

С. М. Азаров<sup>1</sup>, Т. А. Азарова<sup>2</sup>, Е. Е. Петюшик<sup>1</sup>,  
А. Л. Беланович<sup>3</sup>, А. А. Дробыш<sup>1</sup>, Д. Н. Балыдко<sup>1</sup>

## **ПОРИСТЫЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА**

*<sup>1</sup>БНТУ, <sup>2</sup>ИОНХ НАН Беларуси, <sup>3</sup>ГНПО ПМ, г. Минск*

Нестабильная работа пневмооборудования, перемерзание трубопроводов, засоры пневмотранспорта, простои производства из-за поломки устройств, использующих сжатый воздух, появление брака – все эти проблемы порождает наличие в потоке воздуха влаги. Она вызывает коррозию труб пневмосистемы, и ржавчина попадает в пневмоинструмент. Кроме влаги и ржавчины в систему попадает аэрозоль компрессорного масла из поршневых компрессоров. Результат этих явлений – коррозия дорогостоящего оборудования и выход его из строя. Поэтому задачи комплексной очистки воздуха являются актуальными и острота проблемы все увеличивается. Традиционно для осушки и очистки воздуха используются четыре способа или их комбинации: ассимиляция; адсорбция на основе силикагеля или цеолита; конденсационный метод; фильтрация на основе спеченного порошка (бронза, алюминий, титан и т.д.), керамики и полимерных материалов.

Метод ассимиляции основан на физической способности теплого воздуха удерживать большее количество водяных паров по сравнению с холодным.

Адсорбционный метод основан на сорбционных (влагопоглощающих) свойствах веществ-сорбентов. Имея пористо-капиллярную структуру с химическим импергированием, сорбенты извлекают водяной пар из воздуха. По мере насыщения сорбента влагой эффективность осушения снижается. Поэтому сорбент нужно периодически регенерировать, т.е. выпаривать из него влагу путем продувания потоком горячего воздуха. К недостаткам

рассматриваемого метода, как и в предыдущем случае, относится повышенное энергопотребление в связи с наличием безвозвратных потерь явного и скрытого тепла.

Конденсационный (динамический) метод основан на принципе конденсации водяных паров, содержащихся в воздухе, при охлаждении его ниже точки росы. К недостаткам способа имеет смысл отнести сложность используемого оборудования и высокие требования к предварительной очистке воздуха.

Фильтрация воздуха на различных пористых материалах традиционно используется, как метод очистки от механических загрязнений и масла. Данный метод также эффективен при удалении капельной влаги, аэрозольного тумана.

**Целью проведенной работы** является оценка возможностей пористых алюмосиликатных материалов, в качестве фильтровальных материалов при комплексной очистке воздуха.

Любые фильтрующие перегородки в системах очистки воздуха (в том числе и пористые алюмосиликатные материалы), должны удовлетворят следующим требованиям:

- проницаемость материала должна быть больше 2–4 Дарси при очистке воздуха в пневмосистемах и не меньше 20 Дарси в вентиляционных системах;
- материал должен выдерживать перепад давления не менее 1 МПа;
- поверхность материала должна иметь минимальное влагопоглощение и, желательно, обладать гидрофобностью.

Известно, что сочетание селективности (качества очистки) и производительности фильтрующего материала может быть достигнуто за счет создания многослойной мембраны, где размер пор от слоя к слою последовательно. Структура такой мембраны приведена на рисунке 1. В мембране от нижнего слоя (подложки) 1 к верхнему мембранному слою 4 обеспечивается постепенное уменьшение размера пор и толщины слоя. Нижний крупнопористый слой-подложку изготавливают с порами порядка 40–50 мкм, слой 2 может состоять из одного или

двух слоев и имеет размер пор около 1–5 мкм. Слой 3 имеет поры порядка 0,1–0,5 мкм и является мембранным в процессах микрофильтрации. Слой 4 имеет поры 0,01–0,05 мкм и используется для ультрафильтрации.



