

А.И. Зуборев¹, А.Г. Кравцов²

¹Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь,

²Гомельский филиал НАН Беларуси; e-mail:zuband_ig@mail.ru)

ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД

Проведён обзор и дан анализ наиболее популярных методов и средств определения характеристик волокнистых фильтров. Материал может быть полезен при решении проблем экологической безопасности.

Ключевые слова: волокнистые фильтры, пористость, тонкость фильтрования, грязеёмкость.

A.I. Zuborev, A.G. Kravtsov

PRINCIPLES, METHODS AND MEANS TESTING OF POLYMER FIBROUS FILTERS FOR PURIFICATION OF GASEOUS MEDIA

A review and analysis of most popular methods and means of determining the characteristics of fibrous filters. The material can be useful in solving problems ecological safety.

Key words: fibrous filters, porosity, filtration fineness, contaminant capacity.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 26 ноября 2013 г.

Полимерные волокнистые фильтры являются важным элементом производственных систем. Практически любой промышленный процесс предусматривает операции очистки многофазных сред от загрязнений. Мировая тенденция к экологизации производств влечёт за собой расширение номенклатуры фильтров на основе волокнисто-пористых полимерных материалов, которые наилучшим образом зарекомендовали себя в качестве основных рабочих компонентов очистных систем [1]. Требования к эффективности фильтрации становятся все более жёсткими. Обычно уже до начала составления проектной и конструкторской документации на очистные системы фильтроматериалы должны подвергаться стендовым (у потребителей), лабораторным и эксплуатационным (у изготовителей) испытаниям.

Эффективность фильтрования от загрязнений зависит, с одной стороны, от комплекса свойств фильтроматериала, а с другой – от условий процесса фильтрации. Важны вид и фракционный состав фильтруемой среды, интенсивность потока, давление и сопротивление течению, величина и концентрация частиц. Актуальной для разработчиков современных фильтров остается проблема качественной экспресс-оценки фильтрационных характеристик [2]. Многие разработчики не имеют регулярного доступа к испытательным центрам и дорогостоящему оборудованию. В Беларуси, например, полностью отсут-

вуют сертифицированные лаборатории по оценке базовых параметров волокнистых фильтров, что существенно сужает возможности разработок новых типов подобных фильтров (в том числе фильтров многофункционального назначения) для разных отраслей промышленности и областей человеческой деятельности.

Важнейшими для волокнисто-пористых материалов являются параметры, характеризующие пористую структуру: суммарный объем пор (общая пористость), удельная поверхность, радиус и дифференциальная кривая распределения объемов пор по радиусам [1]. Разработан ряд способов оценки этих показателей, среди которых – сорбционные, дифракционные, основанные на капиллярных явлениях, оптической (видимой) и электронной микроскопии, а также акустические, емкостные и др. [3]. Под общей пористостью понимают выраженное в процентах отношение объема пор в материале к общему объему материала. Погрешность определения обычно составляет не менее 10-15 %. В случаях, когда химический и композиционный составы фильтра определить трудно, наиболее доступными представляются два метода оценки пористости:

1) взвешивание образца в сухом состоянии и после полной пропитки смачивающей жидкостью с дальнейшим расчетом по формуле:

$$W = \frac{(m_{\text{п}} - m) \cdot 100}{V_{\text{м}} \rho_{\text{ж}}},$$

где m – масса сухого образца;

$m_{\text{п}}$ – масса пропитанного образца;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости;

2) компьютерная обработка микрофотографий срезов фильтроматериала, позволяющая определить средний диаметр волокон $d_{\text{ср}}$, пористость Π (доля объема, занимаемого порами), средний размер пор $D_{\text{п}}$, детектируемую площадь сечения каналов S_1 , анализируемую площадь образца S_2 .

С учетом двух последних показателей, пористость Π можно вычислить по формуле:

$$\Pi = (S_1 / S_2) \cdot 100 \text{ \%}.$$

Количество независимых измерений Π и $d_{\text{ср}}$ должно составлять не менее 5 для каждого образца.

