

На основании анализа требований, предъявляемых к фильтрующим материалам, показано, что эффективность очистки газов можно значительно повысить путем дополнительного применения в процессе фильтрации электрического поля, обеспечивающего интенсификацию процессов фильтрации и реализацию дополнительных механизмов осаждения из газовой фазы различных веществ, включая ионы железа и других металлов, ультрадисперсные аэрозоли, дымы, туманы и т.п. Показано, что в воздушных фильтрах могут быть успешно использованы полимерные волокнисто пористые материалы, несущие электростатический заряд, а для интенсификации очистки газовых потоков от ультрадисперсных аэрозолей – высокопористые материалы на основе пеноникеля, используемые в качестве осадительных электродов в электростатических фильтрах. Разработан процесс регенерации фильтрующих волокнистых материалов, обеспечивающий сохранение основных фильтрующих характеристик и возможность их повторного применения для тонкой очистки воздуха. В последнем случае материал, подвергаемый дополнительному воздействию факторов процесса «melt-lowing», приобретает ряд свойств, способствующих повышению фильтрующей способности и при тонкой очистке воздуха.



Мирослав Викторович Тумилович  
Александр Геннадьевич Кравцов

# Повышение эффективности очистки воздуха от ультрадисперсных частиц

ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ



LAP  
**LAMBERT**  
Academic Publishing

**Мирослав Викторович Тумилович  
Александр Геннадьевич Кравцов**

**Повышение эффективности очистки воздуха от  
ультрадисперсных частиц**

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**Мирослав Викторович Тумилович  
Александр Геннадьевич Кравцов**

**Повышение эффективности  
очистки воздуха от  
ультрадисперсных частиц  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ**

FOR AUTHOR USE ONLY

**LAP LAMBERT Academic Publishing RU**

## **Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Publisher:

LAP LAMBERT Academic Publishing

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd., member of the OmniScriptum S.R.L  
Publishing group

str. A.Russo 15, of. 61, Chisinau-2068, Republic of Moldova Europe

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-3-93068-9**

Copyright © Мирослав Викторович Тумилович,  
Александр Геннадьевич Кравцов

Copyright © 2021 Dodo Books Indian Ocean Ltd., member of the  
OmniScriptum S.R.L Publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

## СОДЕРЖАНИЕ

	с.
Введение	2
1. Основные принципы очистки газов от механических примесей	4
1.1. Особенности очистки воздуха от ультрадисперсных частиц и аэрозолей	10
2. Исследование возможности повышения эффективности очистки воздуха с помощью фильтроэлементов из электретенных волокон	29
3. Исследование возможности повышения эффективности осаждения высокодисперсных частиц в высокопористых материалах в электрическом поле	36
4. Исследование возможности применения полимерных волокнистых фильтрующих материалов, прошедших регенерацию, для тонкой очистки воздуха	50
4.1. Методы исследований	50
4.2. Результаты исследований процесса регенерации полимерных волокнистых материалов и их обсуждение	51
Заключение	56
Список литературы	58

FOR AUTHOR USE ONLY

## Введение

Под воздействием природных процессов (пыль, образующаяся в результате эрозии почвы, выветривания горных пород, космического происхождения, пыльца из пор растений и т.д.), и в результате деятельности человека происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, в том числе воды и воздуха, которое приводит к нежелательному изменению их состава в результате поступления в него различных газов, водяного пара и высокодисперсных частиц аэрозолей.

Примерно 10 % загрязнителей попадают в атмосферу вследствие таких природных процессов, как, например, вулканические извержения, которые сопровождаются выбросами в атмосферу пепла, распыленных кислот, в том числе серной, и множества ядовитых газов. Кроме того, основными источниками серы в атмосфере служат брызги морской воды и разлагающиеся растительные остатки. Также следует отметить лесные пожары, в результате которых образуются плотные клубы дыма, обволакивающие значительные площади, и пыльные бури. Присутствующие в воздухе микроорганизмы (пыльца, плесневые грибы, бактерии, вирусы) вызывают у многих людей приступы аллергии и инфекционные заболевания [1].

Остальные 90 % загрязнителей имеют антропогенное происхождение. Основными их источниками являются: сжигание ископаемого топлива на электростанциях (выбросы дыма) и в двигателях автомобилей; производственные процессы, не связанные со сжиганием топлива, но приводящие к запылению атмосферы, например вследствие эрозии почв, добычи угля открытым способом, взрывных работ, утечки через стыки труб на нефтеперегонных и химических заводах и из реакторов; хранение и утилизация твердых отходов; а также разнообразные смешанные источники. Производственная деятельность многих отраслей промышленности связана с выделением аэрозолей и последующим улавливанием тонких частиц. Такие процессы имеют место, например, при производстве наполнителей и полимеров, порошкообразных пигментов и химикатов, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, при плавке цветных и редких металлов. Тонкодисперсная пыль, проникая в альвеолы легких, вызывает различного рода заболевания – пневмокониозы. Например, при работе в атмосфере, содержащей пыль диоксида кремния, у работающих развивается одна из тяжелых форм пневмокониоза – силикоз, а воздействие пыли бериллия вызывает очень тяжелое заболевание – бериллиоз [2].

Воздействие пыли на человека зависит от ее токсичности, дисперсности и концентрации в воздушной среде. Нетоксичная пыль обычно оказывает раздражающее действие на слизистые оболочки человека, а при попадании в легкие – к возникновению специфических заболеваний.

В связи с повышением требований к качеству очистки газов быстро расширяется применение фильтровальных аппаратов, в которых пыль отделяется путем пропускания газа (воздуха) через пористые перегородки из различных фильтрующих материалов. Фильтры используют чаще, чем другие устройства, в случаях, когда концентрация пыли на выходе из аппарата не должна превышать  $50 \text{ мг/м}^3$ , либо если требуется улавливать ценные порошкообразные продукты.

Кроме того, проблема очистки воздушного потока напрямую связана с защитой органов дыхания персонала, работающего в условиях запыленности (задымленности, загазованности). Для этих целей применяют специальные инструменты – средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). В настоящее время наиболее распространены 2 основных вида таких средств СИЗОД – противогазы и респираторы. Использование противогазов, как правило, оправдано в жестких условиях, в то время как в обычной рабочей обстановке, где основным загрязнителем воздуха выступает пыль или дым, более распространено применение респираторов. Действие респираторов основано на процессах фильтрации, сопровождающихся сорбцией присутствующих в воздухе загрязнений, в связи с чем респираторы отличаются по типу фильтрующей среды и/или сорбента.

В связи с вышеизложенным, цель настоящей работы – теоретически и экспериментально исследовать основные закономерности процесса очистки воздушных потоков от ультрадисперсных частиц в волокнисто-пористых материалах, несущих электретный заряд, а также в высокопористых материалах в условиях действия электрического поля при различных скоростях потока. В монографии рассмотрены некоторые физические и материаловедческие аспекты функций, реализуемых фильтрующими материалами, в результате чего разработано производство новых видов респираторов для защиты органов дыхания человека, а также электростатических фильтров с повышенной эффективностью очистки от ультрадисперсных частиц.



## 1. Основные принципы очистки газов от механических примесей

Для очистки воздуха и других газов от механических примесей используются самые различные физические силы и средства: гравитационные силы, инерционные силы, центробежные силы, силы электрического взаимодействия заряженных частиц, капиллярные силы, а также фильтрующие перегородки с соответствующим размером пор. При этом эффективность использования указанных сил и перегородок различна в различных областях дисперсного состава загрязнений. В частности, инерционные и гравитационные силы достаточно эффективны для отделения крупных фракций загрязнений (частиц размером более 100 мкм); использование центробежных сил даёт возможность эффективно очистить газовый поток от твердых частиц размером от 10 до 100 мкм и жидких частиц (капель) размером от 5 до 100 мкм; для отделения из газового потока частиц размером менее 5 мкм обычно рекомендуют фильтрующие перегородки из пористых порошковых материалов [3]. Разумеется, названные границы использования тех или иных физических сил для отделения частиц загрязнений достаточно условны и, как правило, зависят от совершенства конструкций очистительных устройств (ловушек, циклонов, фильтров, их комбинаций и т.п.).

Процесс фильтрации в общем случае может быть охарактеризован как протекание дисперсной системы – газа или жидкости, загрязненных частицами в твердом или жидком фазовом состоянии – через некоторую пористую перегородку, сопровождающийся оседанием частиц загрязнений на перегородке с одновременным пропуском через поры очищенной дисперсионной среды.

Очистка газовых потоков с использованием макросил (инерционных, гравитационных, центробежных и т.п.) от частиц размером менее 1 мкм становится малоэффективной, а для частиц размером менее 0,1 мкм – практически невозможной т.к. физическая природа движения частиц в значительной степени определяется законами действия микросил (броуновское движение, турбулентные пульсации и т.п.). В этих условиях основным средством очистки газов от тонкодисперсных загрязнений становятся фильтрующие устройства различных конструкций.

Отделение механических примесей из воздуха представляет собой процесс разделения фаз «твердые частицы – газ». Он осуществляется в фильтре, разделенном пористой перегородкой на две камеры – загрязненного и очищенного газа. В качестве пористых перегородок могут быть использованы

волокнистые тканые и нетканые материалы, насыпной слой и пористые порошковые материалы.

Эффективность осаждения частиц в начальный период работы фильтра (когда волокнистый материал, ткань или зернистый слой еще чистые) невелика из-за относительно крупных пор в фильтрующей перегородке. Осаждение происходит за счет непосредственного касания частиц пыли волокон (нитей) или зерен фильтрующей перегородки, действия сил инерции, диффузии и электростатического притяжения. В этот период на лобовой поверхности пористого слоя образуются островки пыли, которые в волокнистых фильтрах постепенно смыкаются в сплошной, но еще тонкий слой. В принципе такой слой становится непроницаемым для вновь набегающих на пористую перегородку частиц, и теоретически эффективность фильтра должна быть равной 100 %. Однако абсолютная эффективность очистки в рукавных фильтрах не достигается по двум основным причинам: вследствие микровибрации фильтрующего материала и вследствие образования трещин и пустот в пылевом слое при регенерации. Эти причины обуславливают проникновение пыли в зону очищенного газа в режиме фильтрации.

Особенно характерны прорывы запыленного газа для фильтров с насыпным слоем, а также с жесткими пористыми материалами, что не позволяет идеально очищать в них газ.

Рисунок 1.1 иллюстрирует взаимосвязь процессов фильтрации и размеров загрязнений. Очевидно, что главенствующая роль в обеспечении фильтрации принадлежит пористому фильтру (фильтроэлементу – ФЭ), поскольку эффективность захвата дисперсных загрязнений при прочих равных условиях и свойствах фильтруемой среды обусловлена:

- 1) параметрами пористой системы (размерами пор);
- 2) свойствами элементов структуры перегородки, ограничивающих поры.

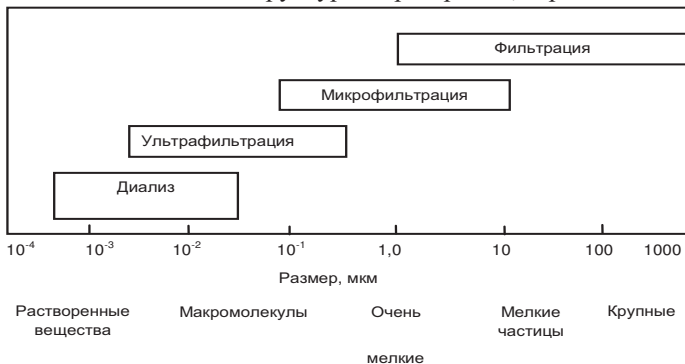


Рисунок 1.1 – Наиболее распространенные процессы фильтрации [4]

На рисунке 1.2 представлен вариант классификации материалов, традиционно используемых в промышленных фильтрационных и микрофильтрационных (при наличии загрязнений микронных размеров) процессах.

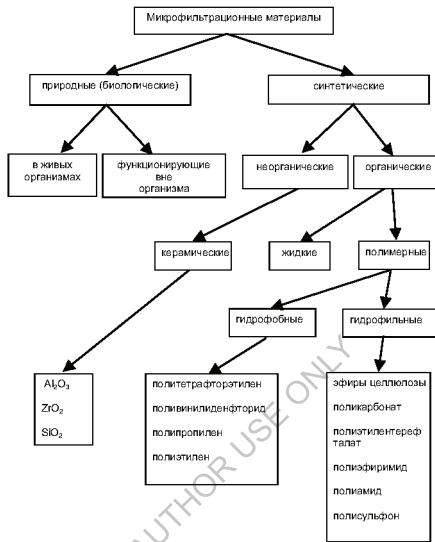


Рисунок 1.2 – Схематическая классификация материалов, предназначенных для микрофильтрации [5]

Физической основой очистки загрязненных газовых потоков с использованием ФЭ является механическая задержка тонкодисперсных частиц в порах этих элементов. Основное соотношение, определяющее расход  $V$  газового потока через пористые фильтрующие перегородки имеет вид [6].

$$V = \frac{\Delta P}{R_0 + h + t}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta P$ – перепад давления на пористой фильтрующей перегородке;

$R_0$ – сопротивление движению газового потока через не загрязненную пористую перегородку;

$h$ – удельное сопротивление накапливающихся в порах частиц загрязнения;

$t$  – время работы фильтрующей перегородки.

Из приведенного соотношения видно, что с течением времени работы фильтрующей перегородки, ее общее сопротивление возрастает. Это приводит к снижению фильтрующей способности перегородки  $V$  (снижению расхода) и к заметному возрастанию перепада давления  $\Delta P$ . Первое из них нарушает технологический процесс очистки газового потока, а второе создает условия механического разрушения перегородки. В тот момент, когда оно достигнет заранее заданного оптимального значения, включается система регенерации, и пыль сбрасывается в бункер. При этом, однако, гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки не снижается до уровня сопротивления чистого материала. Снизить гидравлическое сопротивление фильтрующей системы до уровня чистого материала практически невозможно; значительно понижать это сопротивление вообще нецелесообразно, так как сразу после регенерации имеет место повышенный проскок пыли. По мере запыления сопротивление вновь возрастает. При этом становится вполне понятным стремление замедлить этот процесс. Одним из средств в этом направлении является устранение накопления в порах частиц достаточного крупных размеров особенно соизмеримых с размером самих пор, что достигается в устройствах, где обеспечивается последовательное использование различных механизмов очистки.

Изложенное свидетельствует, что высокоэффективная очистка газов от загрязнений с помощью ППМ является весьма сложной технической задачей, решение которой в настоящее время требует проведения специальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Основной технологический показатель работы воздушных фильтров – степень очистки (эффективность) улавливания пыли и других механических частиц [3]. О степени очистки  $\eta$  судят по отношению массы уловленной пыли к общему ее количеству, поступающему в аппарат. Эффективность работы фильтра характеризуется одновременно и остаточной запыленностью, так как даже очень высокая степень очистки (порядка 99 %) еще не гарантирует соблюдения санитарных норм при значительной входной запыленности. К технологическим параметрам работы фильтра относятся: производительность или пропускная способность  $V$  или  $Q$ , входная  $Z_{вх}$  и остаточная  $Z_{ост}$  запыленность, удельная газовая нагрузка при фильтровании  $q$  или скорость фильтрования  $\omega$ , гидравлическое сопротивление  $\Delta p$  и др. В соответствии с этим для оценки фильтра в первую очередь должны быть определены аэродинамическая характеристика, пылеемкость и эффективность очистки. Эти

три тесно связанные между собой характеристики являются важнейшими и, располагая ими, невозможно оценить, насколько те или иные фильтры отвечают требованиям и условиям эксплуатации проектируемого объекта.

Основные требования, предъявляемые к промышленным фильтрам для очистки воздуха: высокая степень очистки, максимальная производительность и пылеемкость, длительность периода между регенерациями [7]. Данные показатели напрямую зависят от структурных, гидравлических и физико-механических свойств фильтра, связаны между собой, а также зависят от режима течения газа.