Рисунок 1 – Структура многослойной мембраны

Необходимо отметить, что приведенное на рис. 1 количество слоев на подложке, а также изменение размера пор от слоя к слою, являются в значительной степени условными и в каждом конкретном случае будут определяться технологией получения мембран и требованиями, предъявляемыми к условиям эксплуатации. Можно сформулировать лишь некоторые общие соображения, касающиеся подхода к проблеме формирования фильтрующей конструкции:

1. Пористая подложка должна обладать минимально возможным гидравлическим сопротивлением, т.е. иметь минимальный размер пор не менее 15–20 мкм. В противном случае мембрана будет иметь заведомо низкую производительность по фильтрату.

2. Должно соблюдаться определенное соотношение размеров пор подложки и размеров частиц наносимого слоя. При отношении размера пор подложки к размеру частиц равному 5–10, происходит не формирование слоя на геометрической поверхности подложки, а заполнение пор подложки на глубину, не превышающую одного диаметра ее пор. Таким образом обеспечивается саморегулирование толщины наносимого слоя на всей поверхности подложки.

3. Мембранный и промежуточные слои должны обладать минимальным гидравлическим сопротивлением, как и подложка. Для этого отношение толщины слоев к размеру их пор не должно превышать 20–40.

При выполнении перечисленных требований может быть получена мембрана, обладающая максимальной производительностью при заданной селективности.

Одним из основных условий получения высококачественных мембранных слоев является использование высококачественных суспензий керамических порошков. Такие суспензии могут рассматриваться как коллоидные системы, свойства которых будут зависеть от количества твердой фазы, распределения частиц и их агломератов по размерам, формы агломератов, типа взаимодействия между частицами.

В зависимости от сил межчастичного взаимодействия (рисунок 2) керамические системы подразделяются на жестко-сферические (рисунок 2, *а*), мягко-сферические (рисунок 2, *б*) и флокулированные (рисунок 2, *в*).

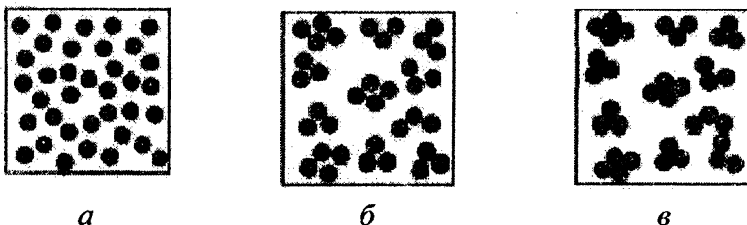


Рисунок 2 – Виды керамических систем: жестко-сферические (*а*), мягко-сферические (*б*) и флокулированные (*в*)

Для жестко-сферических коллоидных систем взаимодействие между частицами наблюдается только в точке контакта. Такие системы представляют собой простой случай, когда структура определяется только гидродинамическими взаимодействиями и броуновским движением. В действительности существует лишь небольшое количество таких простых систем, однако они служат эталоном для выявления более сложных взаимодействий.

Флокулированные суспензии – это суспензии, в которых доминируют силы притяжения и существует тенденция к образованию беспорядочной метастабильной структуры с различными

временами релаксации. Такое наблюдается при добавлении неадсорбирующегося полимера в стабилизированную другим способом систему.

Особого внимания требует оценка влияния химической природы и количества полимерной связки на свойства суспензии. При выборе связки следует учитывать следующие требования: она должна обеспечивать то значение рН, которое позволяет получить качественно диспергированную суспензию; и обеспечивать хорошую адгезию в процессе наслоения.

Авторы работы провели сравнительное исследование суспензий на основании трех типов связок: акриловые латексы, растворы поливинилового спирта, растворы эфиров целлюлозы. Были обнаружены большие различия в степени усадки и микроструктуре мембранных слоев. Так, например, установлено, что размеры пор в сформованном и прокаленном керамическом теле определяются размерами частиц латекса, а в керамическом теле, сформованном на основе ПВС, после прокаливания обнаруживаются питтинговые дефекты.