Зная Π , можно определить плотность упаковки волокон $\eta_{\text{уп}}$:

$$\eta_{\text{уп}} = 1 - \frac{\Pi}{100}.$$

Более простой (но дающий меньшую точность) способ определения плотности упаковки – расчет её по нижеследующей формуле:

$$\eta_{\text{уп}} = \rho / \rho_{\text{п}},$$

где ρ – объёмная плотность образца (по ГОСТ 15.902.1-79);

$\rho_{\text{п}}$ – плотность полимера.

Для определения диаметра (D) пор и их распределения по размерам (в случае нередко встречающегося наличия пор с неправильной геометрией) применяют метод, основанный на продавливании газа через смоченный образец. Используют зависимость между радиусом капилляра r_k и давлением газа p , необходимым для преодоления сил поверхностного натяжения:

$$r_k = \frac{2\sigma_0 \cos \theta}{p},$$

где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;
 θ – угол смачивания.

Для оценки удельной поверхности, суммарного объёма пор и распределения пор в материале по размерам может быть использован метод сорбции паров низкомолекулярной жидкости с расчетом отдельных характеристик пористости по уравнениям Брунауэра-Эммета-Теллера (метод БЭТ) и Дубинина-Радушкевича [3]. К традиционным сорбционным методам близок метод анализа термограмм сушки, суть которого заключается в определении количества влаги в пористом материале.

Метод ртутной порометрии основан на дилатометрическом измерении объёма ртути, вдавленной в поры материала при изменении давления. Применяя этот метод, можно получить информацию об общей пористости, а также интегральную и дифференциальную кривые распределения пор по размерам.

Коэффициент извилистости пор также может быть приближенно оценен по величине электрического сопротивления пористых материалов, заполненных электролитом.

Показатели серийных фильтроматериалов проверяют путем выборочных контрольных испытаний. Обычно определяют общетехнические параметры – размер, массу, прочность, химическую стойкость и т.п. Фильтрационные характеристики оценивают по прониканию через фильтр тестовой дисперсионной среды и сравнивают их со стандартными параметрами. Процесс очистки жидкости или газа от загрязнений при прохождении через фильтр качественно характеризуется тонкостью фильтрования и грязеемкостью [4]. В общем случае тонкость фильтрования определяется такими показателями, как абсолютная и номинальная тонкости фильтрования, коэффициенты отфильтровывания и полноты фильтрования.

Абсолютная тонкость фильтрования определяется как максимальный размер частиц загрязнителя, прошедших через фильтр. **Тонкость фильтрования** численно равна минимальному размеру частиц, прошедших через ФЭ с заранее установленным коэффициентом отфильтровывания, который, как правило, должен составлять не менее 0,97.

Испытания фильтров связаны с решением многочисленных проблем по учету скорости фильтруемой среды, размеров частиц загрязнения. Иногда измерение массы является критерием, по которому судят о степени загрязнения фильтра. Для определения размеров частиц, задерживаемых фильтром, можно использовать так называемую "шкалу абсолютного параметра" ("Maximum

Spherical Particle Passed Test") [5] – это максимальный диаметр (в микрометрах) сферической частицы, которая может пройти через фильтр при определенных условиях.

Испытание проводят, пропуская через фильтр определенное количество суспензии или аэрозоля, содержащих сферические частицы с известным распределением по размерам и массе. Жидкость или аэрозоль, прошедшие через фильтр, подают на аналитическую мембрану и исследуют с использованием оптического микроскопа. Диаметр наибольших наблюдаемых в жидкости частиц характеризует абсолютный параметр фильтра.

Безусловно, большинство загрязнителей воздуха в реальных условиях не представлены сферическими частицами. Более того, увеличение скорости течения воздуха, явление частичного закупоривания каналов в фильтре и другие факторы могут уменьшить способность фильтра к захвату частиц. Тем не менее, вышеуказанные понятия широко используют в технике фильтрации.

