НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

ПОРИСТЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

И ИЗДЕЛИЯ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

получение ◆ свойства ◆ применение











НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт порошковой металлургии

ПОРИСТЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

получение ◆ свойства ◆ применение



Минск
«Беларуская навука»
2010

УДК 621.762.2

Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение / М. В. Тумилович [и др.]. − Минск : Беларус. навука, 2010. − 365 с. − ISBN 978-985-08-1221-6.

Обобщены известные литературные данные, патентная информация, и, главным образом, результаты собственных исследований авторов по получению, свойствам и применению пористых порошковых материалов (ППМ), предназначенных для защиты здоровья человека, охраны окружающей среды и медицинской техники. Приведены сведения о разработанных устройствах с повышенной эффективностью работы, достигаемой за счет использования пористых элементов из ППМ, для очистки, обезжелезивания, обессоливания и обеззараживания питьевой воды, очистки воздуха от ультрадисперсных аэрозолей, влаги и масла, снижения уровня шума пневматических систем, предотвращения распространения пламени и др. Приведены сведения о ППМ, используемых в ортопедических, дентальных, кардиологических и офтальмологических имплантатах и других изделиях медицинской техники. Показаны преимущества разработанных ППМ и устройств на их основе по сравнению с известными и традиционно используемыми, даны рекомендации по их применению.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, а также студентов высших и средних учебных заведений.

Ил. 169. Табл. 23. Библиогр.: 375 назв.

А в т о р ы:
М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич,
О. Л. Сморыго, А. Е. Галкин

Р е ц е н з е н т ы:
доктор технических наук, профессор В. М. Капцевич,
доктор технических наук, профессор Е. Е. Петюшик

ISBN 978-985-08-1221-6

© Институт порошковой металлургии, 2010
© Оформление. «Издательский дом «Беларуская навука», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 6

Принятые сокращения 10

1. ППМ, их свойства, назначение, области применения и требования, предъявляемые к ним (*М. В. Тумилович, О. Л. Сморыго*) 11

1.1. Основные свойства ППМ 11

1.2. Пути повышения эксплуатационных характеристик ППМ для очистки воды, воздуха, снижения уровня шума 23

2. ППМ для очистки жидкостей от механических примесей тангенциальной фильтрацией (*М. В. Тумилович*) 40

2.1. Закономерности процесса очистки жидких сред в ППМ при тангенциальной фильтрации 41

2.2. Разработка градиентных композиционных ППМ из порошка и волокна для тангенциальной фильтрации 78

2.3. Установка для фильтрации технической и питьевой воды, других пищевых жидкостей с применением режимов тангенциальной фильтрации 87

3. ППМ и устройства на их основе для обезжелезивания, обессоливания и обеззараживания воды и очистки сточных вод (*М. В. Тумилович*) 91

3.1. ППМ и устройства на их основе для обезжелезивания воды 91

3.2. ППМ и устройства на их основе для обессоливания воды в электрическом поле 109

3.3. ППМ и устройства на их основе для обеззараживания воды в электрическом поле 113

3.4. ППМ и устройства на их основе для биологической очистки сточных вод и озонирования питьевой воды 140

4. ППМ и устройства на их основе для очистки воздуха в электрическом поле от ультрадисперсных аэрозолей (*М. В. Тумилович, А. Е. Галкин*) 148

4.1. Влияние режимов фильтрации и структурных параметров ППМ на эффективность осаждения ультрадисперсных аэрозолей 149

4.2. Влияние электрического поля на осаждение аэрозольных частиц в пористых материалах..... 154

4.3. Влияние электрических и конструктивных параметров электростатического фильтра на его эксплуатационные характеристики 171

4.4. Оптимизация структурных и технических параметров электростатического фильтра для очистки воздуха от ультрадисперсных аэрозолей и проведение его испытаний..... 182

5. ППМ и устройства на их основе для очистки и осушки газов, в том числе при отрицательных температурах (*М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич*)..... 190

