

УДК 614.894.3

Н. В. Мензелинцева, О. Н. Маринина, Н. Ю. Ермилова, О. В. Проценко

Волгоградский государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕГАЗОУЛАВЛИВАНИЯ НА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ ИЗ ИОНООБМЕННЫХ ВОЛОКОН

Проведены испытания разработанного материала в статических и динамических условиях. Анализ результатов показал, что разработанный ионообменный волокнистый материал может использоваться в качестве сорбционно-фильтрующего элемента респиратора, обеспечивая требуемую эффективность защиты по кислым газам и по твердым составляющим сварочного аэрозоля.

Ключевые слова: фильтрующий элемент, сорбционно-фильтрующие материалы, предельно допустимая концентрация (ПДК), сварочный аэрозоль, изотерма сорбции, динамическая активность, статическая обменная емкость.

Ионообменный способ очистки пылегазовоздушных смесей используется в тех случаях, когда необходимо одновременно улавливать твердые частицы и газообразные смеси. В этих случаях применяются иониты в различных формах, в том числе волокнистые.

Волокнистые иониты имеют высокую удельную поверхность, что обеспечивает высокую скорость сорбции при значительной эффективности улавливания [1—6].

Известно использование в процессах пылегазоулавливания волокнистых материалов ВИОН, КМ. Особенно эффективно применение таких материалов в виде пористых перегородок респираторов и респираторных установок [1—7].

Разработан нетканый иглопробивной материал, который используется в качестве пористой перегородки респираторов при улавливании сварочного аэрозоля. Разработанный материал состоит из двух слоев: 1-й слой — анионообменные поликапроамидные модифицированные волокна, 2-й слой — гидрофильное модифицированное хлопкоподобное вискозное волокно [1, 2]. Соотношение слоев по массе составляет 1 : (0,7...0,3) соответственно. В качестве анионообменного волокна используется волокно на основе привитого сополимера поликапроамида и полидиэтиламиноэтилметакрилата¹ [8, 9].

Изотерма сорбции водяных паров разработанным материалом при содержании анионообменного волокна в смеси 50 % масс. (рис. 1) представляет собой кривую S-образного вида, характерную для капиллярно-пористых тел, имеющих развитую тонкопористую структуру² [1]. Гистерезис свидетельствует о набухании материала в процессе сорбции и о неравномерности распределения пор по диаметру.

Согласно теории адсорбции часть изотермы (до 10 %) соответствует мономолекулярной адсорбции, до 80 % полимолекулярной адсорбции. На участке 80...100 % происходит капиллярная конденсация жидкости, а максимальному количеству гигроскопического состояния соответствует влагосодержание образца при 100 %.

¹ *Маринина О. Н.* Совершенствование средств индивидуальной защиты органов дыхания сварщиков арматурных цехов завода ЖБИ : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012.

² Там же.

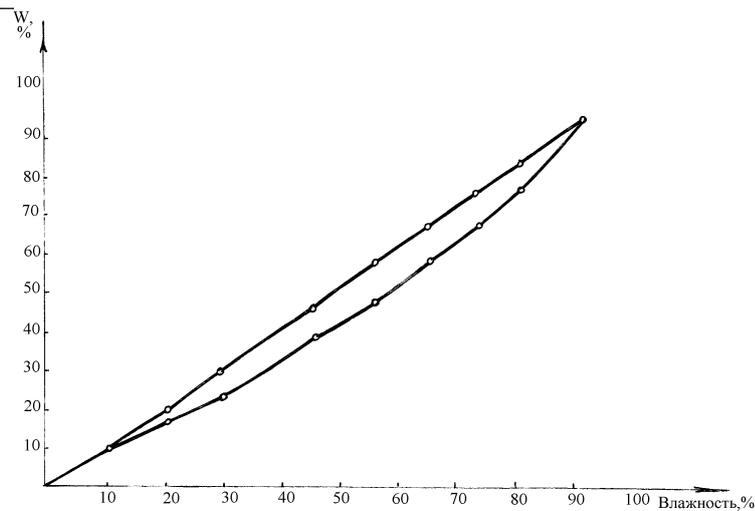


Рис. 1. Изотерма сорбции водяных паров разработанным материалом

Для описания изотермы сорбции применялось уравнение БЭТ, которое можно представить в линейной форме³ [2]:

$$\frac{p/p_0}{a(1-p/p_0)} = \frac{1}{a_m c} + \frac{c-1}{a_m c} p/p_0, \quad (1)$$

где a — величина адсорбции, мг-экв.; p/p_0 — отношение давления водяных паров;

$$c = \exp \frac{q_1 - q_2}{RT},$$

где $(q_1 - q_2)$ — чистая теплота сорбции; a_m — емкость монослоя, мг-экв.