По степени увеличения эффективности очистки можно составить следующий ряд материалов [6]: 1) нетканые фильтровальные материалы из полимерных и металлических волокон; 2) иглопробивные волокнистые материалы; 3) тканевые фильтры из различных по плотности и толщине материалов; 4) нетканые волокнистые маты из синтетических и естественных волокон: асбестовые, стеклянные, пластмассовые, целлюлозные, кварцевые, из минеральной ваты и т.п., в смеси и в отдельности, с пропиткой и без; 5) высокоэффективные тонковолокнистые материалы в виде фильтровальных бумаг и картонов (с пропиткой или без пропитки, из синтетических волокон, базальтовых, стеклянных, асбестовых, целлюлозных и различных смесей). Приведенная классификация является достаточно условной, т.е. эффективность материалов зависит от многих факторов, например, природы частиц загрязнителя, диаметра волокон, материала, способа изготовления и т.п. Производительность очистки зависит от коэффициента проницаемости материала, степень очистки – от размера пор, пылеемкость – от пористости, извилистости поровых каналов, толщины ФЭ и др. Таким образом, регулируя размеры частиц порошков и волокон, их форму и удельную поверхность можно добиться достижения необходимых параметров очистки воздуха от механических примесей.

Следует отметить, что исторически сложилось представление о том, что близким к оптимальному вариантом фильтрующего материала для очистки воздуха является волокнисто-пористая система. Она может быть сформирована как на основе природных волокон (целлюлоза, вискоза и т.п.), так и путем технологической переработки синтетических волокнообразующих полимеров (полиолефины, полиамид, полиэтилентерефталат, полисульфоны, политетрафторэтилен и т.п.). В работе [8] предложено следующее разделение волокнисто-пористых полимерных материалов:

- 1) неупорядоченные волокнистые материалы (вата);

2) нетканые слоистые материалы из волокон (демпфирующие и изолирующие прокладки, фильтровальные слои, прошивные нетканые материалы, войлок, бумага);

3) крученые изделия (канаты, шпагат, шнуры, одиночные крученые нити);

4) композиционные материалы (армированные волокнами пластики, текстолиты и т.п.);

5) резиновые изделия с волокнистым тканевым каркасом.

Материал волокнисто-пористого фильтра обычно может быть охарактеризован как:

– система пор (капилляров), тем или иным способом распределенных в матрице;

– совокупность соединенных тем или иным образом частиц;

– система изотропных слоев ультратонких волокон, тем или иным способом взаимодействующих друг с другом.

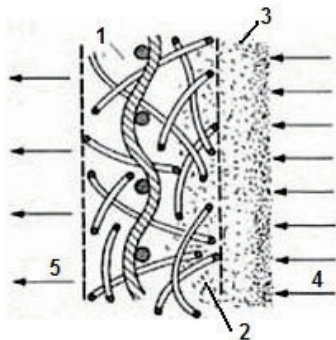
Нередко в фильтрующих материалах присутствует комбинация всех перечисленных признаков.

В зависимости от химической природы полимера и технологии изготовления волокон диаметр последних может составлять от долей до нескольких десятков и даже сотен микрометров. Пространство между волокнами или частицами представляет собой поры (сквозные каналы), которые могут сильно различаться между собой по длине и поперечному сечению. Конфигурация пор определяет уровень проницаемости волокнистых фильтров для дисперсионной среды и то, какие частицы дисперсной фазы могут быть задержаны «сеткой», образуемой волокнами. Волокна всегда находятся в контакте между собой, что в большинстве случаев желательно, поскольку обеспечивает конструктивную определенность волокнистого материала и формоустойчивость изделий на его основе.

С целью снижения потерь давления и увеличения пылеемкости волокнистые, бумажные и фетровые фильтры часто выполняются в изогнутой форме для получения большей фильтрующей поверхности в небольшом пространстве. Обычно эти ФЭ калиброваны так, чтобы падение давления не превышало 500 Па (или 50 мм водяного столба).

Чтобы достичь лучшего качества воздуха, а также продлить срок службы ФЭ также применяют сочетания этих фильтров, устанавливая их последовательно: сначала предварительный фильтр, затем фильтр тонкой очистки, микрофильтр и, наконец, фильтр на основе активированного угля и т.п.

Схема фильтра грубой очистки воздуха приведена на рисунке 1.3.



1 – среда фильтра, 2 – слой проникнувшей пыли, 3 –поверхностный слой пыли, который необходимо очистить, 4 – вход воздуха, 5 – выход воздуха

Рисунок 1.3 – Схема фильтра грубой очистки воздуха [1]

### 1.1. Особенности очистки воздуха от ультрадисперсных частиц и аэрозолей

Для очистки пылегазовых потоков, отделения сварочных и других ультрадисперсных аэрозолей также могут применяться различные фильтрующие материалы. Большие количества вредных аэрозолей с отходящими производственными и вентиляционными выбросами поступают как в цеха, так и в воздушный бассейн, загрязняя окружающую среду. Небольшие аэрозольные частицы, обладающие малой скоростью витания, представляют серьезную гигиеническую опасность, т.к. вызывают заболевания органов дыхания, зрения, кожного покрова и внутренних органов человека. Например, при проведении сварочных работ в производственных помещениях, мы нередко сталкиваемся с проблемой концентрации на рабочем месте сварочного дыма. Особенно актуальна эта проблема в осенне-зимний период, когда нет возможности проветривать помещение. Общеобменная вентиляция зачастую не справляется с удалением дыма, а также окалина, образующейся при сварке, в полном объеме. Да и строго говоря, общеобменная вентиляция не предназначена для решения подобных задач. Для этих целей с успехом можно применять СИЗОД.

В газообразных промышленных выбросах вредные примеси можно разделить на две большие группы [9]:

– взвешенные частицы (аэрозоли) твердых веществ – пыль, дым; жидкостей – туман;

– газообразные и парообразные вещества.

К аэрозолям относятся взвешенные твердые частицы неорганического и органического происхождения, а также взвешенные частицы жидкости (тумана). Пыль – это дисперсная малоустойчивая система, содержащая больше крупных частиц, чем дымы и туманы. Счетная концентрация пыли (число частиц в  $1 \text{ см}^3$ ) мала по сравнению с дымами и туманами. Неорганическая пыль в промышленных газовых выбросах образуется при горных разработках, переработке руд, металлов, минеральных солей и удобрений, строительных материалов, карбидов и других неорганических веществ. Промышленная пыль органического происхождения – это, например, угольная, древесная, торфяная, сланцевая, сажа и др. К дымам относятся аэродисперсные системы с малой скоростью осаждения под действием силы тяжести. Размеры частиц в дымах много меньше, чем в пыли и туманах, и составляют от 5 мкм до субмикронных размеров. Туманы состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации паров или распылении жидкости. В промышленных выхлопах туманы образуются главным образом из кислоты: серной, фосфорной и др. Вторая группа – газообразные и парообразные вещества, содержащиеся в промышленных газовых выхлопах, гораздо более многочисленна. К ней относятся кислоты, галогены и галогенопроизводные, газообразные оксиды, альдегиды, кетоны, спирты, углеводороды, амины, нитросоединения, пары металлов и многие другие компоненты газообразных промышленных отходов.

В настоящее время, когда безотходная технология находится в периоде становления и полностью безотходных предприятий еще не существует, основной задачей очистки газовых потоков является доведение содержания токсичных веществ в газовых примесях до предельно допустимых концентраций, установленных санитарными нормами.

В соответствии с характером вредных примесей различают методы очистки газов от аэрозолей и от газообразных и парообразных примесей. Все способы очистки газов определяются в первую очередь физико-химическими свойствами примесей, их агрегатным состоянием, дисперсностью, химическим составом и др. Разнообразие вредных примесей в промышленных газовых выбросах приводит к большому разнообразию методов очистки, применяемых реакторов и химических реагентов, но наибольшее распространение получили два метода: фильтрация и электрофильтрация. Рассмотрим два этих метода более подробно.

*Фильтрация.* Как отмечалось ранее, основана на прохождении очищаемого газа через различные фильтрующие материалы. Рассмотрим процесс фильтрации аэрозолей волокнистыми фильтрами. Такие фильтры



характеризуются большим периодом накопления уловленных частиц, которые распределяются по всей толщине фильтрующего слоя.

Основными параметрами, влияющими на процесс фильтрации аэрозолей волокнистыми фильтрами, являются размер частиц аэрозоля, скорость потока, диаметр волокон, суммарная поверхность волокон и плотность их упаковки. Рассмотрим более подробно данные параметры.

Среди механизмов захвата частиц загрязнителя волокнисто-пористым фильтрующим материалом основными являются касание, инерционный захват, диффузия, ситовой эффект, гравитационное, электростатическое и магнитное осаждение [10]. Преобладание того или иного механизма определяется параметрами фильтруемой среды и структурой фильтра. Принято считать, что частицы диаметром менее 0,3 мкм осаждаются преимущественно за счет диффузии, крупные с размером более 20 мкм улавливаются в основном путем касания, инерционного захвата, гравитационного осаждения и ситового эффекта [9].

Инерционный захват происходит, когда частица движется в потоке среды в обход препятствия (структурного элемента фильтрующей перегородки), но отклоняется от общего направления потока и сталкивается с препятствием. Вероятность инерционного захвата тем выше, чем больше размеры частиц загрязнителя. В свою очередь, интенсивность инерционного захвата растет с усилением взаимодействий в системе частица–волокно.

Гравитационное осаждение частиц загрязнения происходит под действием сил тяжести.

Ситовой эффект состоит в задерживании пористой перегородкой крупных частиц, размеры которых превышают размер пор. Фильтр можно представить как «экран», который препятствует проникновению крупных частиц загрязнителя, но не течению дисперсионной среды. Ситовой эффект не играет решающей роли при тонкой очистке. Размеры частиц многих токсичных аэрозолей составляют десятые и сотые доли микрометров, и при их улавливании основную роль играют другие механизмы.

Касание, или прямой захват, происходит, когда частица приблизится к препятствию на расстояние, меньшее ее размера. Прилипание и удерживание частицы волокнами осуществляется посредством ван-дер-ваальсовых сил.

Диффузионное осаждение характерно для частиц с размерами менее 1 мкм, которые в результате броуновского движения могут осесть на перегородке из-за случайного отклонения от направления течения дисперсионной среды.

Преобладание того или иного механизма осаждения определяется параметрами фильтруемой среды, размерами частиц загрязнителя и условиями

фильтрации. На рисунке 4 приведена схема осаждения частиц на единичном волокне в случае, когда основными механизмами являются инерционный захват, касание и диффузия. При разработке фильтра конкретного технического назначения необходимо представлять, какие механизмы осаждения могут быть задействованы с наибольшей эффективностью.

По принципу взаимодействия фильтрующего материала и частиц загрязнений различают поверхностное и объемное (глубинное) фильтрование [10]. Поверхностное фильтрование происходит в основном благодаря прямому захвату и ситовому эффекту. Частицы с размером большим, чем размеры входных отверстий фильтрующей перегородки, задерживаются на поверхности. Частицы меньшего размера могут задерживаться в этих отверстиях. Адсорбционные взаимодействия между частицами и волокном обычно незначительны по величине. Простейший «механический» фильтр действует по принципу поверхностного фильтрования, удовлетворительно обеспечивая грубую очистку. При длительной эксплуатации фильтра поверхностного типа возникают два эффекта. Вначале происходит постепенное уменьшение эффективного размера пор вследствие их «засорения» частицами загрязнителя (рисунок 1.5, а). Впоследствии на поверхности фильтра постепенно формируется слой частиц загрязнителя (рисунок 1.5, б). Результатом является «блокирующий эффект» и, как следствие, повышение способности фильтра к захвату уже более мелких частиц за счет интенсификации действия адсорбционных сил.

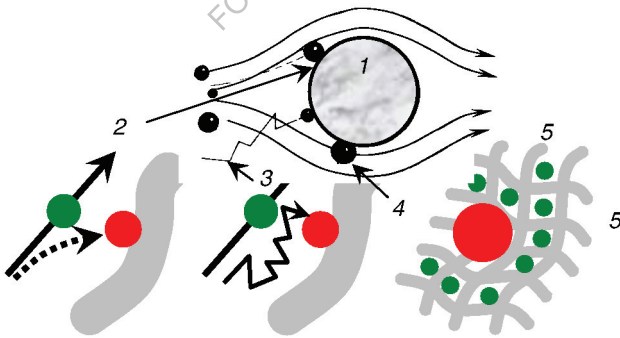


Рисунок 1.4 – Механизмы осаждения частиц на волокнах [11, 12]:  
 1 – единичное волокно; 2 – инерционный захват; 3 – диффузия;  
 4 – касание (прямой захват); 5 – ситовой эффект

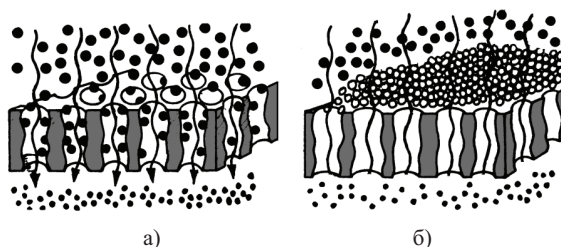


Рисунок 1.5 – Особенности процесса фильтрации [10]:

а – блокирующий эффект мелких частиц, удерживаемых фильтром при объемном фильтровании; б – формирование слоя уловленных частиц на поверхности фильтра при поверхностном фильтровании

Механизм объемного фильтрования более сложен, поскольку в глубине фильтра реализуются возможности улавливания частиц, напрямую зависящие от структуры фильтрующего материала. Как правило, крупные частицы захватываются поверхностными слоями, мелкие – глубинными. Объемный фильтр характеризуется значительным перепадом давления, но его фильтрационная способность выше, чем поверхностного, что обусловлено высокой вероятностью инерционного захвата. Фильтрационная способность главным образом зависит от диаметра волокон: чем тоньше волокна, тем плотнее они могут быть упакованы и тем меньше окажется путь свободного прохождения частиц загрязнителя. Роль также играют аэро- и гидродинамические явления в системе.

Однако существуют частицы такого размера, которые почти полностью не улавливаются ни тем, ни другим механизмом. Такие частицы называются максимально проникающими. Поэтому возникает необходимость применения специальных методов фильтрации, в особенности – полидисперсных аэрозолей. Одним из таких методов является селективное улавливание. При последовательном прохождении аэрозоля через два одинаковых фильтра коэффициент проскока второго фильтра будет больше, чем первого. В связи с этим второй фильтр необходимо выполнять с другими характеристиками.

Увеличение скорости снижает эффект диффузионного механизма улавливания, но, начиная с определенной скорости газа должен расти инерционный эффект: размер максимально проникающих частиц с ростом скорости должен уменьшаться [6]. Размер наиболее проникающих частиц для фильтров со средним диаметром волокон, лежащим в диапазоне  $d_f = (0,15 - 10)$  мкм и для скорости фильтрации  $U_0 = (0,5 - 20)$  м/с можно оценить из аппроксимационного выражения [9]:

$$r_{p \min} = 0,19U_0^{-0,24}d_f^{0,4}, \quad (1.2)$$

где  $r_{p \min}$  – размер наиболее проникающих частиц, мкм;

$U_0$  – скорость фильтрации, м/с;

$d_f$  – средний диаметр волокон, мкм.

В соответствии с рассмотренными выше механизмами осаждения частиц на волокнистом фильтре зависимость коэффициента захвата от размера частиц должна иметь минимум, так как с увеличением диаметра волокон вероятность диффузионного осаждения уменьшается, а вероятность инерционного осаждения увеличивается, при этом диапазон размеров, для которых существенен тот или иной механизм шага не перекрывается. Типичный ход кривых зависимостей эффективности осаждения от радиуса частиц представлен на рисунках 1.6 и 1.7.

Чем крупнее волокна фильтра, тем при меньших скоростях потока будет наблюдаться максимум проскока. В фильтрах стараются применять более тонкие волокна, т.к. при этом эффект осаждения за счет всех механизмов захвата возрастает. Так, при уменьшении диаметра волокон с 50 до 1 мкм для частиц размером 1,3 мкм проскок снижается приблизительно в 2000 раз [6].