5.1. Исследование процесса абсорбции газов жидкими сорбентами и выбор оптимальной схемы устройства для очистки и осушки газов 190

5.2. Разработка ППМ и выбор жидкого сорбента для отделения влаги из газов при отрицательных температурах 200

5.3. Устройства для очистки и осушки газов 212

6. ППМ для снижения уровня шума пневматических систем (*М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич*) 218

6.1. Влияние поровой структуры ППМ на процесс глушения шума 219

6.2. Глушители шума выхлопа систем пневмоприводов..... 227

6.3. Разработка глушителя шума производительностью до 200 000 м^3/ч 229

7. ППМ и изделия медицинской техники на их основе (*М. В. Тумилович, В. В. Савич*)..... 235

7.1. История и развитие работ в области применения ППМ для медицинских имплантатов и других изделий медицинской техники 235

7.2. Технологии и материалы порошковой металлургии в производстве пористых ортопедических имплантатов 244

7.3. Конструкции пористых имплантатов позвонков..... 258

7.4. Протез тела позвонка с возможностью дистракции в позвоночно-двигательном сегменте с опорными элементами из ППМ 266

7.5. Исследования фрагментов пористых имплантатов с костными тканями методами сканирующей электронной микроскопии 273

7.6. Результаты клинического использования имплантатов шейных и грудных позвонков..... 279

8. ППМ с ячеистой структурой для охраны здоровья человека и окружающей среды (*О. Л. Сморыго*)..... 281

8.1. Материалы с ячеистой структурой и их принципиальные особенности 281

8.2. Технология получения высокопористых ячеистых материалов, разработанная в ГНУ «Институт порошковой металлургии»..... 288

8.3. Применение материалов с ячеистой структурой в области охраны окружающей среды и защиты здоровья человека..... 294

8.4. Применение материалов с ячеистой структурой и других высокопористых объемно-структурированных материалов для нейтрализации отработавших газов автотранспорта 299

8.5. Применение катализаторов на ячеистых носителях для нейтрализации органических соединений вентиляционных выбросов 309

9. Перспективные области применения результатов разработанных ППМ и устройств на их основе (*М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич*) 314

9.1. Новые конструкции фильтрующих установок с повышенной эффективностью очистки жидкостей..... 314

9.2. Композиционные металлополимерные ППМ для очистки и обезвоживания топлива..... 318

9.3. Огнепреградители и защитные устройства технологического оборудования химических производств, систем газоанализа, газовой сварки, резки 320

Заключение..... 323

Приложения 325

Литература..... 334

ВВЕДЕНИЕ

Охрана окружающей среды и защита здоровья человека являются главными задачами не только для правительства и органов охраны природы и здравоохранения, но и для ученых, работающих в различных отраслях промышленности, в том числе и в области порошковой металлургии.

Рост городов, бурное развитие промышленности, автомобильного транспорта, интенсификация сельского хозяйства, значительное расширение площадей орошаемых земель, улучшение культурно-бытовых условий и ряд других факторов все больше усложняют проблемы обеспечения чистой водой и воздухом, снижения уровня шума и др.

Дефицит пресной воды и чистого воздуха в крупных городах уже сейчас становится мировой проблемой. Все более возрастающие потребности промышленности и сельского хозяйства, населения в чистой воде и воздухе, устройствах для снижения уровня шума заставляют все страны, ученых мира искать разнообразные средства для решения этой проблемы. Поэтому исследование и разработка новых материалов и устройств, направленных на защиту здоровья человека и охрану окружающей среды, – важная и актуальная задача.