Найденные с помощью уравнения БЭТ величины позволяют определить удельную поверхность по величине адсорбированной влаги монослоя при условии, что еще не происходит капиллярная конденсация паров воды и набухание сорбента. Полученные величины влагосодержания соответствуют разным формам связи влаги с сорбентом, что подтверждает вывод о том, что разработанные сорбенты имеют высокую удельную поверхность, развитую поровую структуру.

В соответствии с современными представлениями о процессе сорбции водяного пара, на первом этапе образуется монослой адсорбированных молекул по типу специфической поверхности адсорбции Ленгмюра. Затем формируется несколько последующих слоев со значительно меньшей энергией связывания. Этому процессу соответствует отрезок изотермы со значительно меньшим градиентом роста количества сорбированного водяного пара: в интервале значений p/p_0 (0,10...0,75) влагосодержание меняется от 2 до 7 %. При $p/p_0 > 0,75$ начинается капиллярная конденсация, вызывающая интенсивное набухание сорбента и осмотическое поглощение влаги.

³ Там же.

Исследована поровая структура материала. Микропоровую структуру нетканых материалов исследовали методами термограмм сушки и по методу изотерм сорбции-десорбции. Макропоровую структуру изучали методом капиллярного поднятия жидкости. По результатам исследований построены дифференциальные и интегральные кривые распределения пор по размерам, анализ которых показал, что основной объем порового пространства образуют микропоры размером $(5...25) \cdot 10^4$ мкм и макропоры размером 250...630 мкм.

Сравнительные характеристики физико-механических свойств защитного материала приведены в табл. 1.

Для оптимизации структуры и свойств фильтрующего материала проведен эксперимент по плану В₃. В качестве параметров оптимизации были выбраны: Y_1 — время защитного действия по HF , ч; Y_2 — воздухопроницаемость, $dm^3/(m^2 \cdot c)$ [10, 11]⁴.

В качестве варьируемых факторов были приняты: X_1 — содержание хлопкоподобного высокомолекулярного модифицированного вискозного волокна, %; X_2 — число смен работы до замены фильтрующего элемента (ФЭ); X_3 — толщина фильтрующего слоя, мм.

Согласно плану В₃ факторы варьируются на трех уровнях (табл. 2). При переходе от матрицы планирования к рабочей матрице эксперимента использовали соотношение

$$X_i = \frac{c_i - c_0}{I_i}, \quad (2)$$

где X_i — кодированное значение i -го фактора; c_0, c_i — натуральное значение фактора на нулевом уровне и на i -м уровне соответственно; I_i — интервал варьирования i -го фактора.

Выбор уровня варьирования факторов объясняется техническими возможностями оборудования и требованиям к фильтрующим материалам.

В результате реализации эксперимента и его обработки получены адекватные уравнения (проверка на адекватность осуществлялась по критерию Фишера), которые с учетом значимых коэффициентов (значимость коэффициентов проверяли по критерию Стьюдента) имеют вид в кодированных величинах:

$$Y_1 = 29,01 + 11,22x_3 - 4,54x_3^2, \quad (3)$$

$$Y_2 = 427,57 + 14,57x_2 - 172,07x_3 - 32,38x_1x_2 - 31,66x_2x_3 + 55,66x_2^2 \quad (4)$$

и в именованных:

$$Y_1 = 29,01 + 11,22 \left(\frac{h-4}{2} \right) - 4,54 \left(\frac{h-4}{2} \right)^2 = -11,61 + 14,7h - 11,3h^2, \quad (5)$$

$$Y_2 = 427,57 + 14,57 \left(\frac{n-14}{4} \right) - 172,07 \left(\frac{h-4}{2} \right) - 32,38 \left(\frac{N-50}{20} \right) \left(\frac{n-14}{4} \right) - 31,66 \left(\frac{n-14}{4} \right) \left(\frac{h-4}{2} \right) + 55,66 \left(\frac{n-14}{4} \right)^2. \quad (6)$$

⁴ Там же.