На рисунке 1.6 показана зависимость эффективности очистки волокнистых фильтров с различным диаметром волокон [13]. Как видно из этого рисунка, существует точка явного минимума и размер наиболее проникающих частиц смещается в большую сторону с повышением диаметра волокна.

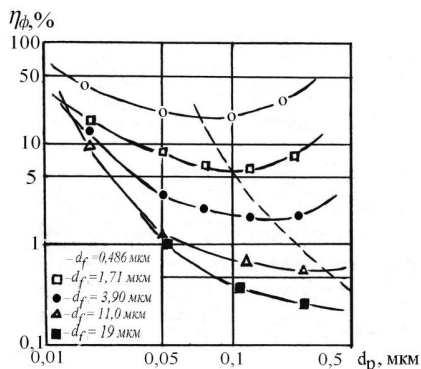
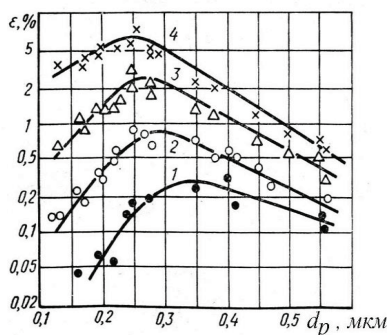


Рисунок 1.6 – Эффективность очистки волокнистыми фильтрами с различным диаметром волокон ( $U_0 = 0,2$  м/с)

На рисунке 1.7 показана зависимость проскока частиц от размера частиц при различной скорости потока [3].



1 – скорость потока 0,094 см/с; 2 – 0,21 см/с; 3 – 0,42 см/с; 4 – 0,94 см/с

Рисунок 1.7 – Процент проскока через волокнистые фильтры в зависимости от размера частиц при различной скорости потока

Из рисунка 1.7 видно, что наиболее трудно осаждаемыми являются частицы размером 0,25–0,35 мкм.

Эффективность очистки во многом определяется величиной суммарной поверхности волокон – чем выше суммарная поверхность, тем выше эффективность фильтрации. Примерно такое же влияние на эффективность очистки оказывает развитость структуры, т.е. взаимное расположение волокон. При более развитой структуре эффективность осаждения значительно выше [6].

С увеличением плотности упаковки  $\alpha$  (уменьшением пористости  $\Pi$ ) расстояние между волокнами уменьшается. При этом линии тока газа проходят ближе к волокнам, что в итоге снижает коэффициент проскока. В связи с тем, что повышение плотности упаковки резко увеличивает сопротивление фильтра, возникает необходимость решать проблему повышения проницаемости фильтра при сохранении его фильтрующей способности. Поэтому одной из основных задач при разработке фильтров является нахождение компромисса между двумя противоречивыми свойствами – проницаемостью и эффективностью (тонкостью) фильтрования.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для обеспечения высокоэффективной фильтрации аэрозолей волокнистые фильтры должны обеспечивать селективное улавливание, иметь минимальный диаметр волокон и максимальную плотность упаковки. Однако такие фильтры сложны в изготовлении, имеют большие габариты и недостаточно эффективны при фильтрации высокодисперсных аэрозолей. В связи с этим для повышения

эффективности фильтрации от ультрадисперсных аэрозолей применяют методы электрофильтрации.

*Электрофильтрация.* Частицы загрязнителей воздуха, особенно имеющие техногенное происхождение, обычно обладают электростатическим зарядом. Поэтому в реальной системе «частица – волокно» реализуются электростатические взаимодействия той или иной степени интенсивности. Поэтому наряду с касанием, гравитационным осаждением, инерционным и диффузионным захватом к числу основных механизмов фильтрования газовых сред относят электростатическое осаждение частиц загрязнений. Всегда имеет место неоднородность распределения частиц по размерам и по величине электрического заряда. Для учета этих факторов пылевидные частицы разделяют на три группы [14]:

1) с малым удельным электрическим сопротивлением (до  $10^2$  Ом·м), когда время разрядки слоя пыли небольшое и возможен выброс осажденной частицы обратно в газовый поток из-за мгновенной перезарядки;

2) с удельным сопротивлением  $10^2$ – $10^8$  Ом·м, время разрядки которых обуславливает образование минимального слоя пыли на фильтре;

3) с высоким удельным сопротивлением (более  $10^8$  Ом·м), трудноулавливаемые ввиду того, что слой пыли на фильтре действует как экран из-за значительного времени разрядки, в силу чего может реализоваться так называемая «обратная корона» и, как результат, резкое снижение степени очистки.

Эта классификация была впоследствии скорректирована с целью учета влияния адгезии на осаждение пыли [15]:

1) электрически активные пыли, при осаждении которых адгезионные силы превышают аутогезионные, вследствие чего в фильтре не происходит агрегация частиц (обожженные силикат и окись цинка, цемент, конверторная сажа, кукурузный крахмал, комовая глина);

2) электрически активные пыли, которые при адгезионном контакте разряжаются и могут образовывать прочные агрегаты (дымовые выбросы типа окиси цинка, сырой цемент, выбросы из никелеплавильных печей, магнезиты, хромовая руда, пшеничный крахмал, порошковый сахар, окись молибдена);

3) электрически неактивные пыли, не поддающиеся электрическому зарядению (сажа, двуокись кремния, каолиновая глина).

Следует учитывать, что в электрическом поле за счет действия кулоновских сил осуществляется захват не только заряженных, но и

нейтральных дисперсных частиц, приобретающих наведенный дипольный момент.

В настоящее время можно выделить две группы фильтров, использующих для повышения эффективности очистки электрическое поле: СИЗОД человека, использующие электростатический эффект полимерных волокон и электростатические осадители промышленного типа для улавливания и сепарации аэрозольных частиц.

В мире изготавливается значительный ассортимент СИЗОД. По некоторым из них получены и систематизированы результаты исследований зависимостей между структурой и фильтрационной способностью [16]. В наибольшей мере удовлетворить жестким требованиям к СИЗОД могут волокнисто-пористые материалы на основе синтетических полимеров. Заметным историческим этапом явилось освоение производства тонковолокнистых фильтров по растворной технологии (в СССР – фильтров Петрянова, ФП). Однако в связи с массовым переходом на международные экологические стандарты, касающиеся выпускаемой продукции и технологических процессов, наблюдается переход к безрастворным технологиям формирования полимерных волокон. Среди фирм, выпускающих средства индивидуальной защиты органов дыхания, наибольшей известностью пользуются «3М» («Minnesota Maining Manufacturing Company», США, имеет отделения во многих странах), «Du Pont Engineering Technology» (США), «Kimberly-Clark Corp.» (США), а также ряд предприятий СНГ – НПО «ИНКО» (Россия), НПО «Фильтр» (Украина), АО «НИЭП» (Россия), НТЦ «Тонкая очистка» (Россия), НПО «Неорганика» (Россия).

В Российской Федерации и на единичных предприятиях Казахстана и Украины в настоящее время выпускают 2 основных типа респираторов газопылезащитных со сменными патронами. Это марки респираторов РУ-60М (ГОСТ 17269-71) и РПГ-67 (ГОСТ 12.04.004-74). *Респираторы газопылезащитные РУ-60М и РПГ-67* (рисунок 1.8) предназначены для защиты органов дыхания от вредных газо- и парообразных веществ при концентрации их в воздухе до 10–15 ПДК и содержании кислорода не менее 18 об. %, а также от аэрозолей при концентрации не более 200 мг/м<sup>3</sup>. Респираторы газопылезащитные традиционно состоят из резиновой полумаски, двух сменных фильтрующе-поглощающих патронов, которые содержат специализированный поглотитель и противозащитный полимерный волокнисто-пористый ФЭ, полученный по растворной технологии. Основные характеристики газопылезащитных респираторов даны в таблице 1.1. Их разновидностью являются респираторы противоаэрозольные облегченные.

Таблица 1.1 – Эксплуатационные характеристики газопылезащитных респираторов РУ-60М и РПГ-67 [17]

НАЗНАЧЕНИЕ				
Марка респиратора		От чего защищает		
А		Органические газы и пары (бензол и его гомологи, бензин, спирт, галоидорганические соединения, нитро- и аминсоединения бензола и его гомологов, эфиры и т.п.)		
В		Кислые газы и пары (диоксид серы, сероводород, хлор, хлористый водород и т.п.)		
Г		Пары ртути, этилмеркурхлорид		
КД		Смесь аммиака и сероводорода		
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ				
Параметр		РУ-60М	РПГ-67	
Сопротивление постоянному потоку воздуха, Па (мм вод. ст.), не более		93 (9,5)	89 (9,0)	
Коэффициент проникания масляного тумана, %, не более		0,3		
Масса, г, не более		340	300	
ВРЕМЯ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ				
Марка респиратора	Наименование контрольного вещества	Концентрация контрольного вещества, мг/л	Время защитного действия, мин, не менее	
			РУ-60М	РПГ-67
А	Бензол	1,0	35	60
В	Диоксид серы	2	32	50
Г	Пары ртути	0,01	16 час	20 час
КД	Аммиак	2	20	30
	Сероводород	2	20	50

Бесклапанные легкие противопылевые респираторы ШБ-1 «Лепесток» – один из удачных и наиболее массовых типов изделий подобного назначения (рисунок 1.9). Респираторы серии «Лепесток» разработаны Физико-химическим институтом имени Л.Я. Карпова и Институтом биофизики Минздрава СССР и с 14 августа 1963 г. разрешены к эксплуатации Государственной санитарной инспекцией СССР. Респираторы «Лепесток» предназначены для предотвращения попадания в органы дыхания радиоактивных, токсических, бактериальных и других опасных аэрозолей, а также силикатной, цементной, угольной и прочей пыли, содержащейся в воздухе в опасных концентрациях.



«Лепесток» можно использовать при нахождении в помещении больных вирусными инфекциями, при работе с ядохимикатами и т.д. В конструкционном плане респираторы «Лепесток» (рисунок 1.9) представляют собой полумаску из проклеенной марли и ФП и состоят из:

- корпуса круглой формы 1 из волокнистого фильтрующего материала, помещенного между двумя слоями марли (наружный для жесткости проклеен);
- периферического кольца 2, которое выполняет функции обтюлятора, обеспечивающего плотное прилегание полумаски к лицу, и препятствует прониканию воздуха через сгибы маски;
- шнура 3, с помощью которого создается полусферическая форма респиратора и обеспечивается его плотное прилегание к лицу;
- алюминиевой пластинки 4, предназначенной для плотного обжатия верхнего края респиратора по форме переносицы человека;
- пластмассовой фигурной распорки 5, поддерживающей полусферическую форму респиратора и препятствующей контакту ФЭ с лицом;
- двух лямок 6, с помощью которых респиратор завязывается на голове.

Основным рабочим элементом респиратора является корпус, являющийся фильтром (фильтрующая поверхность – 240 см<sup>2</sup>) и полумаской (диаметр – 200 мм, масса – 10 г). Для улучшения работы в режиме «вдох–выдох» прилегающая к лицу поверхность ФЭ не закрыта марлей. Серийно выпускают три типа респираторов, одинаковых по конструкции, но предназначенных для различных условий эксплуатации – «Лепесток-200», «Лепесток-40» и «Лепесток-5» (основные технические характеристики приведены в таблице 2). Материалы ФПП-15 и ФПП-70, из которых выполнены ФЭ, представляют собой слои ультратонких волокон, полученные из растворов перхлорвинила. Респираторы характеризуются высокой эффективностью очистки воздуха при малом сопротивлении дыханию, обладают малым весом, практически не сокращают поля зрения, не снижают слышимость, не приглушают тонов разговорной речи. Благодаря эластичности ФЭ и обеспечения плотного прилегания к лицу респираторы могут быть использованы людьми с разными этнографическими типами лица.

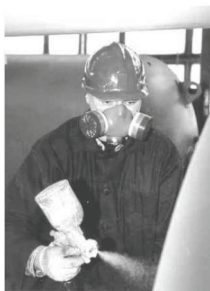


Рисунок 1.8 – Применение респиратора РУ-60М при распылении порошков

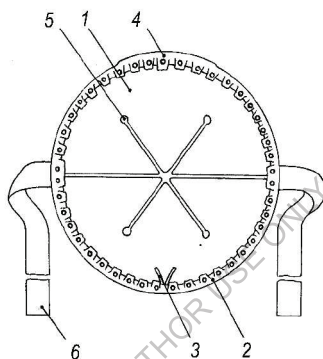


Рисунок 1.9 – Респиратор ШБ-1 «Лепесток»:

1 – корпус; 2 – периферическое кольцо; 3 – шнур; 4 – пластинка; 5 – распорка;  
6 – лямки

Таблица 1.2 – Основные технические характеристики респираторов серии «Лепесток» (по ГОСТ 2.4.028-86)

Тип респиратора	Назначение	Сопротивление дыханию (при нагрузке 30 л/мин), мм вод. ст.	Материал ФЭ	Эффективность фильтрации, %, не менее
«Лепесток-5»	Для защиты от высокодисперсных аэрозолей с содержанием до 5 ПДК и грубодисперсных – до 200 ПДК	0,5±0,1	ФПП-70	99,9

«Лепесток-40»	Для защиты от высокодисперсных аэрозолей с содержанием до 40 ПДК и грубодисперсных – до 200 ПДК	1,0±0,2	ФПП-70	99,5
«Лепесток-200»	Для защиты от высокодисперсных аэрозолей с содержанием до 200 ПДК	3,1±0,4	ФПП-15	96,0

Примечания

1. Защитные параметры респираторов приведены с пятикратным запасом.
2. Эффективность фильтрации респираторов указана по отношению к частицам с радиусом 0,1–0,2 мкм.
3. Защитные параметры респираторов по отношению к частицам другого размера выше, чем приведенные.

В работе [18] приведена справочная информация об основных областях и рекомендуемых условиях использования респираторов серии «Лепесток».

Нашли применение обновленные модификации известных типов респираторов в виде полумасок с фильтрующим слоем из ФП (таблица 1.3).

*Респираторы «Лепесток-200М»* (ТУ 6-00-05795748-237-95) применяют для защиты органов дыхания от аэрозолей, присутствующих в воздухе при концентрации не более 100 мг/м<sup>3</sup>. *Респиратор РТМ-1 «Листок»* (ТУ 6-00-05795748-219-95) выпускается двух типов («Листок-200» и «Листок-40») и применяется при следующих условиях:

– для «Листка-200» – не более 100 ПДК при размере частиц не более 2 мкм и не более 200 ПДК при размере частиц более 2 мкм;

– для «Листка-40» – не более 33 ПДК при размере частиц не более 2 мкм и не более 100 ПДК при размере частиц более 2 мкм.

*Респиратор «Уралец-II»* (ТУ 6-00-05795748-198-95) применяется для защиты от аэрозолей, присутствующих в воздухе при концентрации не более 100 мг/м<sup>3</sup>, а *респиратор «КАМА-200»* (ТУ 6-16-2442-86) с двумя слоями – не более 200 мг/м<sup>3</sup>. Два слоя (наружный из пенополиуретана и внутренний из ФП) имеет *респиратор «У-2К»* (ТУ 6-16-2267-78), снабженный клапанами вдоха и выдоха, что исключает увлажнение фильтра.

Таблица 1.3 – Характеристики облегченных респираторов

Наименование показателей	Типы респираторов					
	«Лепесток-200М»	«Листок-200»	«Листок-40»	«Уралец-П»	«Кама-200»	«У-2К»
Сопротивление постоянному потоку воздуха, Па (мм вод. ст.), не более	40 (4,0)	34,3 (3,5)	14,7 (1,5)	39 (4,0)	39 (4,0)	58 (6,0)
Коэффициент проникания по масляному туману, %, не более	0,8	0,8	3,0	0,8	0,8	0,8
Масса, г, не более	15	18	18	35	35	60
Срок службы, рабочих смен	1–6	1–6	1–6	1–7	1–7	до 30

Еще одну группу СИЗОД выпускает НПО «Неорганика»: *фильтрующие респираторы «Щит» и «Форт-П», фильтрующий газопылезащитный респиратор «Лур-ГП»* (таблица 1.4). Применение в их конструкции ФЭ из ультратонких полимерных волокон типа ФП позволяет обеспечить защиту органов дыхания от широкого спектра опасных аэрозолей – промышленных (силикатные, цементные, угольные, наждачные, пигментные, синтетические волокна, отбеливатели, моющие средства и др.), сельскохозяйственных (хлопковые, табачные, мучные, шерстяные, пуховые, древесные и др.), бытовых (вирусы и бактерии, ремонт и уборка квартиры, работа с ядохимикатами и др.).