Изучение влияния размеров частиц исходного порошка алюмосиликата на размеры пор и их распределение в микропористом слое показало, что размеры пор керамической мембраны можно предсказать, исходя из размеров частиц керамического порошка. Установлено, что средний размер пор прямо пропорционален первичному размеру частиц порошка, причем, чем шире распределение частиц по размерам, тем больше поры спеченной мембраны. Последнее связано с тем, что «сырая» мембрана, приготовленная из такого порошка, обладает широким набором размеров пор, а при сплавлении малые поры спекаются быстрее, чем крупные и исчезают. Не исключено также, что существует тенденция к объединению мельчайших пор с образованием пор более крупного диаметра. Для образцов мембран, полученных из порошков с широким распределением частиц по размерам, характерна гораздо меньшая открытая пористость.

Для повышения эффективности задерживания влаги, создания условий, уменьшающих налипание пыли на защитный барьер, и, следовательно, препятствующих росту микроорганизмов, перспективно использование регенерируемых пористых материалов, имеющих гидрофобную поверхность. Поэтому, нами в системах очистки воздуха использовались алюмосиликатные материалы с водоотталкивающей поверхностью, модифицированные кремнеорганической гидрофобизирующей жидкостью (ГКЖ). Остановимся на результатах исследований влияния процесса модифицирования на газопроницаемость и прочностные характеристики алюмосиликатных фильтроэлементов.

В таблице 1 представлены значения коэффициента газопроницаемости ( $\mu$ ), в зависимости от среднего размера пор (Dcp.) фильтроэлементов. Значения давления разрушения исходных фильтроэлементов и фильтроэлементов, модифицированных кремнийорганической жидкостью представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Значения коэффициента проницаемости ( $\mu$ ), для исходных и гидрофобизованных фильтроэлементов в зависимости от среднего размера пор

№	Dcp. (исх.), мкм	$\mu, 10^{-12} \text{ м}^2$	
		исходные	гидрофоб.
1	10	1,73	1,14
2	18	2,85	2,78
3	26	4,26	3,75

Из приведенных таблиц 1 и 2 результатов следует, что модифицирование фильтроэлементов ГКЖ практически не влияет на коэффициент газопроницаемости алюмосиликатной керамики и ее прочностные свойства. Создание гидрофобной поверхности (тонкопленочное покрытие) не изменяет размер и конфигурацию пор фильтроэлементов. При этом, величина краевого угла смачивания (104–107 градусов) и водопоглощение гидрофобизованных образцов указывают на качественное и бездефектное нанесение модифицирующего слоя.

Таблица 2 – Давление разрушения «изнутри-наружу» и «снаружи-внутри» для исходных и гидрофобизованных фильтроэлементов

№	Давление разрушения, бар			
	«изнутри-наружу»		«снаружи-внутри»	
	исходные	гидрофоб.	исходные	гидрофоб.
1	6	6	14	17
2	4	4	12	11
3	4	4	13	13

На рисунке 2 приведена зависимость перепада давления от расхода воздуха, проходящего через гидрофобизованные многослойные фильтроэлементы.