Поглощение загрязнителя фильтром может быть оценено с использованием микроскопа путем подсчета количества частиц различных размеров, вошедших в фильтр и вышедших из него. Однако в реальных условиях проще оценить массу вошедших и вышедших частиц и определить параметр, называемый гравиметрической эффективностью. Для её определения суспензию загрязнителя (не обязательно состоящего из сферических частиц) пропускают через фильтр. После коррекции ошибок тестовой аппаратуры массу загрязнителя, вошедшего в фильтр, сравнивают с массой загрязнителя, покинувшего фильтр. Хотя распределение частиц загрязнителя по размерам в реальной фильтруемой среде отличается от аналогичного распределения тестовых загрязнителей, указанный метод является хорошо воспроизводимым. Результат представляют как величину гравиметрической эффективности, выраженную в процентах.

Процедуру измерения потока воздуха, проходящего через фильтр, используют для фильтроматериалов, способных улавливать частицы загрязнителей размером менее 1 мкм. По мере "засорения" фильтра и напрямую связанного с этим уменьшения размеров пор давление, необходимое для просачивания воздуха через образец, увеличивается. При высоких давлениях, в дополнение к обычному течению, реализуется устойчивое объемное течение воздуха через открытые каналы. Однако объемный поток существенно затрудняет визуальное определение точки пузыря. Для решения этой проблемы создают давление на наружную сторону фильтра, увлажненного тестовой жидкостью, в то время как противоположная сторона фильтра находится под давлением окружающей среды, и измеряют перепад давления потока воздуха.

Некоторые фильтры имеют градиент пористости по толщине. Результаты испытаний таких фильтрующих материалов целесообразно сопоставлять с данными других дополняющих методов исследований и получать корреляционные зависимости.

Грязеёмкость в странах бывшего СССР обычно определяют по ГОСТ 25476-82, в странах ЕС – в соответствии с EN 149. Грязеёмкость – это параметр фильтра, характеризующий количество загрязнителя заданного размерного состава, которое должно быть добавлено в газовую среду перед фильтром, чтобы он стал достаточно засоренным и перестал выполнять свою функцию, или масса загрязнений, задержанных на единице площади фильтра во время повышения давления от начального до предельно допустимого.

Сравнивать результаты данных по грязеёмкости следует только на фильтрах с одинаковой тонкостью фильтрования.

Достаточно полную информацию по фильтрам для очистки газовых сред дает определение двух базовых характеристик – падения давления на фильтре и проникания (проскока) аэрозоля через фильтр. Результаты измерения перепада давления могут быть обобщены путем использования формул Дарси, что позволяет предсказать эффективность фильтра при любой скорости фильтрации. Трудность определения перепада давления Δp состоит в том, что корпус фильтра вносит в Δp инерционную составляющую, поэтому в итоге общий перепад давления на фильтре может оказаться выше, чем предсказывает закон Дарси. Если фильтры предназначены для использования при повышенных давлении или температуре, влияние этой составляющей на величину Δp также может оказаться значительным. При низких давлениях и малой толщине фильтрующего элемента заметное влияние на Δp оказывает величина проскока. Вязкость воздуха изменяется пропорционально квадратному корню абсолютной температуры, поэтому перепад давления увеличивается с температурой. Вязкость не зависит от давления, но при высоких давлениях становится значительной разность между объёмной скоростью потока, которая входит в простые уравнения теории фильтрации, и массовой скоростью потока. В дополнение к этому, при использовании аэрозолей в качестве тестовой среды для фильтрационных испытаний возникает ряд проблем, связанных с особенностями физических свойств этих дисперсных систем [6]. Практически полезными являются методы испытания фильтров с использованием электрически заряженных аэрозолей. Если электрические эффекты значительны, свойства монодисперсного аэрозоля будут проявлять лишь аэрозоли с униполярно заряженными частицами. Аэрозоли с частицами одинакового размера, несущими разноименные заряды, будут вести себя как полидисперсные. Нередко существует практическая необходимость электрической нейтрализации аэрозолей с помощью, например, радиоионизационных нейтрализаторов. Кроме того, практика показывает, что наибольшей проникающей способностью характеризуются частицы с диаметром около 0,1 мкм.