Таблица 1.4 – Характеристики СИЗОД производства НПО «Неорганика»

Марка респиратора	Моделльная среда	Коэффициент проникания, %	Начальное сопротивление постоянному воздушному потоку при объемном расходе 30 л/мин, Па (мм вод. ст.)	Масса, г
«Щит»	Аэрозоль с размером частиц 2–5 мкм	менее 5,0	22,0 (2,2)	менее 20,0
«Форт-П»	Аэрозоль с размером частиц до 2 мкм	менее 1,0	35,0 (3,5)	20,0
«Лур-ГП»	Микропорозок М-5 по ГОСТ 3647-80	не более 1,0	не более 60,0 (6,0)	не более 50,0

*Лицевая хирургическая маска* производства НПО «Неорганика», полностью соответствующая современным требованиям медицинской практики, предназначена для защиты верхних дыхательных путей человека от капельной инфекции. Ее применяют медицинский персонал, работающий в особо чистых помещениях. Имеет массу 5–7 г и характеризуется эффективностью фильтрации 95 % (в случае аэрозолей с размерами частиц 0,32 мкм при скорости 1 см/с) и 100 % (в случае бактериальной пыли). Сопротивление дыханию – 2,0 Па при расходе воздуха 30 л/мин. Изделие сохраняет бактериальную чистоту наружного слоя благодаря электростатическому заряду ФЭ.

На мировом рынке уверенно заявили о себе *респираторы американской фирмы «3М»*, имеющие удачную конструкцию и дизайн. Респираторы оснащены простой и надежной системой байонетного крепления патронов и фильтров к лицевой части. Продолговатая форма патронов и способ их установки не создают помех при работе и не ограничивают обзор. Некоторые респираторы оснащены клапанами вдоха и выдоха, снижающими накопление теплого воздуха и влагообразование под лицевой частью. Изделия легко промываются водой с использованием моющих средств (без патронов и фильтров).

*Полумаски серии № 6000* (рисунок 1.10) дают хороший обзор и совместимость со средствами защиты глаз и головы – очками, касками, шлемами. *Полные маски серии № 6000* (рисунок 1.11), изготовленные из термопластов, обеспечивают панорамный обзор через поликарбонатные линзы, оснащены клапанами вдоха и выдоха и могут использоваться при концентрациях загрязняющих веществ до 100 ПДК. *Респираторы серии № 9300* имеют трехкомпонентную конструкцию. Модели № 9312/9322 (рисунок 1.12) используют в условиях высоких температур и повышенной влажности воздуха (рекомендуемые области применения – металлургия, литейные производства, изготовление огнеупорных материалов, работа с химическими веществами, лакокрасочные производства, агрохимия и т.д.). Респиратор с клапаном выдоха модели № 9332 и изделия моделей № 9310/9320 предназначены для работы в менее жестких условиях. *Противоаэрозольные респираторы серий №№ 8000 и 9000* (рисунки 1.12, 1.13) не имеют сменных деталей и обеспечивают защиту от пыли, туманов, сварочных дымов при концентрации до 100 ПДК, а также защиту от озона (№ 9925), органических паров (№ 9913), кислых газов (№ 9915). Модель № 9925 приспособлена для работы в условиях перепада температур и имеет сорбирующий слой, улавливающий озон и органические

пары при концентрациях до ПДК. Модель № 9913 (рисунок 1.14) обеспечивает также защиту от органических паров.

В последние годы наметилась тенденция к применению в одном респираторе нескольких разновидностей ФЭ, что продиктовано стремлением совместить их достоинства. Лучшие мировые образцы респираторов имеют многослойный фильтр. В некоторых типах респираторов «ЗМ» один из фильтрующих слоев содержит частицы угля, что повышает адсорбционную активность ФЭ.

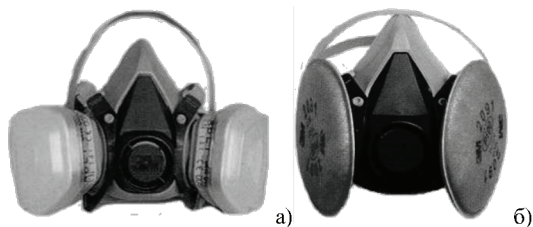


Рисунок 1.10 – Полумаски «ЗМ» серии № 6000:  
а – с компактными патронами; б – с дисковыми патронами



Рисунок 1.11 – Полная маска «ЗМ» серии № 6000



Рисунок 1.12 – Респираторы «ЗМ»:  
а – моделей 9312/9322; б – модели 9332; в – моделей №№ 9310/9320

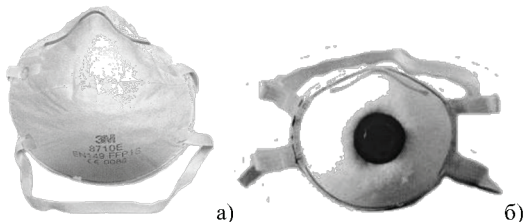


Рисунок 1.13 – Респираторы «3М» противоаэрозольные:  
а – модели 8710; б – модели № 9925

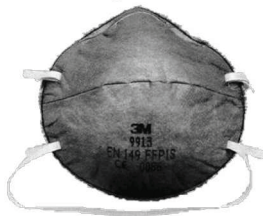


Рисунок 1.14 – Противоаэрозольный респиратор «3М» модели № 9913  
с дополнительной защитой от органических паров

Ведущие производители СИЗОД для повышения эффективности очистки широко используют электризацию волокнистых ФЭ, благодаря чему в полимерном материале формируется электретное состояние [16]. Оно характеризуется наличием в структуре «замороженных» зарядов, которые создают в приволоконной области постоянное электрическое поле. Данное поле, взаимодействуя с электризованной пылью, способствует его захвату. Сочетание высокой регулярности структуры волокнисто-пористого ФЭ с применением многослойных материалов и электретным зарядом волокон обеспечивает очистку воздуха по нескольким взаимосвязанным механизмам.

В [10] на примере полимерных волокнистых melt-blown материалов выявлены основные зависимости эффективности фильтрования от диаметра и плотности упаковки волокон, а также от размеров частиц загрязнителя при постоянных скорости фильтрации и вязкости фильтруемой среды. В работе приведены оценочные результаты исследований фильтрационных характеристик образцов волокнистых melt-blown материалов из полипропилена (ПП):

- однослойный незаряженный;
- заряженный в поле коронного разряда (10 кВ/см) в процессе аэродинамического формования;
- двухслойный образец, первый слой которого не был заряжен, а нанесение на него второго слоя сопровождалось принудительной электризацией.

Неэлектризованный материал сравнительно быстро (через 1 час) теряет работоспособность (а именно, возрастает коэффициент проскока  $K$  частиц масляного тумана через слой фильтра). Электризованный материал хуже смачивается маслом, поэтому частицы аэрозоля концентрируются в поверхностном слое, не экранируя электретный заряд в глубине образца (для образцов, электризованных в отрицательном коронном разряде, получено

наименьшее значение  $K$ ). Двухслойный фильтр продемонстрировал самое низкое и стабильное значение коэффициента проскока аэрозоля в связи с тем, что незаряженный слой адсорбирует частицы, защищая электретный слой и обеспечивая его работоспособность в течение длительного времени. Наименьшее аэродинамическое сопротивление показал электризованный материал, что можно объяснить оседанием капель на волокнах без заметной их коалесценции, вследствие чего в межволоконном пространстве остается незанятым большое число пор. Это не снижает эффективность фильтрования, которое происходит не только путем механического захвата, но и за счет действия электрических сил.

Приведенные данные иллюстрируют высокую работоспособность электретных волоконистых фильтров, а также слоистых материалов, состоящих из электретных и неэлектретных фильтрующих слоев. Оптимизация толщины и порядка чередования таких слоев представляется актуальной с точки зрения создания новых эффективных воздушных фильтров. Однако эти выводы сделаны для ФЭ (в том числе на основе полиолефинов), диаметр волокон которых значительно превышает 10 мкм.

Как уже указывалось выше, другой разновидностью фильтров, использующих электрическое поле, являются электростатические осадители. В таких фильтрах в процессе ионизации молекул газов электрическим разрядом на коронирующем электроде происходит заряд содержащихся в них частиц. Ионы адсорбируются на поверхности пылинок, а затем под действием электрического поля перемещаются и осаждаются на осадительных электродах. Зарядка частиц в поле коронного разряда происходит по двум механизмам: под воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и диффузией ионов [9].

Первый механизм преобладает при размерах частиц более 0,5 мкм, второй – менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2–0,5 мкм эффективны оба механизма. Максимальная величина заряда частиц размером более 0,5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц размером менее 0,2 мкм – диаметру частицы [19].

Очистка в электрофильтрах включает процессы образования ионов, зарядки пылевых частиц, транспортирования их к осадительным электродам, периодическое разрушение слоя накопившейся на электродах пыли и сброс ее в пылесборные бункеры.

Эффективность работы электрофильтров зависит от свойств пыли и газа, скорости и равномерности распределения запыленного потока в сечении аппаратов и т. д. Чем выше напряженность поля и меньше скорость газа в аппарате, тем лучше улавливается пыль.



Ультратонкая очистка газов от частиц размером 0,01–1 мкм представляет на сегодняшний день наибольшую практическую задачу, так как частицы именно этого диапазона наносят наибольший вред здоровью людей, а также представляют основную пожаро- и взрывоопасность. Применяемое для этих целей в настоящее время оборудование является низкопроизводительным, громоздким, энерго- и материалоемким, достаточно дорогостоящим. Наиболее широко используемые в качестве фильтрующих материалов ткани Петрянова в ряде случаев не обладают достаточной термо-, влаго- и маслостойкостью, имеют ограниченный ресурс работы, плохо поддаются или вообще не поддаются регенерации. Эти недостатки ограничивают возможности эффективного и устойчивого улавливания частиц с размером менее 1 мкм.

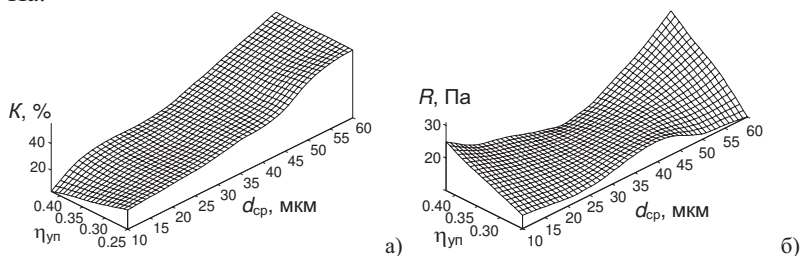
Электростатические осадители (фильтры) принадлежат к числу наиболее эффективных аппаратов для улавливания аэрозолей, характеризуются высокой эффективностью улавливания в широком диапазоне размеров частиц (от 10 до 0,01 мкм) и могут задерживать как твердые аэрозоли, так и туманы с эффективностью до 99,9 % [20]. При этом потери давления не превышают нескольких десятков миллиметров водяного столба, рабочая температура может достигать 500 – 700 °С. Такие фильтры могут быть однозонными, двухзонными и многозонными. В двухзонных фильтрах ионизация происходит в одной части электрофильтра, а осаждение аэрозолей – в другой, причем последние в большинстве случаев содержат в зоне осаждения фильтрующие материалы из высокопористых материалов (ВПМ). Многозонные фильтры имеют возможность отключения части секций и имеют несколько последовательно расположенных по ходу газа электрических полей. Высокие эксплуатационные показатели многозонных электрофильтров обеспечиваются в сочетании со специальными фильтрующими материалами на основе ВПМ и с применением новых концепций электростатического осаждения для улавливания и сепарации аэрозольных частиц, благодаря чему можно достигнуть высоких показателей улавливания по размерам и физико-химическому составу аэрозолей.

Однако все более повышающиеся требования к эффективности очистки воздуха от аэрозолей (99,99 % для частиц размером 0,1 мкм и менее), нестабильность рабочих характеристик используемых в настоящее время фильтров при изменении концентрации, физико-химического и дисперсного состава фильтруемых аэрозолей, требует совершенствования конструкций и оптимизации эксплуатационных параметров электростатических фильтров с использованием ВПМ.

## 2. Исследование возможности повышения эффективности очистки воздуха с помощью ФЭ из электретных волокон

Для проведения исследований по разработанной технологии melt-blown [10] изготовлены и испытаны волокнистые материалы на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) и полипропилена (ПП), в том числе заряженные в поле отрицательного коронного разряда. Технологический процесс получения фильтроматериалов включает переработку гранулята в экструдере, аэродинамическое распыление расплава и формирование волокнисто-пористого слоя на формообразующей оправке. При испытаниях определяли значения среднего диаметра волокон и плотности упаковки, которые сопоставляли с фильтрационными характеристиками. Полученные зависимости представлены в виде трехмерных диаграмм.

На рисунке 2.1 представлены диаграммы зависимостей коэффициента проскока и сопротивления потоку воздуха от среднего диаметра волокон  $d_{cp}$  и плотности упаковки  $\eta_{уп}$  для волокнистого материала из ПЭВД. Видно, что при малой плотности упаковки с увеличением  $d_{cp}$  повышается коэффициент проскока от 20 до 55 % и незначительно изменяется аэродинамическое сопротивление ФЭ. При плотности упаковки  $\eta_{уп} = 0,40$  характер зависимости  $K$  ( $d_{cp}$ ) практически не меняется: в исследуемом диапазоне  $d_{cp}$  коэффициент проскока растет от 10 до 57 %. Иначе изменяется зависимость  $R$  ( $d_{cp}$ ). Вначале с увеличением  $d_{cp}$  в диапазоне 10–30 мкм наблюдается снижение аэродинамического сопротивления. При  $d_{cp} = 35–37$  мкм  $R$  достигает значений, характерных для материала с низкой плотностью упаковки ( $R = 13–15$  Па). Затем с увеличением среднего диаметра волокон  $R$  плавно увеличивается до 30 Па.



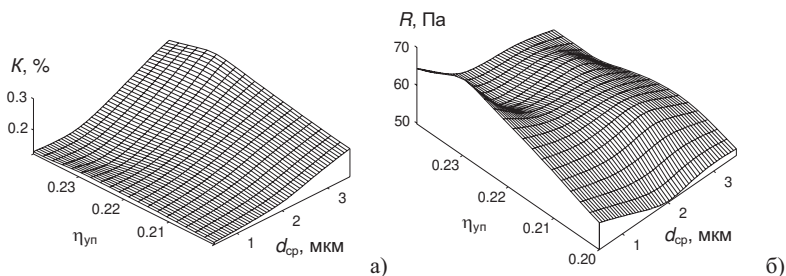
а – коэффициент проскока  $K$ ; б – аэродинамическое сопротивление  $R$

Рисунок 2.1 – Зависимость характеристик волокнистых фильтрующих материалов из ПЭВД ( $\sigma_{эф} = 0,12$  нКл/см<sup>2</sup>) от среднего диаметра волокон  $d_{cp}$  и плотности упаковки  $\eta_{уп}$

Тем самым, существует определенная специфика образования структуры волокнистых материалов в условиях технологической и принудительной электризации в процессе аэродинамического формования. Можно предположить, что механизм структурообразования волокнистых материалов, построенных из волокон диаметром менее 10 мкм, предполагает участие электрических сил: электростатическое притяжение разнополярно заряженных участков волокон оказывает влияние на их ориентацию в пространстве, контактирование и формирование межволоконного объема. Данный механизм вносит вклад в анизотропию волокнистых материалов. Технология аэродинамического формования обеспечивает расположение волокон послойно с переплетением волокон внутри слоев. Такую волокнистую структуру, близкую к изотропной внутри каждого слоя, в целом следует считать анизотропной. Извилистость волокон, градиент их диаметра и неравномерность размеров пор, являясь случайными факторами, также вносят вклад в анизотропию структуры.