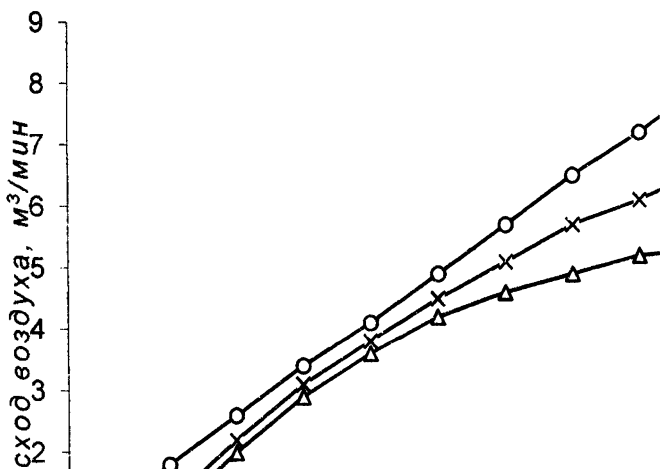


Рисунок 3 – Зависимость перепада давления от расхода воздуха, проходящего через гидрофобизованные многослойные фильтроэлементы: 1 – крупнопористая алюмосиликатная матрица (размер пор 150–250 мкм); 2 – фильтроэлемент с промежуточным слоем (размер пор 20–30 мкм); 3 – фильтроэлемент с промежуточным и мембранным слоями (размер пор 2–5 мкм)

Как следует из представленных на рисунке 3 результатов, в рассматриваемом диапазоне давлений зависимость имеет монотонный характер, что позволяет предположить возможность роста производительности фильтроэлементов при увеличении давления. Максимальное значение перепада давления ограничено возможностями компрессора. Из графиков видно, что увеличение давления в системе сопровождается большим отклонением от линейной зависимости для многослойных фильтроэлементов по сравнению с крупнопористой алюмосиликатной основой. Уменьшение скорости потока в порах мембранного слоя наряду с уменьшением размера пор приводит к увеличению вероятности задерживания посторонних включений в воздушном потоке и, следовательно, к улучшению качества очистки.

Результаты испытаний фильтров по осушке и механической очистке воздуха на основе алюмосиликатных фильтроэлементов представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты испытаний фильтров с разной производительностью\*

Давление, атм.		Расход, м <sup>3</sup> /мин	Точка росы, °С	
вход	выход		вход	выход
1	2	3	4	5
<b>Фильтроэлементы без гидрофобизации</b>				
<i>Производительность 2 м<sup>3</sup>/мин</i>				
6,7	6,7	0	-14,6	
6,7	6,6	0,2		-20,0
6,5	6,6	1		-19,5
5,8	5,3	1,8		-17,0
<b>Гидрофобизованные фильтроэлементы</b>				
<i>Производительность 2 м<sup>3</sup>/мин</i>				
6,7	6,6	0,2		-19,0
6,5	6,6	1		-22,5
5,8	5,3	1,8		-20,0
<i>Производительность 5 м<sup>3</sup>/мин</i>				
6,9	7,2	0	-11,2	
6,85	7,15	1		-19,4
4,0	3,6	3		-19,2
6,5	6,8	5		-11,2



1	2	3	4	5
<i>Производительность 10 м<sup>3</sup>/мин</i>				
6,4	6,8	0	-7,5	
5,8	6,2	2		-14,4
5,8	6,1	6		-14,0
4,2	3,9	9,2		-9,2

Таблица 4 – Результаты испытаний фильтров механической очистки воздуха производительностью 100м<sup>3</sup>/мин\*

Давление, атм. вход	Давление, атм. выход	Время испытаний, сутки	Вес механических примесей в 1м <sup>3</sup> воздуха**, г	
			вход	выход
6,0	6,0	0,5	6	0,2
6 0	6,0	10	4	0,2
6,0	5,9	20	5	0,1
5,7	5,7	60	6	0,2

\* - место проведения испытаний – производственное объединение «Химволокно», г. Светлогорск

\*\* - расчет по осадку на фильтровальной бумаге

Приведенные результаты исследований позволили разработать на основе алюмосиликатных фильтроэлементов устройства для очистки воздуха различной производительности и назначения. Эти конструкции успешно применяются для очистки воздуха в больших пневматических системах от цеолитной и силикагельной пыли, капельной влаги, аэрозольного тумана. Производительность таких фильтров достигает 20000 м<sup>3</sup>/ч. Максимальное рабочее давление – до 10 атм. Потеря напора в рабочем режиме при расходе воздуха более 0,5 атм.

Ресурс работы до регенерации при стандартной запыленности воздуха не менее 104–105 м<sup>3</sup>. Рабочая температура – 0–40 °С. Степень очистки воздуха по ГОСТ 17433-80 не ниже 2 класса.