СИЗОД от твёрдых наноаэрозолей с размером частиц менее 0,3 мкм;
- разработка стандарта метода испытания аэрозольной проницаемости материалов для СИЗОД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 12.4.119-82 Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Метод оценки защитных свойств по аэрозолям.
- ГОСТ 12.4.028-76 Респираторы ШБ-1 Лепесток. Технические условия.
- Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И., Борисов Н.Б., Гольдштейн Д.С., Шатский С.Н., Филатов Ю.Н., Кириченко В.Н. «Лепесток». Лёгкие респираторы. М.: Наука, 2015. 320 с.
- Басманов П.И., Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова. М., 2002. 193 с.
- Самойлов А.С., Удалов Ю.Д., Рубцов В.И., Зиновьев В.П., Оленина И.В., Тимошенко А.Н., Андреев В.В., Бушманов Ю.А., Белоусов А.В., Кретов А.С., Селезнев Н.А., Смирнов Ю.Е. Радиационная обработка защитных комбинезонов и выбор средств индивидуальной защиты персонала, контактирующего с коронавирусной инфекцией // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т.5. №3. С.85-94.

REFERENCES

- GOST 12.4.119-82 Personal Respiratory Protective Equipment. Method for Assessing Protective Properties for Aerosols (In Russ.).
- GOST 12.4.028-76 Respirators SHB-1 Lepestok. Technical Conditions (In Russ.).
- Petryanov I.V., Koshcheyev V.S., Basmanov P.I., Borisov N.B., Gol'dshteyn D.S., Shatskiy S.N., Filatov Yu.N., Kirichenko V.N. «Lepestok.» Legochnyye Respiratory = «Petal». Pulmonary Respirators. Moscow, Nauka Publ., 2015. 320 p. (In Russ.).
- Basmanov P.I., Kirichenko V.N., Filatov Yu.N., Yurov Yu.L. *Vysokoeffektivnaya Ochistka Gazov ot Aerozoley Fil'trami Petryanova* = Highly Efficient Purification of Gases from Aerosols using Petryanov Filters. Moscow Publ., 2002. 193 p.
- Samoylov A.S., Udalov Yu.D., Rubtsov V.I., Zinov'ev V.P., Olenina I.V., Timoshenko A.N., Andreyev V.V., Bushmanov Yu.A., Belousov A.V., Kretov A.S., Seleznev N.A., Smirnov Yu.Ye. Radiation Treatment of Protective Suits and the Choice of Personal Protective Equipment for Personnel in Contact with Coronavirus Infection. *Meditinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.07.2025. **Принята к публикации:** 25.08.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.07.2025. **Accepted for publication:** 25.08.2025.