Таблица 1

Результаты испытаний защитного материала

Поверхностная плотность материала, г/м ²	Поверхностная плотность слоя ионообменного волокна, г/м ²	Поверхностная плотность слоя вискозного волокна, г/м ²	Время защитного действия, ч	Разрывная нагрузка <i>H</i> по длине и ширине		Жесткость при изгибе по длине и ширине		Воздухопроницаемость, дм ² /м ²	Гигроскопичность, %	Число смен до замены фильтрующего элемента
300	210	90	30	120	140	6,5	6,7	250	9,5	15
300	180	120	26	115	100	7,8	8,2	210	9	13
300	150	150	21	101	98	9,4	9,5	168	8,9	11
300	120	180	17	100	90	10,2	10	140	8,25	7
300	90	210	15	96	90	11	10,8	120	8	4

Т а б л и ц а 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Содержание модифицированного высокомолекулярного хлопкоподобного вискозного волокна N , %	X_1	35	50	75	25
Число смен до замены ФЭ n	X_2	100	120	140	20
Толщина фильтрующего слоя h , мм	X_3	280	400	520	120

Построены двумерные сечения поверхностей отклика. Анализ полученных закономерностей позволил сделать вывод о преимущественном влиянии толщины материала на рассматриваемые параметры. Проведена оптимизация структуры и свойств разработанного материала методом наложения сечений поверхностей отклика. Найдены оптимальные параметры структуры: толщина материала 2,0...2,5 мм, содержание хлопкоподобного высокомолекулярного вискозного волокна 30...40 %⁵ [1, 10, 11].

Динамическую активность (ДА) выражали отношением количества поглощенного сорбентом газа до проскока (или до насыщения) к его СОЕ. Роль влаги в процессе сорбции подтверждается результатами исследования ДА сорбента в зависимости от влажности ГВС (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Зависимость количества поглощенного газа от влагосодержания сорбента и влажности ГВС

Влажность		Время, мин		Количество сорбированного газа, мг/г сух. волокна	
Сорбент КМ-А1	ГВС	До проскока	До насыщения	До проскока	До насыщения
9	65	2	159	2,43	79,28
40	65	9	180	11,08	98,16
65	65	17	241	16,94	126,07
90	65	25	287	23,01	157,18
100	65	32	371	30,46	205,16
65	9	3	65	3,98	35,03
65	40	8	112	12,03	66,94
65	63	17	204	17,19	132,13
65	90	51	438	56,08	270,01
65	100	68	520	66,02	321,56

В табл. 4 приведены экспериментальные данные по зависимости динамической активности от концентрации фтористого водорода в ГВС.

⁵ Там же.

Зависимость сорбционных характеристик от концентрации HF в ГВС

Концентрация H , мг/м ³	Время, мин		Количество сорбированного HF, мг/г сух. сорбента		Эффективность поглощения, %
	До проскока	До насыщения	До проскока	До насыщения	
Сорбент КМ-А1					
0,6	83	972	15,97	108,39	265,70
1,4	37	488	16,69	127,72	348,41
2,5	18	244	17,19	151,89	415,00
3,7	15	227	18,91	169,12	461,62
6,0	11	135	25,18	179,72	491,04

Примечание. Влажность ГВС $\varphi_{ГВС} = 65\%$; влагосодержание сорбента $\varphi_{сор} = 5,7\%$; скорость пропускания ГВС $V_{ГВС} = 3$ см/с; высота слоя сорбента $H = 4,5$ мм.

На рис. 2 показана зависимость ДА от высоты слоя сорбента, анализ которой показал, что при увеличении толщины слоя ДА сначала возрастает, а затем остается практически постоянной [1, 12, 13].

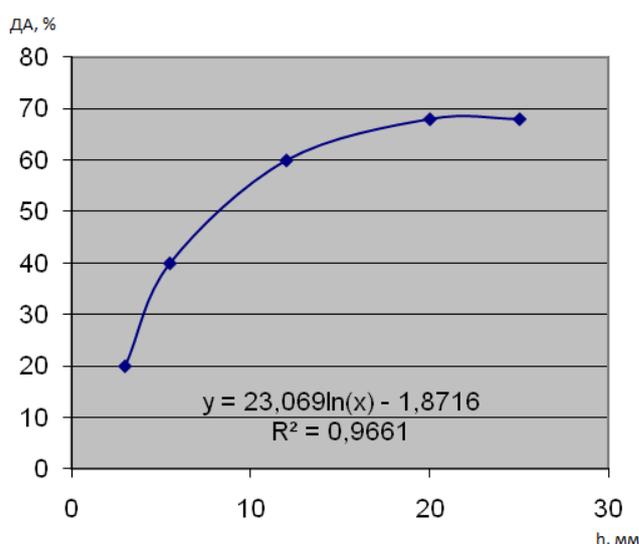


Рис. 2. Зависимость динамической активности ионита от высоты слоя сорбента при концентрации HF в ГВС 2,5 мг/м³, скорости пропускания ГВС 3 см/с, температуре ГВС 25 °С, исходном влагосодержании сорбентов 5,5 %