В распоряжении исследователей всегда имелся набор технических приемов, частично отраженных в отраслевых инструкциях и лабораторных методиках, основу которых составляли разработанные в США и странах Западной Европы тест-методы. Внимание разработчиков фильтров для очистки воздуха было сфокусировано на двух основных критериях оценки эксплуатационных свойств – *коэффициенте проскока* (проникания) и *сопротивлении потоку воздуха*.

Требования к этим параметрам со временем были сведены к единому стандарту (ГОСТ 12.4.028-76, впоследствии ГОСТ 12.4.041-89), который в качестве аналитического фильтра предполагал использование фильтров Петрянова [7]. На территории Беларуси принят ГОСТ 30342-96 "Системы вентиляционные. Методы испытания воздушных фильтров". Нормативную базу Российской Федерации пополнил ГОСТ Р 51251-99, гармонизированный с европейскими стандартами CEN EN 779-1993, CEN EN 1822-1998, который определяет следующие фильтрующие характеристики воздушных фильтров:

- начальное и конечное аэродинамическое сопротивление;
- размер частиц пыли;
- счетную и массовую концентрацию частиц;
- коэффициент проскока;
- производительность фильтра
- пылеемкость и эффективность очистки, а также класс фильтра.

В настоящее время идет разработка новых методов испытаний, их стандартизации, совершенствования системы классификации всех типов фильтров – от грубых до абсолютных и сверхэффективных. Наблюдается тенденция к созданию единых методов испытаний и международных стандартов. Так, "Европейский комитет по стандартизации" (CEN) разрабатывает и вводит общие стандарты для всей Европы, а организация "Eurovent" лидирует в разработке современных методов испытаний и стандартов, регламентирующих условия воздушной вентиляции в закрытых помещениях. В США "Общество инженеров по вентиляции и кондиционированию" (ASHRAE) разрабатывает и совершенствует стандарты на методы испытаний воздушных фильтров, в том числе с учетом вышеуказанных особенностей модельных фильтруемых сред.

Основное различие между американскими и европейскими методами испытаний заключается в выборе диапазона размеров частиц пыли, типа испытательного аэрозоля и системах классификации. Согласно стандарту Eurovent 4/5, фильтры подразделяются на классы от EU1 до EU9 в зависимости от средней эффективности по пыли и задержанию частиц без учета конечного перепада давления и расхода воздуха. Стандарт Eurovent 4/9 предусматривает испытание фильтров в вентиляционных системах по фракционной эффективности (частицы латекса), при этом средняя эффективность очистки для различных размеров определяется при разном конечном аэродинамическом сопротивлении. Стандарт ASHRAE 52.2P (США) устанавливает метод испытания воздухоочистительных устройств общей вентиляции по критерию эффективности очистки в зависимости от размера частиц.

Методы испытаний высокоэффективных (HEPA) и сверхвысокоэффективных (ULPA) фильтров определены стандартом CEN EN 1882, разработанном на основе немецкого стандарта DIN 24183. Фильтры подразделяются на 8 классов: H10... U17 (H означает HEPA, U – ULPA) в зависимости от эффективности очистки по отношению к наиболее проникающим частицам в пределах 0,10...0,25 мкм. Испытания ULPA-фильтров с эффективностью улавливания частиц размером 0,1...0,2 мкм в пределах 99,999...99,9999 % производятся с ис-

пользованием оборудования, счетчиков частиц и методов расчета по стандарту IES-RP-CC007.1. В российском ГОСТе Р 51251-99 фильтры подразделяются на 4 класса: грубой и тонкой очистки, высокой и сверхвысокой эффективности, причем данный стандарт не устанавливает методы испытаний. Таким образом, для определения класса фильтра по ГОСТ Р 51251-99 следует уточнить методы испытаний и типы испытательного оборудования, гармонизировав их с европейскими или международными стандартами.