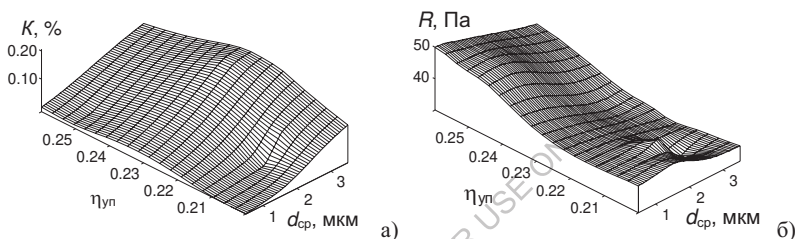
Фильтрационные характеристики материалов из ПП с диаметром волокон 0,5–4 мкм даны на рисунке 2.2. Зависимости характеризуются общей закономерностью – с ростом  $d_{\text{ср}}$  увеличивается  $K$  и уменьшается  $R$ . При  $d_{\text{ср}} = 0,5$  мкм и  $\eta_{\text{уп}} = 0,20$ – $0,24$  зафиксировано значение  $K \approx 0,1$  %. Значения  $R$  увеличиваются и достигают максимума при  $\eta_{\text{уп}} = 0,23$ . Характерно, что после принудительной электризации волокон ПП (рисунок 2.3) с ростом диаметра волокон снижается  $R$ , а параметр  $K$  хотя и увеличивается, но остается в 5–10 раз ниже по сравнению с незаряженными материалами. Относительное удлинение при разрыве таких материалов составляет 35–43 %, что лежит в диапазоне этой величины для ФП.

Таким образом, наилучшими параметрами ( $K = 0,01$  %,  $R \approx 40$  Па) обладают материалы из ПП с  $d_{\text{ср}} = 0,5$ – $1,5$  мкм и  $\eta_{\text{уп}} = 0,20$ – $0,23$ , заряженные в поле отрицательного коронного разряда до величин  $\sigma_{\text{эф}} = 15$  нКл/см<sup>2</sup> или даже выше.



а – коэффициент проскока  $K$ ; б – аэродинамическое сопротивление  $R$

Рисунок 2.2 – Зависимость характеристик волокнистых фильтрующих материалов из ПП ( $\sigma_{\text{эф}} = 0,1 \text{ нКл/см}^2$ ) от среднего диаметра волокон  $d_{\text{ср}}$  и плотности упаковки  $\eta_{\text{уп}}$



а – коэффициент проскока  $K$ ; б – аэродинамическое сопротивление  $R$

Рисунок 2.3 – Зависимость характеристик электретенных волокнистых фильтрующих материалов из ПП ( $\sigma_{\text{эф}} = 15 \text{ нКл/см}^2$ ) от среднего диаметра волокон  $d_{\text{ср}}$  и плотности упаковки  $\eta_{\text{уп}}$

Возможным объяснением нелинейности приведенных закономерностей может служить особый характер взаимного соединения волокон в объеме волокнисто-пористого melt-blown материала. В волокнах, спонтанно электризованных при melt blowing, (технологического) электрического заряда. В волокнах, находящихся в вязкотекучем состоянии, возможна хаотическая миграция электрически неравновесных фрагментов. Заряд независимо от параметров оказывается распределенным по поверхности и в объеме волокна.

Взаимодействие электретенных зарядов разных знаков при формировании волокон приводит к двум основным типам соединения волокон. Первый тип возникает при сплавлении пришедших в контакт средних частей пересекающихся волокон, приводя к образованию так называемых узлов – механически уравновешенных структур. Второй тип соединений возникает при контактировании без сплавления разноименно заряженных участков волокон (рисунок 2.4). Волокна могут не только касаться друг друга, но и подвергаться деформированию под действием сил электростатического притяжения–

отталкивания. При контактировании волокон поверхностный электретенный заряд частью компенсируется, а частью превращается в объемный. Возникшие соединения волокон должны различаться по прочности. В совокупности эти эффекты способствуют созданию микронеоднородной среды.

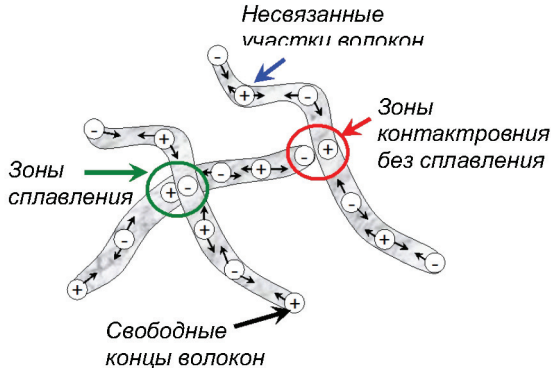


Рисунок 2.4 – Схема взаимодействия волокон в волокнисто-пористом melt-blown материале

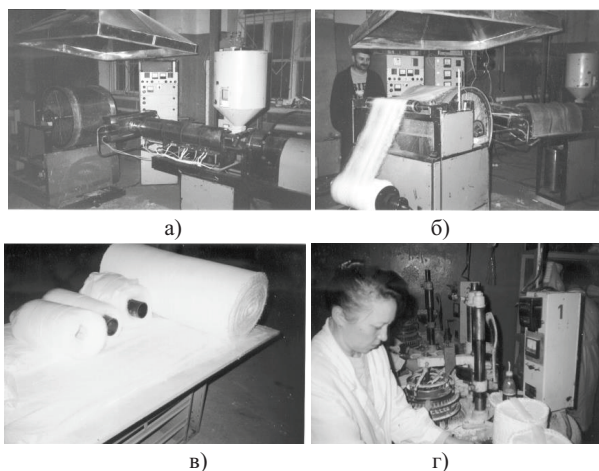
Из-за неоднородности распределения электретенного заряда в волокнах его тепловая релаксация должна носить особый характер. Узлы разрушаются при плавлении полимера, т.е. при нагревании до температур  $T \geq T_{пл}$ . Эти соединения разрушаются при  $T < T_{пл}$  под действием напряжений, неизбежно возникающих в волокнистых структурах при нагревании. Во всех этих случаях должна происходить релаксация нескомпенсированного объемного и поверхностного поляризационного заряда. При исследовании распределения заряда микронзонд вибрирующего электрода с диаметром 0,5 мм ориентировали на зоны соединений и свободные участки волокон, проверяя точность ориентирования с помощью оптического микроскопа. Обнаружено различие величин поверхностного заряда на этих зонах (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Величина заряда на различных участках melt-blown волокон из ПП

Участок волокон	ЭППЗ, нКл/см <sup>2</sup>				
	1	2	3	4	5
Зона соединения без сплавления	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8
Зона сплавления	0,4	0,3	0,2	0,5	0,4
Свободный участок волокон	1,2	1,3	1,2	1,4	1,2

Опыт, накопленный при разработке и исследовании melt-blown волокнистых материалов, реализован при организации производства новых легких респираторов «Л-200» (ТУ РФ № 25.6820-002-57427422-04 «Респиратор Л-200»). «Л-200» – фильтрующий респиратор одноразового использования (фильтрующая полумаска), предназначенный для защиты органов дыхания от аэрозолей (рисунки 2.5, 2.6). Для изготовления респиратора применены материалы, разрешенные Министерством здравоохранения России для использования в контакте с кожей человека и вдыхаемым им воздухом. В респираторах применен электретенный фильтрующий слой из волокон полиолефинов, заменяющий материалы ФП (ТУ РФ № 25.6820-001-57427422-04 «Фильтрующий материал ЭТФМ-1 (-2,-3)»). Экспериментально установлено, что спад заряда при начальной плотности  $15 \text{ нКл/см}^2$  составляет 4–5 % в год.

Респиратор «Л-200» состоит из корпуса с обтюратором, резинового шнура с пластинкой (внутри обтюратора), распорки и лент. Материал респиратора и само изделие являются стойкими к воспламенению. Ремни (ленты) крепления и оголовье регулируются и обеспечивают надежную и комфортную фиксацию респиратора в нужном положении. Масса респиратора без упаковки составляет не более 12 г. Одно из требований к волокнистому фильтрующему слою – отсутствие в нем твердых включений размером более 1 мм, сквозных проколов, утонений и загрязнений поверхности. Механическая прочность респиратора «Л-200» при растяжении вдоль распорки и ее лучей в каждом из трех направлений составляет не менее 15 Н, а сварного в сварочных точках диаметром 3 мм – более 1 Н. Гарантийный срок хранения и эксплуатации респиратора составляет 2 года со дня изготовления при соблюдении потребителем условий хранения. Для защиты от газов и паров респиратор «Л-200» не предназначен, при недостатке кислорода его применение также не рекомендуется. Респиратор «Л-200» выпускают в соответствии с тремя классами эффективности фильтрования, которые обозначаются: FFP-1 – низкая эффективность; FFP-2 – средняя эффективность; FFP-3 – высокая эффективность (маркируются соответственно фиолетовой, красной и черной краской). Параметры эффективности приведены в таблицах 2.2, 2.3.



а – экструзионная установка; б – намотка волокнистого полотна на бобину;  
в – образцы фильтрующих материалов; г – сборка респираторов

Рисунок 2.5 – Производство респираторов с фильтрующим слоем из электретиного волокнистого материала

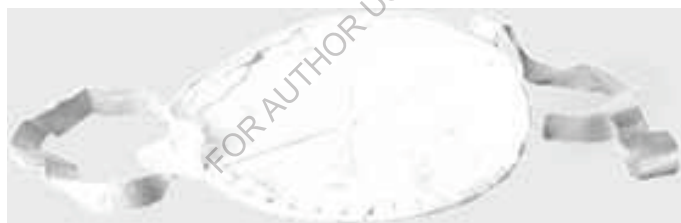


Рисунок 2.6 – Легкий респиратор «Л-200»

Таблица 2.2 – Проницаемость ФЭ респиратора «Л-200»

Класс респиратора «Л-200»	Коэффициент проскока тест-аэрозоля, %, при расходе воздушного потока 95 л/мин	
	хлорид натрия, не более	парафиновое масло, не более
FFP1	20	20
FFP2	6	6
FFP3	1	1

Таблица 2.3 – Начальное сопротивление ФЭ респиратора «Л-200» постоянному воздушному потоку

Класс респиратора «Л-200»	Максимально допустимое аэродинамическое сопротивление, Па, при расходе воздушного потока		
	на вдохе		на выдохе
	30 л/мин	95 л/мин	160 л/мин
FFP1	60	210	300
FFP2	70	240	300
FFP3	100	300	300

Таким образом, в результате проеденных исследований предложены несложные в аппаратурном оформлении схемы получения электретенных полимерных волокнистых ФЭ. Впервые разработана экологически чистая безрастворная технология переработки полимеров аэродинамическим диспергированием расплавов, которая адаптирована к формированию тонковолокнистых электретенных фильтроматериалов, применяемых в качестве СИЗОД легких респираторов. Специфические методы фильтрационных испытаний, разработанные для фильтроматериалов Петрянова, впервые применены к электретенным melt-blown ФЭ, выявлена зависимость их эксплуатационных характеристик от структурных и электрофизических параметров. Новые электретенные ФЭ использованы для замены фильтроматериалов Петрянова в легких респираторах.

Создан электретенный тонковолокнистый фильтроматериал ЭТФМ (ТУ № 25.6820-001-57427422-04 «Фильтрующий материал ЭТФМ-1(-2,-3)») и новый противоаэрозольный респиратор «Л□200» (ТУ № 25.6820-002-57427422-04 «Респиратор Л□200»). Государственной санитарно-эпидемиологической службой РФ выданы Санитарно-эпидемиологические заключения № 77.01.03.830.П.09688.04.4 от 28.04.2004 на фильтрующий материал ЭТФМ-1(-2,-3) и № 77.01.03.857.П.09688.04.4 от 28.04.2004 на респиратор «Л-200», Госстандартом России □ выдан Сертификат соответствия РФ № 6081353 на респиратор «Л-200». В Федеральном Центре двойных технологий «Союз» (г. Москва, Россия) организовано опытное производство электретенных фильтроматериалов мощностью 100 тыс. м<sup>2</sup> / месяц, в НПО «Инкар» (г. Ухта, Россия) налажен серийный выпуск респираторов «Л□200». Данные респираторы за счет повышения эффективности очистки не уступают по ключевым параметрам респираторам ведущих фирм.



### 3. Исследование возможности повышения эффективности осаждения высокодисперсных частиц в высокопористых материалах в электрическом поле

Как указывалось в главе 1, для повышения производительности и эффективности осаждения субмикронных высокодисперсных частиц из газовых потоков все более широкое распространение получают электростатические фильтры различных типов, в том числе поляризационные, с использованием различных высокопористых материалов, помещенных в электростатическое поле. В таких фильтрах доминирующим механизмом улавливания частиц является осаждение частиц на перемычках высокопористых материалов фильтров за счет электрических сил. И если процесс фильтрации незаряженных высокодисперсных частиц в различных пористых материалах достаточно хорошо изучен экспериментально, то случай осаждения заряженных частиц при их относительно высокой степени зарядки в высокопористых материалах требует отдельного изучения.

Теоретические аспекты осаждения высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах рассмотрены в работе [21]. Исследование влияния электрического поля на закономерности осаждения высокодисперсных частиц в электрическом поле на одиночном волокне фильтра проведено в работе [22]. В ней показано, что эффективность осаждения высокодисперсных частиц менее 1 мкм с увеличением скорости фильтрации возрастает в случае, когда частицы и волокна заряжены. Теоретический анализ закономерностей коагуляции высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых волокнистых материалах под воздействием электрического поля проведен в работе [23]. В ней показано, что использование электрического поля позволяет весьма существенно повысить эффективность осаждения высокодисперсных частиц с размером  $d_p < 0,5$  мкм и, что особенно важно, – наиболее трудноулавливаемых частиц  $d_p \approx 0,3$  мкм. При этом наибольшая эффективность достигается при фильтрации заряженных частиц сквозь заряженные волокна фильтра.

В традиционных электрофильтрах происходит ионизация частиц газового потока, проходящего между двумя электродами, к которым подведен постоянный электрический ток и осаждение заряженных частиц на осадительных электродах. В нашем случае модель представляла собой двухзонный электростатический фильтр, состоящий из зоны зарядки, поля коронного разряда типа «игла–цилиндр» и зоны осаждения, выполненной в виде поляризационного фильтра, содержащего пористые металлические

электроды, между которыми размещался фильтрующий материал из диэлектрических волокон.

Зона осаждения была выполнена таким образом, чтобы обеспечивалась возможность установки фильтрующих элементов переменной толщины с регулируемым зазором между ними, и возможность регулирования полярности подключения электродов к источнику высокого напряжения.

В качестве электродов использовались образцы из ВПМ на основе пеноникеля (рисунок 3.1) со следующими характеристиками (таблица 3.1).

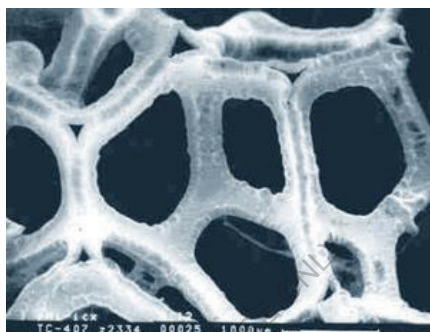


Рисунок 3.1 – Фрактограмма поровой структуры ВПМ на основе пеноникеля

Таблица 4.2 - Свойства образцов ВПМ из пеноникеля

Размер электродов, мм		Размер ячейки, мм	Коэффициент проницаемости, $\times 10^8, \text{м}^2$	Пористость, %
диаметр	толщина			
30	2–10	0,8–1,0	1,5	97
30	2–10	1,5 –3,0	4,5	98

Экспериментальные исследования были направлены на изучение влияния на эксплуатационные характеристики (эффективность фильтрации и аэродинамическое сопротивление) электростатического фильтра следующих факторов:

- напряженность электрического поля;
- величина тока и полярность коронного разряда зарядного устройства;
- размер пор и толщина фильтрующих элементов;
- полярность подключения осадительных электродов;
- ориентация игольчатого коронирующего электрода;
- скорость фильтрации;

– поляризация диэлектрического фильтрующего материала.

Для экспериментального исследования процесса осаждения высокодисперсных частиц в ВПМ под воздействием электрического поля, была разработана модель фильтра, включающая следующие основные элементы: высоковольтный источник питания, содержащий регулятор напряжения, датчики напряжения и тока; коронирующие и осадительные электроды, выполненные из ВПМ; систему распределения газов; корпус; систему встраивания осадительных и коронирующих электродов; узлы подвода, распределения и отвода очищаемых газов; устройство для удаления уловленных частиц из бункеров электрофильтра; систему подвода к электрофильтру тока высокого напряжения.

Модельная установка для исследования работы электрофильтра включала в себя следующие элементы: экспериментальный электрофильтр, содержащий осадительные электроды из высокопористого материала; источник высокого напряжения (ИВН), позволяющий производить регулировку напряжения в широких пределах; генератор аэрозоля (частиц) вибрационного типа; вентилятор; контрольно-измерительные приборы.

Структурная схема модели электрофильтра для исследования представлена на рисунке 3.2.

Модельный электрофильтр состоит из корпуса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками. В корпусе установлены последовательно друг за другом газораспределительная решетка 4, сетка 5, зарядная камера 6, осадительная камера 7 и всасывающий вентилятор 8.

Зарядная камера выполнена в виде заземленных параллельных друг другу пластин 9, образующих между собой каналы для очищаемого газа. Между пластинами натянуты цилиндрические и игольчатые провода 10. На провод подается напряжение  $U$ , при этом в межэлектродном промежутке возникает коронный разряд.

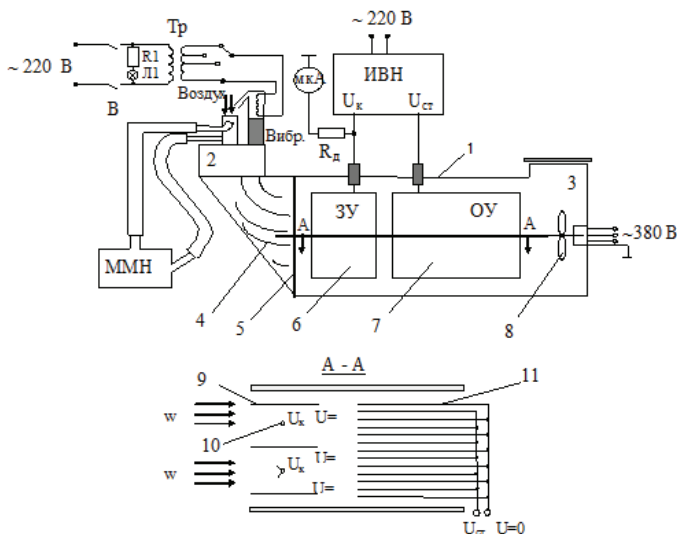


Рисунок 3.2. Структурная схема модели электрофильтра

Осадительная камера выполнена в виде параллельных плоских высококористых электродов 11, на которые подается напряжение.

Зарядная камера двухзонного электрофильтра моделирует один модуль пластинчатого электрофильтра.

Высоковольтный блок питания включает в себя узлы управления: источника высокого напряжения (ИВН, расположен на торцевой части корпуса), высоковольтного трансформатора и умножителя напряжения (расположен на задней стенке корпуса). Напряжение на зарядном устройстве электрофильтра регулируется ступенчато:  $U = 8, 10$  и  $12$  кВ. Напряжение на осадительной камере  $U_k = 0,5U_{ст}$ .

Для измерения напряжения используется микроамперметр типа М 24 с добавочным сопротивлением “ $R_d$ ”.

На выходном патрубке установлен матерчатый фильтр (3) для улавливания частиц после электрофильтра.

С помощью системы управления на выходе источника высокого напряжения устанавливается напряжение от 8 до 12 кВ.

В качестве модельных улавливаемой частиц выбраны высокодисперсные порошки, состоящие из частиц радиусом  $15 \cdot 10^{-6}$  м, плотностью  $0,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Подача высокодисперсных частиц в модель осуществлялась с помощью вибрационного питателя (вибр. на рисунке 3.2), обеспечивавшего равномерную

длительную подачу. Регулировка производительности осуществлялась ступенчато от трансформатора Тр.

Удельное содержание частиц пыли определяется массой  $M$  частиц, поступающих в электрофильтр в единицу времени, и объемной скоростью газа  $Q$ , т.е.:

$$m = \frac{M}{Q} \quad (3.1)$$

Если, известна масса частиц, поступающих в электрофильтр  $M_1$ , и масса частиц, осажденных в электрофильтре  $M_2$  за фиксированный интервал времени, можно определить степень очистки:

$$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Масса частиц, поступающих в электрофильтр, определяется производительностью вибропитателя и потерями в газозвоздушном тракте на распределительной решетке (4) и сетке (5).

Масса частиц, осажденных в электрофильтре, определяется путем измерения массы частиц, осевших на пробоотборном датчике (осадительном электроде). Измерив массу датчика до  $m_g$  и после  $m_{g+n}$  осаждения на нем частиц и определив разницу, можно получить массу  $m_n$  частиц, осажденных на датчике за время работы  $t$ .

$$m_n = m_{g+n} - m_g, \quad (3.3)$$

тогда масса частиц, осажденных в канале электрофильтра, определяется как

$$M_2 = \frac{m_n \cdot S}{S_g \cdot t}, \quad (3.4)$$

где  $S_g$  – площадь датчика,  $S_n$  – площадь осадительных пластин одного канала электрофильтра,  $t$  – время подачи порошка в электрофильтр, т.е. время измерения.

Измерение скорости газа поводилось с помощью пневматической трубки. Для этого на входной патрубке электрофильтра установлен дополнительный газопровод. В него введена трубка, изогнутая под углом  $90^\circ$  так, чтобы ось ее

начальной части совпадала с направлением потока газа, а отверстие было направлено навстречу потоку. Другая трубка установлена заподлицо со стенкой газохода. Обе трубки присоединены к микроманометру ММН. При таком подключении измеряется динамический напор  $P_{дин}$  как разница полного  $P_n$  и статического  $P_{ст}$  напоров:

$$P_{дин} = P_n - P_{ст}, \quad (3.5)$$

и скорость газа определяется по формуле

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot P_{дин}}{\gamma_{\%}}}, \quad (3.6)$$

где  $P_{дин}$  – динамический напор, мм вод. ст.;  $\gamma_v$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup> (для нормальных атмосферных условий  $\gamma_v = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Динамический напор  $P_{дин}$  определяется как разность показаний микроманометра при включенном  $h_1$  и выключенном  $h_2$  микроманометре, помноженная на коэффициент манометра  $k$  (указан на шкале микроманометра )

$$P_{дин} = (h_1 - h_2) \cdot k. \quad (3.7)$$

Для исследования влияния количества фильтрующих элементов и полярности их подключения на осаждение высокодисперсных частиц и его эксплуатационные характеристики (тонкость фильтрации) модель фильтра собиралась с одним, двумя и четырьмя пеноникелевыми ФЭ толщиной 10 мм и размером ячейки 0,8-1,0 мм, установленными после зарядного устройства на расстоянии 5 мм друг от друга. Коронирующий электрод зарядного устройства имел положительную полярность, а полярность подключения ФЭ чередовалась. Напряжение питания источника высокого напряжения SN-010S сохранялось постоянным 3,5 кВ.

Наилучший результат был получен в случае, когда модель содержала 4 ФЭ, имеющих чередующуюся полярность подключения, причем первый ФЭ имел отрицательную полярность подключения. При этом абсолютная и номинальная тонкость фильтрации составили соответственно 3,0 и 0,2 мкм.

Для исследования влияния величины зазора между ФЭ на тонкость фильтрации модель фильтра собиралась с двумя ФЭ шириной 5 мм и размером

ячейки 0,8 – 1,0 мм, установленными после зарядного устройства. Расстояние между ФЭ изменялось от 3 до 17 мм. Коронирующий электрод и второй ФЭ имели положительную полярность, а осадительный электрод и первый ФЭ имели отрицательную полярность. Напряжение питания источника высокого напряжения сохранялось постоянным 3,5 кВ.

В результате исследований было установлено, что с уменьшением зазора между ФЭ тонкость фильтрации повышается. Так, при минимальном зазоре 3 мм абсолютная и номинальная тонкость фильтрации составили соответственно 4,0 и 0,2 мкм. Минимальная величина зазора ограничивалась условием отсутствия пробоя между фильтроэлементами-электродами.

Для исследования влияния установки диэлектрического проницаемого материала на тонкость фильтрации модель фильтра собиралась с двумя пеноникелевыми ФЭ шириной 5 мм и размером ячейки 0,8 – 1,0 мм. Между ФЭ и после них помещались пластины пенополиуретана толщиной 50 мм с размером ячейки 0,7 мм. Кроме того, исследовались схемы, при которых модель содержала только пластины пенополиуретана без ФЭ, но с зарядным устройством, а также без него. В процессе исследований ФЭ и зарядное устройство либо подключались к источнику высокого напряжения, либо не подключались. Напряженно питания преобразователя высокого напряжения либо оставалось постоянным 3,5 кВ, либо менялось до 4 кВ.

Исследования показали, что наибольшая эффективность фильтрации достигается при осаждении заряженных частиц аэрозоля на наружной поверхности пенополиуретана, а также при осаждении заряженных частиц на заряженной поверхности пенополиуретана, причем максимальную тонкость очистки (0,2 мкм) имеет фильтр, собранный по схеме, в которой используется комбинируемый механизм коагуляции заряженных частиц аэрозоля: на поверхности ФЭ, на поверхности заряженного пенополиуретана и на поверхности незаряженного пенополиуретана, то есть реализован принцип селективности осаждения.

Экспериментальные исследования показали, что значительное влияние на фильтрующие характеристики электрофильтра оказывает также скорость потока газа  $U_0$ . В области скоростей  $U_0 < 0,1$  повышение скорости потока однозначно приводит к снижению общей эффективности фильтрации. При этом размер максимально проникающих частиц увеличивается. Например, при фильтрации высокодисперсных частиц NaCl размером 0,01–1,80 мкм эффективность коагуляции была равна: при расходе 2 л/мин ( $U_0=0,05$  м/с) и токе короны  $I_k = 5$  мкА – 99,96%; а при расходе 3 л/мин  $U_0=0,07$  м/с) и токе короны  $I_k=50$  мкА – 99,36 % (таблица 3.3, рисунок 3.3). Общая эффективность

снизилась, несмотря на увеличение тока коронного разряда, хотя при постоянной скорости фильтрации увеличение тока короны приводит к повышению эффективности фильтра. Это хорошо видно на примере фильтрации атмосферной пыли (таблица 3.4, рисунок 3.4). Несколько иная картина наблюдается при скоростях потока  $U_0 > 0,1$  м/с. В этой области повышение скорости фильтрации вызывает снижение общей эффективности только при небольших величинах тока коронного разряда. В то же время повышается эффективность осаждения наиболее проникающих частиц. При токе короны более 10 мкА увеличение скорости способствует повышению как общей эффективности, так и фракционной для наиболее проникающих частиц.

Таблица 3.3 - Влияние величины тока короны  $I_k$  на фракционную эффективность улавливания  $E(d_p)$  высокодисперсных частиц NaCl

Размер частиц $d_p$ , мкм	Эффективность $E(d_p)$ , %	Эффективность $E(d_p)$ , %
0,01	99,90	99,90
0,02	99,90	99,90
0,05	98,50	98,10
0,10	97,00	96,00
0,20	99,20	97,20
0,50	99,90	99,90
NaCl	$U_0=0,05$ м/с	$U_0=0,07$ м/с
	$I_k=5$ мкА	$I_k=50$ мкА
	$E=99,96$ %	$E=99,36$ %



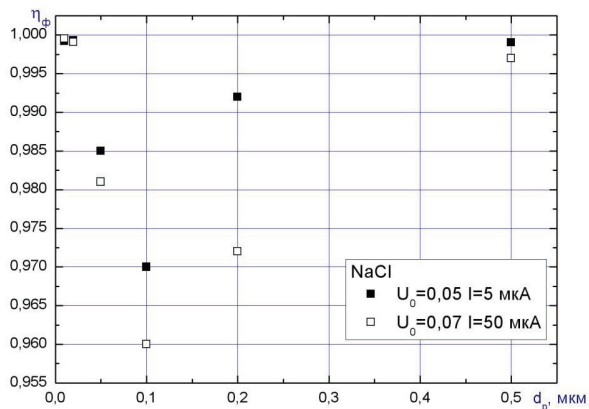


Рисунок 3.3 – Фракционная эффективность улавливания высокодисперсных частиц NaCl при различных скоростях потока и токах коронного разряда

Таблица 3.4 - Влияние величины тока короны  $I_k$  на фракционную эффективность улавливания  $E(d_p)$  частиц атмосферной пыли

Размер частиц $d_p$ , мкм	Эффективность $E(d_p)$ , %	Эффективность $E(d_p)$ , %	Эффективность $E(d_p)$ , %
0,01	99,90	99,90	99,90
0,02	98,20	99,90	98,30
0,05	93,00	99,70	95,50
0,10		99,40	97,50
0,20		99,00	98,40
0,50		96,70	98,70
атмосф. пыль	$U_0=0,35 \text{ м/с}$	$U_0=0,35 \text{ м/с}$	$U_0=0,35 \text{ м/с}$
	$I_k=2 \text{ мкА}$	$I_k=10 \text{ мкА}$	$I_k=50 \text{ мкА}$
	$E=93,31 \%$	$E=98,49 \%$	$E=98,75 \%$

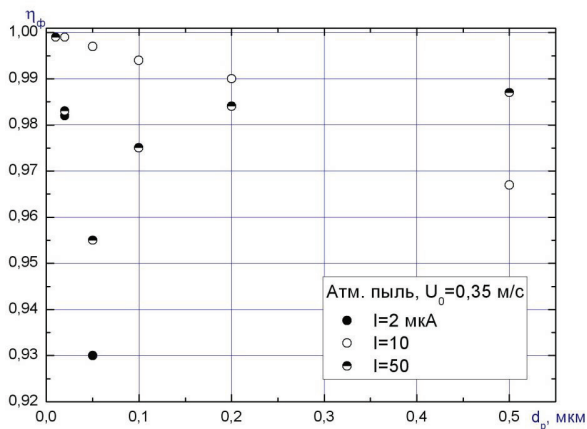


Рисунок 3.4 – Фракционная эффективность улавливания высокодисперсных частиц атмосферной пыли при различных величинах тока коронного разряда

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами и объясняются тем, что в результате турбулизации потока, вызванной повышением его скорости, улучшаются условия коагуляции высокодисперсных частиц благодаря действию механизма турбулентной диффузии, эффективность которого усиливается за счет увеличения зарядов частиц при повышении тока короны, т.е. усиления электрического взаимодействия между заряженными частицами и поляризованными перемычками фильтроэлемента. Возникающие при обтекании перемычек турбулентные вихри приближают частицы к их поверхности в зону действия электрических сил. Кроме того, турбулизация потока способствует уменьшению толщины вязкого ламинарного пограничного слоя, препятствующего диффузионному и индукционному осаждению высокодисперсных частиц, несущих малые по величине заряды. Даже при повышении скорости потока до  $U_0 = 1,43$  м/с (60 л/мин) при токе короны до 8 мкА, модель фильтра обеспечивает эффективность улавливания высокодисперсных частиц NaCl с медианным диаметром 0,1–0,15 мкм при концентрации  $5 \text{ мг/м}^3$  на уровне 98,1–99,1 %.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. С увеличением количества ФЭ от 1 до 4 с чередующейся полярностью подключения, тонкость фильтрации повышается. При этом первый ФЭ должен иметь отрицательную полярность подключения.

2. Уменьшение величины зазора между ФЭ приводит к увеличению эффективности осаждения с одновременным увеличением тонкости фильтрации.

3. При установке диэлектрического проницаемого материала максимальную тонкость фильтрации имеет фильтр, в котором обеспечивается составной механизм осаждения высокодисперсных заряженных частиц: на поверхности ФЭ, на поверхности заряженного диэлектрика и на поверхности незаряженного диэлектрика (принцип селективности улавливания).

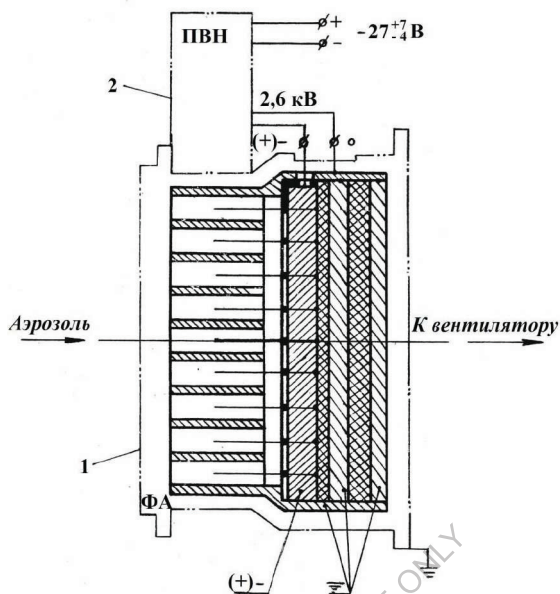
4. При скорости фильтрации менее 0,1 м/с увеличение скорости потока высокодисперсных заряженных частиц ведет к снижению фильтрующих характеристик модели электрофильтра, несмотря на увеличение тока короны. При скорости фильтрации более 0,1 м/с для исследованных значений тока короны повышается эффективность осаждения мелких наиболее проникающих частиц. При токе короны более 10 мкА увеличение скорости потока способствует улучшению осаждения высокодисперсных частиц с диаметром  $<0.2$  мкм.

Таким образом, модельный образец аэрозольного электростатического фильтра продемонстрировал высокие эксплуатационные свойства при незначительных энергетических затратах в условиях фильтрации аэрозолей различного происхождения.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработана конструкция и изготовлен опытный образец аэрозольного электростатического фильтра. Конструктивно фильтр выполнен по двухзонной схеме и включает зону зарядки аэрозольных частиц в поле коронного разряда и зону осаждения заряженных частиц. Фильтр содержит цилиндрический корпус с фланцем для присоединения к переходнику всасывающего вентилятора, размещенные внутри корпуса и изолированные от него и друг от друга металлические осадительные электроды с чередующейся полярностью подключения. Между ними установлены диэлектрические ФЭ, а также зарядный коллектор с пятью цилиндрическими отверстиями, внутри которых соосно располагаются игольчатые коронирующие электроды, припаянные к первому по ходу движения потока осадительному электроду. В результате, зона осаждения содержит по ходу движения газа два электрода толщиной 10 мм и два диэлектрических ФЭ толщиной 6 мм. Последний ФЭ закрывается защитной пористой пластиной толщиной 5 мм. Снаружи фильтра устанавливается защитный ФЭ грубой очистки толщиной 10 мм. Все электроды изготавливаются из ВПМ на основе пеноникеля с размером ячейки 2,5–3,0 мм пористостью 96–98 %. Диэлектрические ФЭ изготавливаются пенополиуретана

с размером ячейки 0,7–1,5 мм пористостью 98–99 %. Первый электрод, расположенный за коллектором, одновременно является держателем коронирующих игл и подключен к источнику высокого напряжения отрицательной полярности. Остальные электроды, а также коллектор, заземлены. Корпус фильтра также заземляется. Потенциальный и нулевой провода соединяют электроды фильтра с преобразователем высокого напряжения, выполненным в виде автономного блока. Конструкция фильтра позволяет при необходимости устанавливать в конце зоны осаждения сорбционный фильтрующий элемент для улавливания токсичных газов. Схема фильтра показана на рисунке 3.5, а его вид в разобранном виде – на рисунке 3.6.

Изготовленные опытные образцы аэрозольных фильтров прошли испытания в аккредитованной в системе Госстандарта Республики Беларусь лаборатории испытаний пористых и дисперсных материалов государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии» Национальной академии наук Беларуси (аттестат аккредитации № ВУ/112.02.1.0.0345) на лабораторной установке для испытаний воздушных фильтров в соответствии с разработанной методикой испытаний фильтров для улавливания аэрозолей. Лабораторные испытания фильтра проводились при фильтрации пиролизных аэрозолей (дымов) поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена (ПЭ), а также воздуха в лаборатории (атмосферная пыль). Масса навески подвергающихся пиролизу полимеров составляла 100 мг. Величина тока псевдоуниполярного отрицательного импульсного коронного разряда устанавливалась 365 и 182 мкА при напряжении питания 2,6 кВ, частота импульсов – 0,1 мс. На осадительные электроды подавалось напряжение 2,6 и 5 кВ. Расход воздуха во всех случаях был равен 7,5 л/с.



1 – фильтр; 2 – преобразователь высокого напряжения

Рисунок 3.5 – Схема опытного образца аэрозольного электростатического фильтра



а)

б)

а – корпус фильтра; б – фильтрующий элемент из ВПМ с осадительными электродами

Рисунок 3.6 – Внешний вид электростатического фильтра в разобранном состоянии

Перед началом каждого эксперимента производился замер аэрозольного фона в помещении. В течение 15 мин проводили заполнение камеры дымом, затем включали канальный вентилятор и создавали циркуляцию загрязненного воздуха в камере для выравнивания концентрации аэрозоля. Исходную концентрацию аэрозоля фиксировали датчиком дымомера марки ДО-1, размещенным на выходе фильтра внутри камеры. Затем включали блок питания аэрозольного фильтра и через 7 мин проводили замер концентрации аэрозоля после фильтра.

В результате испытаний установлено следующее:

- 1) фильтр позволяет устойчиво осуществлять очистку от аэрозолей;
- 2) коэффициент проскока аэрозолей без заряда частиц составляет для ПВХ и ПЭ 40–45 %, для пыли 50–60 %;
- 3) коэффициент проскока аэрозолей при токе коронного разряда 182 мкА составил для ПВХ – 8,7 % при токе коронного разряда 365 мкА: для ПВХ 3–3,7 %; для ПЭ – 3,0 %; для пыли – 2,3 %;
- 4) наибольшая эффективность фильтра достигается при токе коронного разряда 365 мкА и напряжении на осадительных электродах 5 кВ (коэффициент проскока: для ПВХ – 1,81 %; для ПЭ – 1,48 %; для пыли – 0,82 %);
- 5) максимальная потребляемая мощность фильтра при напряжении на коронирующих электродах 2,6 кВ составляет 0,946 ВА.
- 6) низкая величина потребляемой мощности оставляет значительный резерв для повышения эффективности фильтра за счет повышения напряжения питания и тока короны без снижения скорости фильтрации.

Изготовленные фильтры были использованы в составе фильтровентиляционных установок для очистки воздуха от аэрозолей, образующихся при сварке, пайке и термообработке, а также для улавливания ультрадисперсных пылей, образующихся при переработке синтетического алмазного порошка. При этом тонкость фильтрации достигала 0,1 мкм, а эффективность очистки – до 99,1% при номинальной производительности 52 м<sup>3</sup>/ч.

Кроме того, разработанный фильтр может применяться для высокоэффективной очистки воздуха от пыли в помещениях с повышенными требованиями к чистоте (типа «чистые комнаты») в радиоэлектронной и медицинской промышленности, для улавливания высокодисперсных и токсичных сварочных аэрозолей, очистки выбросов вихревых и струйных размольных агрегатов и сепараторов, для очистки воздуха в бытовых и медицинских помещениях с одновременной бактерицидной обработкой и поддержанием природного ионного баланса [1, 24–26].

#### **4. Исследование возможности применения полимерных волокнистых фильтрующих материалов, прошедших регенерацию, для тонкой очистки воздуха**

Ужесточение требований к качеству и надежности выпускаемых изделий, а также необходимость повышения сроков службы машин, механизмов и различных устройств, эксплуатация которых связана с использованием жидких или газовоздушных сред, является причиной появления новых и совершенствования традиционных методов получения фильтрующих материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками. Подавляющее большинство фильтров после выработки своего ресурса не поддается регенерации, поскольку это, как правило, связано с большими энергетическими затратами. Вместе с тем, достаточно большую актуальность с точки зрения ресурсосбережения имеет разработка способов такой регенерации.

В этом аспекте важной и актуальной задачей представляется проведение экспериментальных исследований, направленных на разработку процесса регенерации фильтрующих материалов, обеспечивающего сохранение основных фильтрующих характеристик.

В данной главе проведено исследование возможности применения полимерных волокнистых фильтрующих материалов, прошедших регенерацию, для тонкой очистки воздуха.

##### **4.1. Методы исследований**

Формирование полимерных волокнистых фильтрующих материалов проводили с использованием технологии «melt-blowing». Технология получения фильтрующих материалов включала [10] переработку гранулята в экструдере, аэродинамическое распыление расплава и формирование волокнисто-пористого слоя на формообразующей оправке. В качестве основного материала использовали гранулированный полиэтилен высокого давления марки ПЭВД 15803-020 (температура плавления  $T_{пл} = 110$  °С, определена методом ДТА). Для получения первичного фильтрующего материала (далее – первичный фильтроматериал) изготавливали фильтроэлементы в виде полотна размером  $70 \times 50 \times 0,5$  см, которые использовали в системах тонкой очистки воздуха рабочих помещений.

После выработки рабочего ресурса фильтроэлементов проводили их демонтаж и подвергали процессу регенерации. Технологическая схема регенерации включала плавление полотен на воздухе ( $T_{пл} = 220$  °С) и

измельчение полимерной массы в пневмоструйной мельнице с выделением трех фракций:

- 1 – микронная составляющая (размер частиц 50–300 мкм);
- 2 – субмикронная составляющая (10–50 мкм);
- 3 – летучая фракция (менее 10 мкм).

Фракции 1 и 2 смешивали и гранулировали. Полученный гранулят вновь подвергали пневмодиспергированию методом «melt-blowing» с сохранением технологических режимов, изготавливая фильтрующие элементы в виде полотна размером 70×50×0,5 см (далее – вторичный фильтроматериал).

Данный способ регенерации фильтроэлементов основан на эффекте перевода большинства захваченных фильтроматериалом микронных и субмикронных частиц загрязнителя в летучую фракцию, которая в дальнейшем отсеивается.

Фильтрационные свойства анализировали путем измерения аэродинамического сопротивления и коэффициента проскока масляного тумана согласно ГОСТ 12.4.294-2015 (EN 149:2001+A1:2009). Измерение электростатических характеристик полимерных материалов осуществляли согласно ГОСТ 25209-82. Динамическую вязкость расплава  $\eta$  «melt-blown» материалов определяли по скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  согласно международному стандарту ISO 1133. Пористость образцов изучали с помощью автоматического анализатора изображений «Mini Magiscan». Микроскопические исследования (контроль размеров частиц фракций и параметров волокон) проводили с применением электронного микроскопа «NANOLAB – 7» при 500 – кратном увеличении.

#### **4.2. Результаты исследований процесса регенерации полимерных волокнистых материалов и их обсуждение**

На рисунке 4.1 показаны фильтрационные характеристики первичного и вторичного материалов. Анализ приведенных результатов показывает, что эффективность фильтрации масляного аэрозоля для вторичных фильтроматериалов несколько выше, а аэродинамическое сопротивление – ниже, чем для первичных. Для сравнения приведены также фильтрационные характеристики неэлектризованного микрофильтра Петрянова для очистки воздуха. При сравнении фильтрационных свойств волокнисто-пористых фильтроматериалов, получаемых аэродинамическим распылением расплава полимера, установлено, что исследуемые показатели для «melt-blown» материалов выше, чем у микрофильтра Петрянова. Такие результаты могут быть обусловлены наличием в «melt-blown» материалах спонтанного электростатического заряда. Электростатический заряд является полезным



фактором при очистке газовых сред от субмикронных частиц загрязнителей [10]. Наличие статического заряда (электретный эффект) обеспечивает более эффективное улавливание за счет захвата кулоновскими силами заряженных частиц загрязнителя, а также нейтральных частиц, приобретающих наведенный дипольный момент в поле электрета.

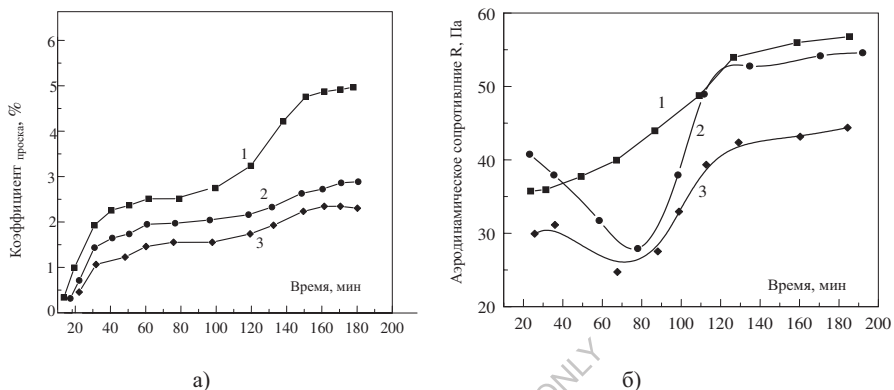


Рисунок 4.1 – Фильтрационные свойства волокнисто-пористых материалов: а) коэффициент проскока масляного тумана (средний размер частиц аэрозоля  $\approx 0.2$  мкм); б) аэродинамическое сопротивление: (1) – микрофильтр Петрянова, (2) – первичный материал, (3) – вторичный материал

В работе [27] было показано, что в пневмодиспергируемых волокнистых полимерных материалах существует спонтанный электретный эффект, обусловленный особенностями технологического процесса – повышенными температурами в зоне обработки полимеров, близкими к тем, при которых начинается интенсивная термоокислительная деструкция макромолекул, воздействием распыливающего воздуха, существованием в расплаве полимера макромолекул с «врожденными» дефектами, которые выступают в роли структурных ловушек носителей заряда, и т.п. В этой связи важную информацию о фильтрационных свойствах этих материалов и о реализуемых ими механизмах фильтрации могут предоставить классические методы анализа такого явления, как электретное состояние полимерных диэлектриков.

Исследованы электрофизические свойства первичного и вторичного фильтроматериалов – наличие спонтанного электретного заряда. Для этого исследуемые образцы размещали между двумя электродами, нагревая с некоторой линейной скоростью, и фиксировали протекающий в цепи ток. График тока в функции температуры представляет собой спектр термостимулированных токов (ТСТ), по характеру которого можно судить о

механизмах, ответственных за проявление электретного эффекта. Преимуществом выбранного метода электретно-термического анализа является высокая чувствительность и разрешающая способность, а также возможность отслеживания релаксационных процессов в веществе, находящемся в различных фазовых состояниях, с регистрацией температур перехода между ними. ТСТ фиксировали при скорости нагрева образца 5 °С/мин. Также определяли эффективную поверхностную плотность заряда (ЭППЗ) бесконтактным компенсационным методом [28].

На рисунке 4.2 представлены спектры ТСТ «melt-blown» материалов. Видно, что у вторичных волокнистых материалах при увеличении ЭППЗ в 2 раза возрастает интенсивность пика ТСТ с  $T_{\max} \sim 60-63$  °С. Характерный для ПЭВД [29] пик ТСТ в температурном интервале 100–105 °С, который соответствует началу фазового перехода при плавлении, у вторичного материала смещается на 5–10 °С в сторону более низких значений  $T$ , причем интенсивность его повышается.

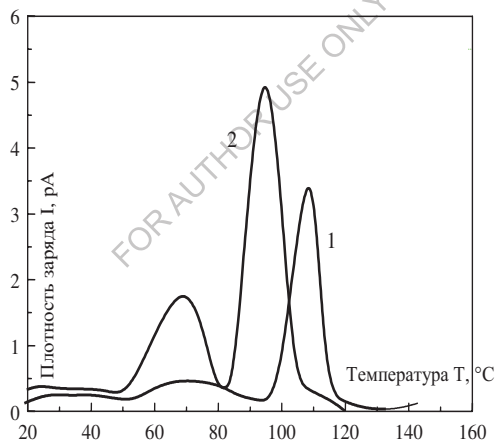


Рисунок 4.2 – ТСТ-спектры melt-blown образцов: (1) – первичный материал (ЭППЗ,  $\sigma_{\text{ф}} = 0,65$  нКл/см<sup>2</sup>), (2) – регенерированный материал ( $\sigma_{\text{ф}} = 1,2$  нКл/см<sup>2</sup>)

Для выявления факторов, обуславливающих проявление полимерными волокнистыми материалами электретных свойств, целесообразно применить ИК-спектроскопию. На ИК-спектрах пропускания (записаны с помощью спектрометра UR-20) «melt-blown» образцов (рисунок 4.3 а) идентифицированы пики, соответствующие винилиденовым, винильным и трансвиниленовым группам [29]. Эти группы могут выступать в качестве нейтральных центров захвата по отношению к носителям заряда [16]. На ИК –

спектрах вторичного материала (рисунок 4.3 б) отмечено значительное увеличение интенсивности пика в области  $1720\text{ см}^{-1}$ , который отвечает кислородсодержащим функциональным группам – гидроксильным  $\text{OH}$  и карбонильным  $\text{C=O}$ . Эти группы, обладающие дипольным моментом и способные вносить вклад в дипольную поляризацию, могут быть ответственны за появление на спектрах ТСТ вторичного материала интенсивного низкотемпературного пика ( $T_{\text{max}} \sim 60 - 63\text{ }^\circ\text{C}$ ). Увеличение содержания таких групп в материале, по-видимому, является следствием повторного пневмодиспергирования и причиной отмеченного снижения температуры фазового перехода на  $5-10\text{ }^\circ\text{C}$  в связи с изменением химической структуры «melt-blown» волокон.

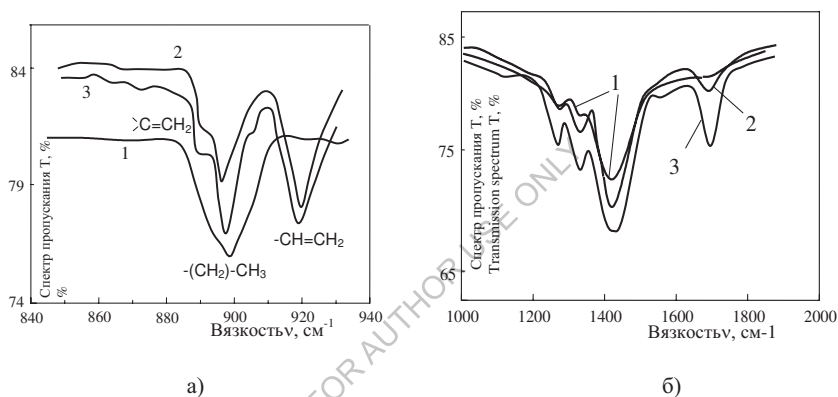
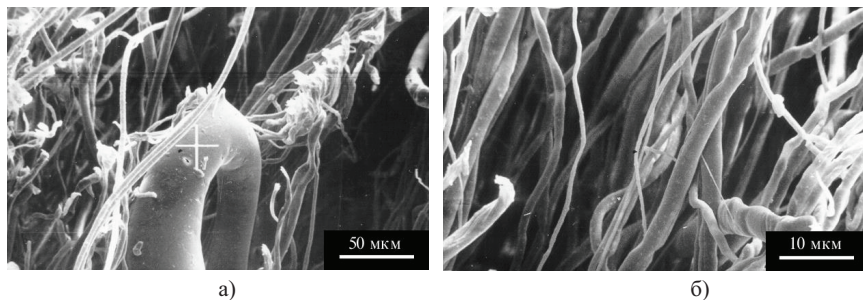


Рисунок 4.3 – ИК – спектры пропускания пленок ПЭВД, полученных из первичного (1), вторичного (2) волокнистого материала и из исходного полимера (3) для «melt – blown» образцов (а) и для вторичного материала (б)

Очевидно, примененная схема регенерации обеспечивает усиление электретного эффекта в полимерных волокнистых материалах, что, как показано выше, связано с улучшением эксплуатационных свойств последних.

На рисунке 4.4 показана структура первичных и вторичных фильтроматериалов. Анализ приведенных изображений позволяет оценить геометрические параметры волокон. Подтверждается факт уменьшения толщины волокон (до диаметра  $1\text{ мкм}$ ). Установлено также, что пористость как первичных, так и вторичных образцов составляет около  $90\%$ .



а) первичный; б) вторичный фильтроматериал

Рисунок 4.4 – Структура волокнистых материалов при 500-кратном увеличении

Диаметр волокон и плотность материала являются определяющими характеристиками для волокнистых фильтрующих материалов [30]. Чем ниже диаметр волокон и выше плотность их укладки, тем меньше размер пор в материале, что повышает эффективность очистки. Это вполне применимо к вторичному материалу, для которого предполагаемое повышение тонкости и эффективности фильтрации должно быть обусловлено значительным увеличением количества мелких пор при сохранении суммарного значения пористости.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что разработанный процесс регенерации фильтрующих материалов, обеспечивает сохранение основных фильтрующих характеристик и обеспечивает возможность применения полимерных волокнистых фильтрующих материалов, прошедших регенерацию, для тонкой очистки воздуха. В последнем случае материал, подвергаемый дополнительному воздействию факторов процесса «melt–lowing», приобретает ряд свойств, способствующих повышению его фильтрующей способности для тонкой очистки воздуха. Приведенные экспериментальные данные достаточно хорошо иллюстрируют возможности предлагаемого процесса регенерации.

## Заключение

Ужесточение требований к качеству и надежности выпускаемых изделий, а также необходимость повышения сроков службы машин, механизмов и различных устройств, эксплуатация которых связана с использованием воздушных сред, является причиной появления новых и совершенствования традиционных методов получения фильтрующих материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками. Рассмотренные в данной работе вопросы теории и практики создания фильтрующих материалов использованы авторами при разработке фильтрующих элементов и устройств на их основе для очистки воздуха от ультрадисперсных аэрозолей, создания систем индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). На основании анализа требований, предъявляемых к фильтрующим материалам, показано, что эффективность очистки газов можно значительно повысить путем дополнительного применения в процессе фильтрации электрического поля, обеспечивающего интенсификацию процессов фильтрации и реализацию дополнительных механизмов осаждения из газовой фазы различных веществ, включая ионы железа и других металлов, ультрадисперсные аэрозоли, дымы, туманы и т.п.

Показано, что в воздушных фильтрах СИЗОД могут быть успешно использованы полимерные волокнисто-пористые материалы, полученные методом «melt-blowing» из полимерных гранул, несущие электростатический заряд, а для интенсификации очистки газовых потоков от ультрадисперсных аэрозолей – высокопористые материалы на основе пеноникеля, используемые в качестве осадительных электродов в электростатических фильтрах.

Предложены несложные в аппаратурном оформлении схемы получения электростатических полимерных волокнистых фильтроэлементов. Впервые разработана экологически чистая безрастворная технология переработки полимеров аэродинамическим диспергированием расплавов, которая адаптирована к формированию тонковолокнистых электростатических фильтроматериалов, применяемых в качестве СИЗОД для легких респираторов. Специфические методы фильтрационных испытаний, разработанные для фильтроматериалов Петрянова, впервые применены к электростатическим melt-blown фильтроэлементам, выявлена зависимость их эксплуатационных характеристик от структурных и электрофизических параметров. Новые электростатические ФЭ использованы для замены фильтроматериалов Петрянова в легких респираторах.

Установлено, что наиболее высокая эффективность осаждения заряженных и нейтральных частиц достигается в поляризованном

электростатическом фильтре, содержащем диэлектрический фильтрующий материал, помещенный в электрическое поле большой напряженности, создаваемое окружающими металлическими электродами. В результате поляризации перемычек диэлектрика (образование диполей) на их поверхности возникают сильные электрические заряды, благодаря которым доминируют силы кулоновского и индукционного осаждения частиц, являющиеся наиболее эффективными механизмами осаждения как диэлектрических, так и электропроводных высокодисперсных частиц.

подавляющее большинство фильтров после выработки своего ресурса не поддается регенерации, поскольку это, как правило, связано с большими энергетическими затратами. Вместе с тем, достаточно большую актуальность с точки зрения ресурсосбережения имеет разработка способов такой регенерации. В монографии приведены результаты исследований основных фильтрационных характеристик исходных и регенерированных фильтроматериалов, полученных по процессу «melt–lowing» (коэффициент проскока, аэродинамическое сопротивление), а также электрофизические свойства первичного и вторичного фильтроматериалов, наличие спонтанного электретажного заряда. Разработан процесс регенерации фильтрующих материалов, обеспечивающий сохранение основных фильтрующих характеристик и возможность применения полимерных волокнистых фильтрующих материалов, прошедших регенерацию, для тонкой очистки воздуха. В последнем случае фильтрующий материал, подвергаемый дополнительному воздействию факторов процесса «melt–lowing», приобретает ряд свойств, способствующих повышению его фильтрующей способности при тонкой очистке воздуха.

## Список литературы

1. Тумилович, М.В. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение/ М.В.Тумилович, Л.П.Пилинович, В.В.Савич, О.Л.Сморыго, А.Е.Галкин. – Минск: Беларус. Навука, 2010. –282 с.
2. Родионов, А.И. Техника защиты окружающей среды/ А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников. – Москва: Химия, 1989. –512 с.
3. Мазус, М.Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей/ М.Г. Мазус, А.Д. Мальгин, М.Л. Моргулис. – Москва: Машиностроение, 1985. – 240 с.
4. Солдатов, В.С. Работы Института физико-органической химии АН БССР в области химии и физико-химии полимеров / В.С. Солдатов // Пластические массы. – 1987. – № 11. – С. 9–12.
5. Станкевич, В.М. Микрофильтрационные материалы на основе радиационно-модифицированных полиолефинов: дис. ... канд. техн. наук / В.М. Станкевич; ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2006. – 130 с.
6. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки/ В.В. Белоусов. – Москва: Металлургия, 1988, – 256 с.
7. Балтренас, П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов/ П.Б. Балтренас. – Москва: Стройиздат, 1990. – 184 с.
8. Папков, С.П. Полимерные волокнистые материалы / С.П. Папков. – Москва: Химия, 1986. – 224 с.
9. Двухименный, В.А. Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС/ В.А. Двухименный, Б.М. Столяров, С.С. Черный. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 88 с.
10. Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В.А. Гольдаде [и др.]; под науч. ред. Л.С. Пинчука. — Гомель: ИММС НАНБ, 2000. — 260 с.
11. Filters and filtration. Handbook / ed. C. Dickenson, 3rd ed. – Oxford Elsevier Adv. Tech., 1992. – 780 p.
12. Зотов, С.В. Волокнистые электретенные фильтроматериалы на основе полиолефинов для средств индивидуальной защиты органов дыхания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Зотов; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2006. – 21 с.
13. Emi, H. Collection Efficiency of High Efficiency Particulate Air Filter/ H. Emi, C. Kanaoka// Powder Technology. –1984. –р. 490–500.
14. Frederick, E.R. Hoe dust filter selection depends on electrostatics / E. R. Frederick // Chem. Eng. – 1961. – Vol. 68, No 13. – P. 107–114.

15. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков / А.Д. Зимон. – Москва: Химия, 1967. – 372 с.
16. Кравцов, А.Г. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы/ А.Г.Кравцов, Марченко, С.В. Зотов, В.М. Станкевич, А.Д. Наумов; под общ. ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель: БелГУТ, 2012. –319 с.
17. Кравцов, А. Г. Полимерные электретные фильтроматериалы для защиты органов дыхания / А.Г. Кравцов, В.А. Гольдаде, С.В. Зотов; под науч. ред. Л. С. Пинчука. – Гомель: ИММС НАНБ, 2003. – 204 с.
18. Шатский, С.Н. Противопылевой респиратор модели ШБ-1 «Лепесток» для защиты органов дыхания от радиоактивных аэрозолей / С.Н. Шатский, П.И. Басманов // Санитария и гигиена: труды конф. по радиологической медицине. – Москва: Медгиз, 1957. – С. 45.
19. Очистка воздуха. Учеб. пособие/ Е.А. Штокман [и др.]; под общ. ред. Е.А. Штокман. – Москва: Изд.60 АСВ, 1998.– 320 с.
20. Страус, В. Промышленная очистка газов/В. Страус. – Москва: Химия, 1981. – 250 с.
21. Тумилович, М.В. Исследование закономерностей кольтмации высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах/ М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, В.И. Байков [и др.]// Наука и техника. – 2012.– №1. –с.67–74.
22. Тумилович, М.В. Влияние скорости потока и электрических сил на эффективность фильтрации ультрадисперсных аэрозолей / М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, А.Е. Галкин// Вестник БНТУ. –№5. – 2010. – С.54–60.
23. Тумилович, М.В. Исследование закономерностей кольтмации высокодисперсных частиц в пористых волоконных материалах в электрическом поле / М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, В.И. Байков [и др.]// Наука и техника. – 2012.– №5. –с.3–7.
24. Тумилович, М.В. Пористые порошковые материалы и устройства на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды /М.В. Тумилович, В.В. Савич, Л.П. Пилиневич // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы 3-го Междунар. симпозиума, Минск, 21–22 окт. 2008 г. / Ин-т порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси; редкол.: П.А. Витязь [и др.].– Минск, 2008. – С. 366–386.
25. Пилиневич, Л.П. Высокоэффективное устройство для очистки помещений от пыле-газовых выбросов, образованных в результате пожаров и взрывов/ Л.П. Пилиневич, В.В.Савич, М.В. Тумилович, А.Е. Галкин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: материалы 4-й междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–8 июня 2007 г.; редкол.: Э.Р. Бариев [и др.].–Минск, 2007. – С. 124–125.



26. Тумилович, М.В. Пористые материалы и устройства на их основе для очистки воздуха от пылегазовых выбросов, сварочных и других ультрадисперсных аэрозолей / М.В. Тумилович, В.В. Савич, Л.П. Пилинович, А.Е. Галкин // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 8-й междунар. науч-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. / Ин-т порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси; редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 104–105.

27. Kravtsov A.G. Electret Effect in the Corona Discharge-Treated Fibers Based on Polipropilen /A.G. Kravtsov, H. Brünig// Polymer Science.– 2000. – Ser. B. – Vol. 42. – N 5–6. – P. 163-165.

28. Electrets./ Ed. by Sessler G.M. –Berlin: Springer –Verlag, 1987. – 319 s.

29. Као, К. Перенос электронов в твердых телах (1ч.)/ К.Као, В. Хуанг.- Москва: Мир,1984. –352 с.

30. Кравцов, А. Г. Волокнистые фильтры. Электронное издание (монография)/ А. Г. Кравцов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. –212 s.

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**More  
Books!**



yes  
**I want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн – в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов! окружающей среде благодаря технологии Печати-на-Заказ.

Покупайте Ваши книги на  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

KS OmniScriptum Publishing  
Brivibas gatve 197  
LV-1039 Riga, Latvia  
Telefax: +371 686 20455

[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)  
[www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

OMNIscriptum



FOR AUTHOR USE ONLY