Анализ зависимости времени защитного действия τ от высоты слоя сорбента H при улавливании фтористого водорода (рис. 3) позволил сделать вывод о том, что полученную зависимость можно описать известным уравнением динамики сорбции Шилова [2], которое для случая $H > H_0$ имеет вид

$$\tau = kH - \tau_0, \quad (7)$$

где H_0 — длина работающего слоя сорбента, см; τ_0 — потеря времени защитного действия; k — коэффициент защитного действия, $k = 5,8$ мин/см.

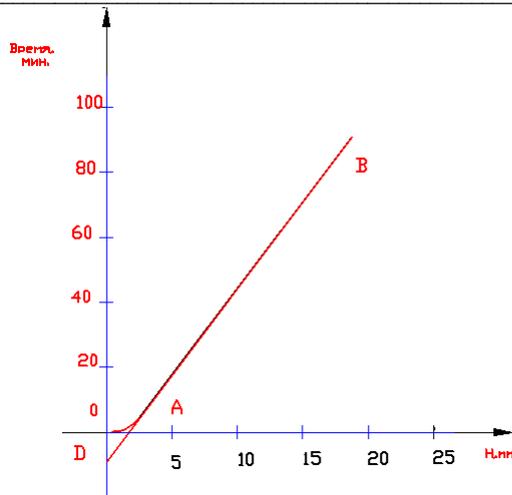


Рис. 3. Зависимость времени защитного действия от высоты слоя при концентрации $HF = 2,5 \text{ мг/м}^3$, скорости пропускания ГВС 3 см/с , исходном влагосодержании образца $5,5 \%$, температуре ГВС $25 \text{ }^\circ\text{C}$, влажности ГВС 65%

Анализ приведенных данных показывает, что разработанные материалы обладают высоким временем защитного действия, достаточно хорошими показателями проницаемости. Введение в состав сорбента гидрофильного модифицированного хлопкоподобного вискозного волокна повышает защитные свойства ионитов. Отмеченное обстоятельство объясняется тем, что при введении в состав сорбента гидрофильного волокна повышается общая влажность сорбента, происходит дополнительное набухание ионообменных волокон, повышается их удельная поверхность и, соответственно, поверхность контакта с сорбируемым газом. Следовательно, увеличивается количество поглощенного вещества, повышается время защитного действия по очищаемому газу, повышается устойчивость фильтрующей среды к агрессивным средам⁶ [1, 11].

Выводы

1. Разработан иглопробивной нетканый материал, содержащий слой из анионообменного поликапроамидного волокна и слой хлопкоподобного высокомолекулярного модифицированного вискозного волокна. Исследованы структура, физико-химические свойства, поровая структура; установлено, что разработанный материал обладает высоким временем защитного действия, высокой прочностью и достаточной гигроскопичностью, что определяет эффективность процессов пылегазоулавливания.

2. Получены уравнения регрессии, устанавливающие связь между показателями основных свойств сорбентов и параметрами их структуры. Определены оптимальные параметры структуры материала.

3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования эффективности разработанного материала как в статических, так и в динамических условиях. Получены экспериментальные зависимости ДА от высоты слоя сорбента, уточнено уравнение динамики Шилова для разработанного сорбента.