В результате испытаний требуется получить реалистичную оценку эффективности фильтра в условиях эксплуатации. Изменение состава аэрозолей в процессе испытаний неизбежно сказывается на результатах. Опыт показывает, что параметры лабораторных аэрозолей (размеры и заряд частиц, степень агломерации) могут в значительной степени отличаться от существующих в условиях эксплуатации фильтров. Для сравнения информативности методов испытаний необходимо иметь стандартные тест-фильтры. Образцами "стандартного фильтра" можно считать фильтры, удовлетворяющие следующим требованиям: широкая область применения, безопасность эксплуатации, стабильность эксплуатационных свойств при работе с аэрозолями, в том числе под давлением [8]. Большая группа требований касается выбора тестового загрязнителя, прежде всего по природе частиц и их распределению по размерам. Анализ аэрозолей осуществляют методами гравиметрии, микроскопии и др. Чаще всего частицы аэрозоля отбирают по их аэродинамическому диаметру с использованием специальных пробоотборников. Если испытания проводят с использованием цветных или флуоресцирующих аэрозолей, для их анализа применяют флуорометрию или колориметрию.

Известно применение оптических счетчиков, реагирующих на рассеяние света частицами аэрозоля, в отличие от фотометров, которые измеряют интенсивность рассеянного света, проходящего через аэрозоль. Испытания с использованием крупнодисперсных аэрозолей лучше проводить в условиях, позволяющих устранить потери частиц из-за осаждения [6]. Скорость прохождения аэрозоля через разные участки фильтра должна быть одинаковой. Крепление фильтра в стенде должно быть герметичным, чтобы предотвратить неконтролируемые утечки. В табл. 1 дана характеристика традиционно применяемых тестовых загрязнителей.

Схемы устройств, используемых для испытаний воздушных фильтров (на примере волокнистых фильтроматериалов Петрянова и альтернативных им melt-blown фильтроматериалов, предназначенных для комплектации средств индивидуальной защиты органов дыхания – СИЗОД), представлены в работах [1, 5, 7]. При фильтрационных испытаниях сравнивают параметры аэрозоля, прошедшего и не прошедшего через фильтр. Существует два основных метода такого сравнения. Согласно первому, аэрозоль непрерывно проходит через фильтр, а его параметры регистрируют путем анализа проб, отбираемых с использованием дозаторов до и после фильтра. Согласно второму, анализ проводят, последовательно пропускаая аэрозоль через фильтр и мимо него через обводной канал.

Загрязнители, применяемые при фильтрационных испытаниях (по данным [6])

Загрязнитель	Диапазон размеров, мкм	Примечания
Стеклянные сферы	10-20 и более	Для жидкостных фильтров общего назначения
Песок	40-100	Природный песок
Тестовый песок (кварц)	1 или 1-100	Сортированный песок То же
Оксид железа	0,5-5	–
Хлопковый пух	До 50000	–
Оксид алюминия	5-10 для Aloxite 90 10-20 для Aloxite 225	–
Метиленовый голубой	0,01-1,3	Только для высокоэффективных воздушных фильтров
Хлорид натрия	В среднем 0,58	То же
Диоктилфталат	В среднем 0,3	Только для воздушных фильтров
Углерод	0,01-0,1	Для компрессионных щелевых фильтров и других типов субмикронных фильтров

Первый метод удобнее для испытаний фильтров непосредственно на месте их изготовления или эксплуатации, второй – для лабораторных испытаний, хотя каждый имеет специфические проблемы. Общее требование к обоим методам состоит в том, чтобы концентрация испытательного аэрозоля не менялась со временем, даже если (в первом случае) одновременно не используются оба дозатора или (во втором) переключение перепускного вентиля производится с разной скоростью.

В методе с двумя дозаторами разница в скорости отбора проб не должна в значительной степени сказываться на результатах. Если фильтр не однороден, необходимо, чтобы аэрозоль после него был должным образом перемешан. Перемешиванию способствует создание турбулентности в потоке аэрозоля, например, с использованием вспомогательного вентилятора.

Существует альтернативный подход, который не требует вторичного перемешивания аэрозоля и позволяет использовать тест также для оценки локальных утечек. В этом случае зонд для отбора проб подводят близко к фильтру с тем, чтобы аэрозоль, прошедший через разные части фильтра, не успел смешаться. Зонд должен быть достаточно малым, чтобы позволить точное определение утечки.

Основным показателем эффективности серийных разновидностей фильтров для СИЗОД является коэффициент проскока масляного тумана (аэрозоля) через образец фильтрующего материала. Коэффициент проскока представляет собой отношение концентрации масляного тумана, прошедшего через слой

фильтра, к первоначальной его концентрации. Концентрации определяют аэрозольным нефелометром: интенсивность света, рассеянного частицами масляного тумана, пропорциональна концентрации аэрозоля. В качестве модельного загрязнителя рекомендовано использовать масло турбинное марок Т30 и Т22 (ГОСТ 12.4.028-76). Методика позволяет определять коэффициент проскока в интервале от $5 \cdot 10^{-7}$ до 100 %.

Метод измерения сопротивления фильтра потоку воздуха (или аэродинамического сопротивления) предназначен для контроля качества фильтрующих материалов, состоящих из ультратонких волокон. Сопротивлением постоянному потоку воздуха называется разность давлений, возникающая на противоположных сторонах образца испытуемого материала при определенной скорости потока.

Для приёмо-сдаточного и технологического контроля листовых и рулонных фильтров устанавливают скорость потока воздуха 5 см/с (удельный объёмный расход – $0,3 \text{ л/мин} \cdot \text{см}^2$), для технологического контроля рулонных фильтрующих материалов в процессе производства – 10 см/с (удельный объёмный расход – $0,6 \text{ л/мин} \cdot \text{см}^2$). Допускается проводить измерения при температуре окружающей среды в пределах $15\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении в диапазоне от 735 до 785 мм рт. ст. Образец фильтра должен иметь размеры по длине и ширине не менее $100 \times 100 \text{ мм}$ или диаметр не менее 100 мм . Измеряют сопротивление потоку воздуха (R) в нескольких определенных местах (зонах) полотна, количество, длина и ширина которых определяются техническими условиями на фильтр.

При аэродинамическом сопротивлении фильтра менее $2,4 \text{ мм вод. ст.}$ измерения проводят на образцах, сложенных вдвое относительно поперечной (малой) оси подложкой (марлей) наружу. Измерения на образцах или полотнах с $R > 2,5 \text{ мм вод. ст.}$ и технологический контроль рулонных фильтрующих материалов в процессе производства проводят без сложения вдвое.

В работе [3] описан ряд методов определения фильтрационной способности, адаптированных к микрофильтрам. Для последних применяют такой параметр, как проницаемость или удельная производительность по отношению к фильтрату. Она представляет собой зависимость количества фильтрата, проходящего через единицу поверхности материала в единицу времени, от перепада давления на фильтре.

Проницаемость определяет срок службы материала микрофильтра – период до достижения предельно допустимого перепада давлений или объёма отфильтрованной среды. При использовании механического давления как движущей силы процесса установлено, что скорость фильтрования пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению.

Популярным способом испытаний является использование стендовых установок с пропускной способностью до $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ на основании ГОСТ 30342-96 "Системы вентиляционные. Методы испытания воздушных фильтров", с использованием которых определяют коэффициент пропускания пыли и удельную пылеемкость фильтра. Аппаратурное оформление таких стендов может быть различным. Так, российской компанией ООО "Инженерное Бюро ВИНДЭКО" разработан стенд для испытаний воздушных фильтров в соответствии со стандартом DIN 24185 "Испытания воздушных фильтров для систем вентиляции и кондиционирования". Указанный стандарт является переработанным изданием стандарта ASHRAE 52-76, получившего международное признание в качестве руководства по проведению испытания воздушных фильтров и явившегося основой для создания различных национальных стандартов. Стенд позволяет определить такие параметры фильтрующих материалов, как эффективность по атмосферной пыли, эффективность по синтетической пыли, аэродинамическое сопротивление (сопротивление потоку воздуха) и пылеемкость.

Заключение

Зная основные фильтрационные характеристики (аэродинамическое сопротивление, коэффициент проскока, пылеемкость, грязеемкость, класс фильтра и т.п.) фильтрующих материалов, можно корректно рекомендовать область их применения. Опыт авторов в области разработки полимерных волокнистых фильтров для СИЗОД показывает, что одним из факторов, повышающих эффективность фильтрования, является придание волокнам электростатического заряда [5]. В связи с тем, что производится зарядка волокон в вязко-текучем состоянии, полимер претерпевает ряд физико-химических превращений.

Анализ этих превращений в совокупности с методами анализа структуры успешно дополняет уже сложившиеся методы технической диагностики фильтров [9]. В первую очередь, речь идет об исследовании волокнистой структуры фильтров методами оптической и электронной микроскопии с последующим компьютерным анализом изображений. Во-вторых, немаловажной является оценка электрофизических свойств фильтров.

В ряд перспективных методов исследования волокнистых полимерных материалов выдвигается термоактивационная токовая спектроскопия [10]. В работах [1, 5] установлена взаимосвязь между диаметром волокон, плотностью их упаковки, поверхностной плотностью электростатического заряда, экспериментально полученным значениям коэффициента проскока аэрозоля и аэродинамического сопротивления.

С использованием полученных трехмерных диаграмм можно как предсказать коэффициент проскока и аэродинамическое сопротивление, непосредственно не измеряя их, так и оптимально подобрать фильтр с нужным набором служебных характеристик.

Литература

1. **Кравцов А.Г., Марченко С.А., Зотов С.В., Станкевич В.М., Наумов А.Д.** Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы. Гомель: БелГУТ. 2012. 319 с.
2. **Мухамеджанов Г.К.** Текстильные фильтрующие материалы для очистки воздушной среды: классификация и методы испытаний // Технический текстиль. № 9. 2004. С.26-27.
3. **Начинкин О.И.** Полимерные микрофильтры. М.: Химия, 1985. 216 с.
4. **Витязь П.А., Капцевич В.М., Кусин Р.А.** Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / Минск: НИИ ПМ с ОП, 1999. 304 с.
5. **Кравцов А.Г., Гольдаде В.А., Зотов С.В.** Полимерные электретыные фильтроматериалы для защиты органов дыхания. Гомель: ИММС НАНБ, 2003. 204 с.
6. **Rivers R.D., Murphy D.J.** Fluid filtration: Gas. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986. Vol. 1. P. 214.
7. **Петрянов И.В. и др.** Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М.: Знание, 1968. 78 с.
8. **Nicholson R.M.** Advances in Filtration and Separation Technology. Philadelphia: American Filtration Society, 1991. Vol. 4. P. 207.
9. **Кравцов А.Г.** Дополнительный анализ некоторых свойств полимерных волокнистых материалов, использующихся в системах очистки воздуха // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 7. С. 54-58.
10. **Способ** проведения термостимулированной токовой спектроскопии диэлектрических материалов: пат. 2210071 РФ, МПК7 G 01 N 25/18 / Кравцов А.Г., Шаповалов В.А., Зотов С.В., Гольдаде В.А.; заявитель ИММС НАН Беларуси. № 2001115134; заявл. 04.06.01; опубл. 10.08.03 // Официальный бюллетень "Изобретения" / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ. 2003. № 22.