Наиболее распространенным методом очистки жидкостей и газов является фильтрация через пористые проницаемые материалы. Традиционно применяемые фильтрующие материалы: ткани, картон, бумага, войлок и другие пористые органические и неорганические материалы, не могут быть использованы в полной мере для целей защиты здоровья человека и охраны

окружающей среды, так как некоторые из них могут в процессе эксплуатации выделять токсические компоненты, которые способны привести к поражению жизненно важных органов человека. В то же время пористые порошковые материалы (ППМ) из титана широко используются для надежной стерильной очистки жидкостей и газов в пищевой и медицинской промышленностях, жилищно-коммунальном хозяйстве, здравоохранении, так как не содержат вредных и токсичных веществ и не вносят их в профильтрованный жидкий или газообразный продукт, а также с успехом могут применяться для очистки воды от железа, деминерализации, очистки воздуха. ППМ из порошков бронзы успешно обеспечивают эффективное отделение влаги и масла из сжатых газов, глушение шума различных пневматических систем.

ППМ имеют и другие существенные преимущества по сравнению с вышеуказанными материалами. Они обладают более широким диапазоном воспроизводимых размеров пор и пористости, имеют высокую механическую прочность, способны работать в широком диапазоне температур и давлений, могут иметь различную форму и строение поровой структуры. Именно поровая структура оказывает решающее влияние на такие эксплуатационные характеристики ППМ как проницаемость, грязеемкость, ресурс работы, тонкость очистки, механическая прочность, уровень глушения шума и др.

Современный этап развития порошковой металлургии сопровождается появлением идей создания новых и совершенствования традиционных технологий получения ППМ, которые, прежде всего, направлены на достижение высоких эксплуатационных характеристик и снижение себестоимости ППМ.

За последние годы опубликован ряд монографий и научных статей, посвященных различным аспектам получения и применения ППМ. Среди авторов этих работ – известные ученые и специалисты-практики: Г. И. Аксенов, Р. А. Андриевский, В. Н. Анциферов, Ю. М. Бальшин, С. В. Белов, К. Е. Белявин, Л. С. Богинский, П. А. Витязь, В. П. Георгиев, В. М. Капцевич, А. Г. Косторнов, С. С. Кипарисов, А. Н. Леонов, Е. Е. Петюшик, Л. П. Пилиневич, О. П. Реут, О. В. Роман, Л. М. Федорченко, В. К. Шелег, Б. Ф. Ши-

бряев и др. Материалы и методы, содержащиеся в публикациях данных авторов, обеспечили широкое внедрение ППМ во многих отраслях промышленности.

Тем не менее существующие технологии и оборудование, применяемые в них ППМ не всегда обеспечивают требуемый уровень эксплуатационных свойств, нуждаются в постоянной модернизации с учетом последних достижений науки и техники.

Анализ опубликованных работ, посвященных задачам создания ППМ для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды, показал, что обеспечить требуемый комплекс эксплуатационных параметров можно путем целенаправленного регулирования поровой структуры и применения дополнительных силовых полей, приводящих к изменению классических условий фильтрования жидкостей и газов. Это, прежде всего, электрические, гравитационные, центробежные поля, которые могут быть использованы для интенсификации процессов фильтрации жидкостей и газов, например в процессах тангенциальной фильтрации, электрофильтрации жидкостей и аэрозолей, а также адсорбционные силы, позволяющие реализовать дополнительные механизмы поглощения из газовой или жидкой фазы токсичных веществ, которыми могут выступать, например микроорганизмы или вирусы, ионы железа, влага и т. п. Применяя ППМ с оптимальной поровой структурой, специальные конструкции и устройства, а также используя дополнительные внешние силы и комбинированные методы, можно обеспечить повышение эффективности очистки жидкостей и газов, глушения шума и добиться тем самым улучшения качества питьевой воды, воздуха в жилых и производственных помещениях, что приведет к повышению уровня защиты здоровья человека и охраны окружающей среды.

В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований по получению ППМ и изделий на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды, в частности для очистки, обезжелезивания, обессоливания и обеззараживания питьевой воды, пищевых и биологических жидкостей, а также для тонкой очистки газовых сред от токсичных

примесей, снижения уровня шума и т. п. является важной и актуальной проблемой, имеющей большое научное, практическое и социальное значение.

Предлагаемая вниманию читателей работа не претендует на полное освещение всех достижений технологий порошковой металлургии в области создания ППМ и изделий на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды и не может быть исчерпывающей, поэтому авторы с благодарностью примут от читателей все критические замечания, пожелания и предложения по теме.

Авторы глубоко признательны рецензентам за сделанные ими ценные замечания, которые были учтены при подготовке окончательного варианта данной работы; выражают благодарность за помощь, оказанную при написании монографии, старшим научным сотрудникам ГНУ «Институт порошковых материалов» С. А. Беденко, А. М. Тарайковичу, Г. А. Шеко; а также за использованные в ней материалы, предоставленные кандидатом технических наук В. В. Мазалюком (глава 2), доктором технических наук, профессором А. Н. Леоновым, кандидатами технических наук А. Н. Ромашко и М. М. Дечко, научными сотрудниками ГНУ «Институт порошковой металлургии» А. И. Маруковичем, В. А. Микуцким, Ю. В. Велюго (глава 8).

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВПСМ – высокопористые сотовые материалы
ВПЯМ – высокопористые ячеистые материалы
ГАП – гидроксиапатит
ДВС – двигатель внутреннего сгорания
ДЭГ – диэтиленгликоль
ДЭС – двойной электрический слой
ЗПМ – звукопоглощающий материал
ЛОС – летучие органические соединения
ОГ – отработанные газы
ОМР – омывающий раствор
ПВМ – пористые волокновые материалы
ППМ – пористые порошковые материалы
ПСМ – пористые сетчатые материалы
ПТФЭ – композиционный ППМ из фторопласта
ПЭВД – полиэтилен высокого давления
ПЭЕК – полиэрейлетеркетон
РПМ – материалы с пространственно-решетчатой структурой
СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез
СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость
СЭМ – сканирующая электронная микроскопия
ТКФ – трикальцийфосфат
ТЭГ – триэтиленгликоль
ФТ – фосфат титана
ФЭ – фильтроэлемент
ЭГ – этиленгликоль
ЭС – электростимуляция

1. ППМ, ИХ СВОЙСТВА, НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

1.1. Основные свойства ППМ

ППМ характеризуются рядом структурных и эксплуатационных параметров, которые во многом определяются свойствами исходных порошков. К важнейшим характеристикам ППМ относятся: пористость, ее распределение в объеме ППМ и ее вид (открытая, закрытая, тупиковая); форма, размеры пор (средние и максимальные) и их распределение в объеме ППМ; коэффициент извилистости пор; коэффициент регулярности поровой структуры; вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости; удельная поверхность; механическая прочность, коррозионная стойкость и другие физико-химические свойства. Создание технологических процессов получения ППМ невозможно без изучения их свойств, влияния на них свойств исходных порошков, технологических параметров изготовления, определения закономерностей их влияния на эффективность работы ППМ.

Структурные свойства. Термин «поровая структура» означает расположение и взаимосвязь составляющих элементов рассматриваемой системы в пространстве. Согласно работе [1], понятие «структура» подразумевает набор четко разграниченных структурных элементов, обладающих ограниченной автономностью. Объем пористого материала V, состоящего из однородных элементов, можно выразить в виде

$$V = nv, \tag{1.1}$$

где n – количество структурных элементов; v − объем одного структурного элемента.

Для ППМ, состоящего из разнородных структурных элементов, объем V можно выразить как

$$V = \sum n_i v_i, \tag{1.2}$$

где v_i – среднестатистическая величина из случайного набора n_i структурных элементов.

ППМ по строению поровой структуры можно разделить на изотропные и анизотропные.

Для изотропных поровых структур свойственно регулярное чередование однородных структурных элементов в пространстве. Изотропная поровая структура характерна для ППМ, полученных из сферических частиц одного размера и одного типа укладки, а также сеток регулярного плетения. Анизотропным поровым структурам свойственно некоторое распределение структурных элементов по числу, размерам, объему, форме и т. д. в одном или в нескольких направлениях. К анизотропным поровым структурам можно отнести многослойные ППМ, изготовленные из частиц разных размеров в слоях.

Пористостью называется отношение объема пор к полному объему ППМ:

$$П = V_n / V, \tag{1.3}$$

где П – пористость; V_n – объем пор; V – объем пористого тела.

В зависимости от вида пор различают открытую ($П_о$), закрытую ($П_з$) и тупиковую ($П_т$) пористость, т. е. общая пористость (П) равна сумме трех видов пористости [2] (рис. 1.1):

$$П = П_о + П_з + П_т. \tag{1.4}$$

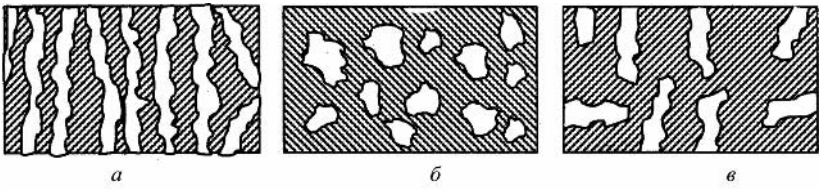


Рис. 1.1. Пористость: *а* – открытая; *б* – закрытая; *в* – тупиковая

Ввиду того, что наибольшее влияние на процессы фильтрации, капиллярного транспорта, катализа оказывают открытые поры, при изготовлении ППМ всегда стремятся к тому, чтобы они имели максимально открытую пористость.

Соотношение между открытой и закрытой пористостью в пористых образцах исследовали Р. А. Андриевский и И. М. Федорченко из восстановленного железного порошка, порошков меди и серебра [3]. В результате исследований было установлено, что при общей пористости около 7 % − все поры закрытые, а при общей пористости 20−30 % закрытая пористость составляет всего 2−3 %. Необходимо отметить, что объем закрытых или открытых пор зависит от формы частиц, а также от технологии изготовления ППМ.

Большое влияние на образование тупиковых и закрытых пор оказывают диффузионные процессы при спекании, термической обработке, пластической обработке, сварке, пайке и т. д. На распределение пористости по объему ППМ оказывают влияние такие факторы, как гранулометрический состав и форма исходных порошков, наличие в них оксидов и других компонентов, метод формования, режим спекания и т. д. Наиболее равномерную пористость по объему имеют ППМ, полученные из порошков со сферической формой частиц, гладкой поверхностью и узкого гранулометрического состава.

Неравномерность распределения пористости по поверхности ППМ значительно снижает тонкость фильтрации, равномерность диспергации жидкостей и газов, в то время как изменяющееся распределение пористости по толщине ППМ позволяет значительно повысить их эксплуатационные характеристики. Анализ литературных данных показывает, что на распределение пористости по поверхности и объему ППМ наиболее существенное влияние оказывает способ формования.

Одной из важнейших характеристик ППМ, применяемых в качестве фильтрующих, является *величина пор.* Поровые каналы имеют сложное извилистое строение и состоят из сужающихся и расширяющихся участков (см. рис. 1.1, *а*). Важнейшим показателем является размер пор в самых узких участках, так

как именно они обеспечивают заданную тонкость фильтрования и оказывают влияние на проницаемость ППМ.

В ППМ различают максимальную и среднюю величину пор. Экспериментальные исследования показывают, что отношение между средним размером пор и средним размером частиц порошка, из которого изготовлен ППМ, может колебаться от 0,1 до 0,6 в зависимости от формы частиц порошка и технологии изготовления образцов [3].

Максимальные размеры пор являются одной из важнейших характеристик ППМ, так как определяют максимальный размер частиц загрязнителя, которые могут пройти через него. Средние размеры пор обычно используют для сравнения различных ППМ.

Распределение пор по размерам дает представление о числе или объеме пор каждого размера, диапазоне изменения размеров пор в ППМ и является наиболее полной и объективной характеристикой ППМ по сравнению с максимальными и средними размерами пор.

Размеры пор ППМ, используемых в качестве фильтрующих, определяют тонкость фильтрования. Экспериментально установлено, что для ППМ, изготовленных из сферических порошков, отношение максимального размера пор к максимальному размеру частиц загрязнителя, прошедших через ППМ, лежит в диапазоне от 2 до 3.

Форма пор ППМ может быть самой разнообразной: глобулярной равноосной, щелевидной с разными соотношениями осей, гофрированной, неправильной с разветвленными краями и др. Наиболее простую форму пор имеют ППМ, изготовленные из сферических частиц одного размера с гладкой поверхностью. Однако и в этом случае форма пор может значительно изменяться в зависимости от укладки частиц. Наиболее существенное влияние при глубинных процессах фильтрования через ППМ оказывает именно форма их поровых каналов. Экспериментальные исследования показывают, что в зависимости от формы поровых каналов ППМ ресурс работы и производительность их в качестве фильтров могут как уменьшаться, так и увеличиваться в несколько раз. Наиболее перспективными филь-

трующими ППМ являются те, у которых размеры пор изменяются в направлении фильтрации, а форма пор имеет вид усеченного конуса [4].

Для ППМ длина поры всегда больше его толщины. Увеличение длины поры по сравнению с толщиной пористого материала характеризуется *коэффициентом извилистости пор*. Извилистость пор зависит от формы исходных частиц и способа их формования, а также от толщины ППМ. Извилистость пор также существенно влияет на тонкость фильтрования и проницаемость ППМ.

Одной из важнейших количественных характеристик структуры ППМ является *коэффициент регулярности пористой структуры*, впервые предложенный А. Г. Костроновым [5−6]. Структура ППМ является регулярной, если разность между величинами максимального и среднего размеров пор ($D_{max} - D_{ср}$) стремится к минимуму. Только ППМ с регулярной структурой могут дать объективное представление об их действительных характеристиках. Регулярность поровой структуры зависит от способа получения ППМ и формы частиц исходных порошков. Наиболее эффективными ППМ являются те, которые имеют регулярную структуру при минимальной толщине.

Физико-механические, проницаемые и фильтрующие свойства. Для фильтрующих ППМ наряду с высокими гидравлическими и фильтрующими характеристиками важное значение имеет их механическая прочность. Понижая или повышая давление прессования, температуру, время спекания, можно изменять их прочность и одновременно структурные свойства. Однако данные приемы повышения прочности могут привести к закрытию наиболее мелких пор (что снижает проницаемость), а иногда − к образованию трещин. Поэтому при изготовлении фильтрующих ППМ необходимо обеспечивать такие технологические параметры, при которых готовые изделия обладают одновременно высокой открытой пористостью и достаточной механической прочностью для работы в конкретных условиях.

Согласно данным, приведенным в работе [7], для фильтрующих ППМ оптимальными режимами спекания являются такие,

при которых отношение среднего размера межчастичного контакта к среднему размеру частиц порошка составляет ~ 0,15.

Способность ППМ пропускать через себя жидкость или газ называется *проницаемостью.* Если пористость обусловливает собой объем, который может быть заполнен жидкостью или газом, то проницаемость определяет собой пропускную способность ППМ. Величина проницаемости определяется скоростью, с которой жидкость или газ протекает через единицу площади образца при определенном перепаде давления.

Проницаемость (так же как пористость и размеры пор) зависит, во-первых, от свойств исходных порошков и, во-вторых, от параметров технологии изготовления ППМ.

Для ППМ, используемых в качестве распределителей жидкостей и газов, диспергаторов газа в жидкости, важное значение имеет *распределение локальной проницаемости* по поверхности ППМ. Локальная проницаемость ППМ зависит от свойств исходных порошков, толщины ППМ и метода формования. Для получения минимального отклонения проницаемости по поверхности ППМ от среднего значения необходимо стремиться к обеспечению регулярности поровой структуры, максимальной равномерности засыпки при формовании, использованию сферических порошков узких фракций, вибрации определенных параметров.

Процесс очистки жидкости от загрязнений при ее течении через ППМ под действием приложенного давления количественно характеризуется тонкостью фильтрования. Тонкость фильтрования численно равна размеру частиц, прошедших через фильтр с заранее установленным коэффициентом фильтрования. Как правило, коэффициент отфильтровывания составляет не менее 0,96. *Абсолютная тонкость фильтрования* определяется по максимальному размеру частиц загрязнителя, прошедших через ППМ. Тонкость фильтрования в первую очередь зависит от размеров и формы пор, а также от формы и размеров частиц загрязнителя. От данных параметров зависит и главная эксплуатационная характеристика ППМ, применяемых в качестве фильтров − *ресурс работы* − время (количество очищенной среды), за которое проницаемость уменьшается на 50 %.

Параметры эффективности. ППМ должны обладать одновременно высокими значениями проницаемости и тонкости очистки, пористости, механической прочности и других свойств, которые, как правило, находятся в противоречивой взаимосвязи друг с другом. Так, например, чем выше пористость и размеры пор ППМ, тем больше коэффициент проницаемости, но меньше тонкость очистки и механическая прочность. Поэтому для оценки эффективности ППМ разработаны различные параметры. Так, авторами работы [8] приводится параметр эффективности по проницаемости:

$$E_1 = \frac{\sqrt{K_\mu}}{d_n}, \tag{1.5}$$

где K_μ − коэффициент проницаемости; d_n − средний размер пор.

Параметр эффективности E_1 характеризует проницаемость материала при заданном размере пор, а следовательно, производительность процесса фильтрования определяется целиком его поровой структурой, не зависит от вида фильтруемой жидкости, перепада давления, формы и геометрических размеров ППМ.

С целью выявления оптимального сочетания таких характеристик, как грязеемкость и ресурс, автором работы [4] предложен параметр эффективности по грязеемкости:

$$E_4 = \frac{GQ}{S}, \tag{1.6}$$

где G − грязеемкость; Q − количество профильтрованной жидкости; S − площадь фильтрования.

Автором работы [10] предложен обобщенный параметр эффективности, который наиболее полно характеризует фильтрующий ППМ. Данный параметр эффективности учитывает такие характеристики, как производительность, определяемую его проницаемостью, количество профильтрованной жидкости до увеличения перепада давления на фильтрующем элементе в 2 раза, т. е. ресурс, механическую прочность, а также объем фильтра, определяющий стоимость материала, из которого он изготовлен.

Данный параметр эффективности определяется следующим выражением:

$$E_5 = \frac{\sigma_{\text{пор}}}{\sigma_{\text{к}}} E_1 \frac{Q}{V_{\text{ф}}}, \tag{1.7}$$

где $\sigma_{\text{пор}}$ и $\sigma_{\text{к}}$ – прочность пористого и компактного материала, из которого изготовлен ППМ, соответственно, $V_{\text{ф}}$ – объем ФЭ.

Для оценки эффективности ППМ, применяемых для очистки сжатых газов не только от механических частиц, но и от капель и паров воды, аэрозолей, автором работы [11] предложен следующий параметр эффективности:

$$H_1 = E_5 \frac{(T_{\text{ср}} - T_{\text{р}})}{T_{\text{ср}}}, \tag{1.8}$$

где $T_{\text{ср}}$ – температура среды; $T_{\text{р}}$ – точка росы на выходе.

Авторы данной работы предлагают параметр эффективности E_6, который позволяет наиболее точно учитывать стоимость материала, из которого изготовлен фильтрующий элемент, для этого необходимо в выражении (1.7) вместо объема фильтра $V_{\text{ф}}$ использовать массу фильтра $M_{\text{ф}}$.

С помощью параметров эффективности (1.5–1.8) рекомендуется производить оптимизацию фильтрующих ППМ.

Основные области применения. Пористые материалы находят самое широкое применение в технике для очистки жидких и газообразных сред, при решении вопросов охраны окружающей среды и защиты здоровья человека. Как было отмечено выше, ППМ обладают широким диапазоном воспроизводимых размеров пор и пористости, имеют высокую механическую прочность, способны работать в широком диапазоне температур и давлений, а также в агрессивных средах [12–13]. Технологическим достоинством ППМ является возможность их соединения путем сварки, припекания, пайки и т. п., а также возможность получения материалов практически любой поровой структуры и практически любого химического состава, в том числе пористых композиционных материалов [14–17].

ППМ используются для: очистки питьевой, сточной и технической воды; щелочных, кислотных и солевых растворов; горюче-смазочных материалов; пищевых продуктов (молока, вина, соков, растительного масла); лаков и красок; расплавов металлов, полимеров и солей; сжиженных и сжатых газов и т. д. [18–28].

Также ППМ используют для сепарации твердой или жидкой фазы в технологических процессах химического, микробиологического и нефтехимического производства.

Широкое распространение ППМ получили в качестве распределителей потоков газов и жидкостей в различных установках. Они используются при пневмотранспорте дисперсных сред, диспергации газа в жидкости при биологической очистке сточной или озонировании питьевой воды, в качестве элементов пористого охлаждения или нагрева, газораспределительных решеток для создания кипящего или псевдоожиженного слоя, для снижения уровня шума пневматических систем, локализации распространения пламени и т. п. [29–47].

На основании анализа многочисленных информационных источников [35–64] требования к фильтрующим ППМ в зависимости от их назначения можно разбить на следующие основные группы.

ППМ, применяемые для очистки жидких и газообразных сред от посторонних примесей, должны обладать высокой проницаемостью, высокой тонкостью фильтрования, поддаваться многократной регенерации и иметь большой ресурс работы. Высокая проницаемость позволяет обеспечить необходимую производительность процесса фильтрования, а высокая тонкость последнего обеспечивает хорошее качество готового продукта, долговечность и надежность машин и механизмов, выполнение норм СанПИН и стандартов по воздуху и воде. Многократная регенерация и большой ресурс работы фильтра снижают стоимость процесса фильтрования.

ППМ, применяемые для диспергации жидкостей и газов, должны обладать высокой механической прочностью и равномерным распределением пор по площади фильтрования. Первая позволяет выдерживать гидро- и пневмоудары, перепады давления, связанные с условиями их эксплуатации, а вторая обеспе-

чивает равномерное распределение газа или жидкости по всей поверхности пористого материала, что является главным условием эффективной работы процессов аэрации, флотации, охлаждения, пневмотранспорта и т. д.

ППМ, применяемые для защиты объектов от пламени, шума, вибрации, в первую очередь должны обладать высокой механической прочностью, выдерживать высокие и низкие температуры, быть нейтральными к агрессивным и взрывоопасным средам. Эти требования должны обеспечить взрывозащиту в различных средах иногда высшей категории взрывоопасности, а также надежную работу многих аналитических приборов и технологического оборудования.

ППМ, применяемые для сепарации ценных продуктов, должны обладать высокой грязеемкостью, т. е. способностью задерживать большое количество ценных продуктов при сохранении высокой проницаемости, кроме того, они должны поддаваться 100 %-ной регенерации.

В настоящее время разработано множество технологических приемов и методов получения ППМ, позволяющих в той или иной мере удовлетворить вышеуказанные требования. Назначение и основные области применения фильтрующих ППМ представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. **Фильтрующие ППМ и основные области их применения**

Назначение	Объект или среда использования	Область применения
Очистка жидкостей и газов от загрязнений	Питьевая, техническая и сточная вода	Коммунальное хозяйство, медицина, сельское хозяйство, промышленность
	Топливо, смазочные материалы, моющие растворы	Транспорт, сельское хозяйство, промышленность
	Щелочные, кислотные и солевые растворы	Радиоэлектронная и химическая промышленность