⁶ Там же.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Маринина О. Н., Ермилова Н. Ю., Маринина Е. А.* Использование респираторов типа «Снежок ГП-В» на основе двухслойного материала для защиты органов дыхания сварщиков // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2019. Вып. 1(74). С. 122—127.
2. *Мензелинцева Н. В., Маринина О. Н.* Исследование защитных свойств респираторов типа «Снежок-ГП-В» при проведении сварочных работ // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2011. Вып. 24(43). С. 77—81.
3. Dispositif de retenue positionnement et l'avant d'une manche de filtrage a manches : заявка 2709803 Франция : МКИ⁶ F Д 41/12 / Montaciar Jean Paul, Carre Serge. № 9310569 ; заявл. 06.09.93 ; опублик. 17.03.95.
4. Filtereinheit zum Reinigen von staubbelasteter Prozessluft : заявка 10113215 Германия : МПК⁷ В 01 В 46/04 / Lubberes Matthias. № 10113215.8 ; заявл. 18.03.01 ; опублик. 19.09.02.
5. Produktabschneider : заявка 19753070 Германия : МПК⁶ В 01 D 46/26 / Dieckmann Peter. № 19753070.2 ; заявл. 29.11.97 ; опублик. 02.06.99.
6. Filteranlage : заявка 19641257 Германия : МПК⁶ В 01D 41/42 / Hennen Hermann. № 19461257.9 ; заявл. 07.10.96 ; опублик. 16.04.98.
7. Filter zur Teilchenabscheidung und Verfahren zur Filterreinigung : заявка 4313469 ФРГ : МКИ⁵ В 01 D 46/42 / W. Esch ; заявл. 24.04.93 ; опублик. 17.11.94.
8. *Мензелинцева Н. В., Маринина О. Н.* Оценка защитных свойств сорбционно-фильтрующих материалов // Социально-экономические и технологические проблемы развития строительного комплекса региона : IV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Михайловка, 2011. С. 173—175.
9. *Мензелинцева Н. В., Маринина О. Н., Фомина Е. О.* Исследование защитных свойств универсальных респираторов типа «Снежок» // Проблемы охраны производственной и окружающей среды : сб. материалов и науч. тр. инженеров-экологов. Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. С. 69—72.
10. *Мензелинцева Н. В., Фомина Е. О., Маринина О. Н.* Оценка свойств противогазовых волокнистых сорбционно-фильтрующих элементов респираторов и респираторных установок // Материалы VIII Междунар. конф. Самарканд, 2010. С. 26—27.
11. *Мензелинцева Н. В., Маринина О. Н.* Анализ эффективности использования средств индивидуальной защиты органов дыхания в строительной промышленности // Окружающая среда и здоровье : материалы междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2009. С. 77—80.
12. *Schobesberg Manfred.* Optimiser la conception l'entretien des filtres a manches // Ind/cerum/et verr. 1999. No. 4. Pp. 248—253.
13. *Ross S. E.* Nonwovens: An Updated Review // American Dyestuff Reporter. 1971. Vol. 60. No. 9. Pp. 68—83.

© Мензелинцева Н. В., Маринина О. Н., Ермилова Н. Ю., Проценко О. В., 2022

Поступила в редакцию
в сентябре 2022 г.

Ссылка для цитирования:

Мензелинцева Н. В., Маринина О. Н., Ермилова Н. Ю., Проценко О. В. Особенности процессов пылегазоулавливания на текстильных материалах из ионообменных волокон // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 4(89). С. 161—169.

Об авторах:

Мензелинцева Надежда Васильевна — д-р техн. наук, проф., проф. кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; menzelintseva_nv@mail.ru

Маринина Ольга Николаевна — канд. техн. наук, доц. каф. инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; day.meednight@gmail.com

Ермилова Наталья Юрьевна — канд. пед. наук, доц., доц. каф. инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; n.y.ermilova@yandex.ru

Проценко Оксана Владимировна — старший преподаватель каф. инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Nadezhda V. Menzelintseva, Ol'ga N. Marinina, Natal'ya Yu. Ermilova, Oksana V. Protsenko

Volgograd State Technical University

PECULIARITIES OF DUST AND GAS COLLECTION PROCESSES ON TEXTILE MATERIALS MADE OF ION-EXCHANGE FIBRES

The developed material was tested under static and dynamic conditions. The analysis of the results showed that the developed ion-exchange fibrous material can be used as a sorption-filtering element of a respirator, providing the required protection efficiency for acid gases and solid components of a welding aerosol.

Key words: filtering element, sorption-filtering materials, maximum permissible concentration (MPC), welding aerosol, sorption isotherm, dynamic activity, static exchange capacity.

For citation:

Menzelintseva N. V., Marinina O. N., Ermilova N. Yu., Protsenko O. V. [Peculiarities of dust and gas collection processes on textile materials made of ion-exchange fibres]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2022, iss. 4, pp. 161—169.

About authors:

Nadezhda V. Menzelintseva — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; menzelintseva_nv@mail.ru

Ol'ga N. Marinina — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; day.meednight@gmail.com

Natal'ya Yu. Ermilova — Candidate of Pedagogic Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; n.y.ermilova@yandex.ru

Oksana V. Protsenko — Senior Lecturer of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation