

УДК 62-784.432

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА И КЛЮЧЕВЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

¹Маркелова Н.П., ²Кадомцев Г.М., ¹Черняев С.И.

¹Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана», Калуга, e-mail: fn2kf@bk.ru;

²ЗАО «Фильтр», Товарково, e-mail: filtr@ftov.ru

Настоящая статья посвящена анализу технологических и конструктивных особенностей обеспечения высокоэффективной очистки подаваемого в чистые помещения воздуха, а также воздуха, образующегося в ходе технологических процессов и характеризующегося различным аэрозольным составом. Обобщены основные параметры, влияющие на эффективность очистки: плотность, скорость и длина свободного пробега частиц, толщина фильтрующего материала, скорость, давление и температура газа – носителя частиц, размер волокон и их распределение в объеме фильтрующей среды. Охарактеризованы основные эффекты, обеспечивающие улавливание субмикронных частиц фильтрующей средой – инерция, диффузия и зацепление. Показана необходимость варьирования скоростью воздуха в фильтрующем материале, диаметром волокон и плотностью их упаковки. Рассмотрены условия формирования однонаправленного воздушного потока в чистых помещениях.

Ключевые слова: чистые помещения, высокоэффективная очистка воздуха, HEPA-фильтры, ULPA-фильтры, зацепление, инерция, диффузия

THE ANALYSES OF THE HIGH-EFFICIENCY AIR FILTRATION TECHNOLOGY AND THE KEY CHARACTERISTICS OF ITS PROVIDING

¹Markelova N.P., ²Kadomtsev G.M., ¹Chernyaev S.I.

¹Kaluga Branch Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: fn2kf@bk.ru;

²CJSC «Filtr», Tovarkovo, e-mail: filtr@ftov.ru

The article is devoted to the analyses of the technological and constructional peculiarities of providing the high-efficiency purification of the air going to clean premises, and the air, formed during the technological processes and having various aerosol compositions. The main aspects that influence the purification efficiency are generalized: the density, the speed and length of the particles free path, the filtrating material thickness, the speed, pressure and temperature of the gas containing particles, the fibers size and their distribution in a filtration environment sample. The main factors providing submicron particles recovery by filtrating environment such as inertia, diffusion and gearing are characterized. The importance of varying the air speed in material, the fibers diameter and their density in a wrapping is shown. The conditions of the unidirectional air flow forming in clean premises are described.

Keywords: clean rooms, highly effective purification of air, high efficiency particulate air filters, ultra low penetration air filters, interception, inertia, diffusion

Высокотехнологичные отрасли отечественной промышленности – микроэлектронная, радиоэлектронная и приборостроительная, фармацевтическая, химическая и биохимическая, энергетическая и космическая, медицинская, микробиологическая, пищевая и др., производственные процессы которых сопровождаются образованием аэрозолей в виде пыли, возгонов, газов и других веществ, остро нуждаются в получении чистого технологического воздуха и, следовательно, в обеспечении высокоэффективной очистки технологических газов и воздуха от содержащихся в них во взвешенном состоянии микрочастиц и газообразных веществ различной природы. Под термином «высокоэффективная очистка газов от аэрозолей» подразумевается процесс удаления из газовых объемов и потоков взвешенных в них твердых или жидких частиц сколько угодно малых размеров с эффективностью не менее 99%. Практика показывает, что

наличие различных примесей в воздухе отрицательно влияет на качество рабочих процессов и, как следствие, на качество изделий. Необходимость обеспечения высокоэффективной защиты производственного персонала, технологических процессов и продукции от загрязнений требует создания специфической защитной среды, называемой «чистыми помещениями». В то же время интенсификация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, в различных отраслях промышленности, эксплуатация высокопроизводительных энерго- и ресурсосберегающих систем, наряду с разработкой и внедрением современного технологического оборудования существенно увеличили выбросы в атмосферу значительного количества токсичной пыли и вредных газообразных примесей. В связи с этим усложняются и задачи обеспечения условий, предъявляемых к чистым помещениям.

Согласно стандарту ISO 14644-1, разработанному Международной организацией по стандартизации (ISO), чистое помещение (cleanroom) – это помещение, в котором контролируется счетная концентрация аэрозольных частиц, и которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения, и в котором, при необходимости, контролируются другие параметры, например температура, влажность и давление. В технике чистых помещений размерный диапазон контролируемых в воздухе частиц принято делить на три области: частицы диаметром от 0,1 до 5,0 мкм; частицы диаметром менее 0,1 мкм (ультрамалые частицы); частицы диаметром более 5,0 мкм (макрочастицы). При определении счётной концентрации частиц в воздухе чистых помещений измерения проводят, как правило, для частиц с диаметрами от 0,1 до 5,0 мкм (наличие в воздухе частиц этого размерного диапазона положено в основу классификации чистых по классам чистоты).

В технологиях высокоэффективной фильтрации, как правило, наличествует множество взаимозависимых переменных, характеризующихся параметрами производственной среды, в той или иной мере влияющих на качество рабочих процессов: температурой, влажностью, скоростью движения воздуха, а также содержанием в нем химических и механических (аэрозолей) примесей. Но есть и общие условия обеспечения процесса: например для того, чтобы очищенный воздух не перемешивался с уже загрязнённым, необходима циркуляция воздуха с организацией воздушных потоков; а чтобы в чистое помещение не просачивался воздух извне, нужен положительный перепад давления.

Следовательно, говоря об эффективности фильтрации, характеризующейся наивысшей пылеемкостью при наименьшем перепаде давления, в сочетании с длительностью срока эксплуатации, при минимальных затратах потребляемой энергии, можно утверждать, что она является определяющим показателем при технико-экономическом обосновании адекватности выбора фильтра.

В настоящем исследовании анализируются особенности HEPA (High Efficient Particulate Air filters) и ULPA (Ultra Low Penetration Air filters) фильтров (с максимально возможной эффективностью очистки, которую можно реально проконтролировать – 99,999995% для частиц наиболее проникающего размера), предназначенных для чистых помещений с однонаправлен-

ным воздушным потоком (воздух подается через систему высокоэффективных фильтров и проходит через помещение, сохраняя направление движения).

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью проведения анализа технологических и конструктивных особенностей обеспечения высокоэффективной очистки подаваемого в чистые помещения воздуха, а также воздуха, образующегося в ходе технологических процессов и характеризующегося различным аэрозольным составом.

Основные требования, предъявляемые к группам высоко- и сверхвысокоэффективных HEPA и ULPA фильтров для очистки воздуха, а также к их материалам, установлены ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Методикой определения эффективности фильтров, согласно их характеристикам, упомянутым группам фильтров присвоены следующие обозначения: HEPA фильтрам – обозначение H; ULPA фильтрам – обозначение U.

До начала 80-х годов прошлого столетия для фильтрации воздуха в чистых помещениях применялись HEPA-фильтры, т.к. на тот момент они были наиболее эффективными из коммерчески доступных фильтров. В настоящее время, например, для производства интегральных схем, используются более эффективные ULPA-фильтры [14, 15].

Высокоэффективные фильтры, используемые в чистых помещениях, выполняют двойную функцию: они удаляют из воздуха мелкие частицы и в помещениях с однонаправленным потоком воздуха формируют воздушный поток. Расположение и расстояние между фильтрами, так же, как и величина скорости воздуха, оказывают непосредственное влияние на концентрацию взвешенных в воздухе частиц и формирование застойных зон, аккумулялирующих аэрозоли, а также пути миграции частиц по всему чистому помещению [7, 11]. Таким образом, наличие вентилятора и высокоэффективного фильтра является лишь начальным условием формирования однонаправленного потока воздуха. Для обеспечения требуемого качества его чистоты необходим правильный баланс всех его составляющих [6, 9].

Несмотря на то, что различные стандарты по чистым помещениям определяют класс чистоты только исходя из концентрации взвешенных в воздухе частиц, (например, класс ИСО 6 или класс 1000), для достижения требуемого уровня чистоты в различных отраслях промышленности используются различные сочетания HEPA

и ULPA-фильтров [1, 2]. В помещениях класса ИСО 4 (класс 10) и более чистых, для создания однонаправленного воздушного потока, в т.ч. при производстве изделий с субмикронной геометрией, применяются ULPA-фильтры, а в помещениях класса ИСО 6 (класс 1000) или менее чистых, в т.ч. для фильтрации микроорганизмов и инертных частиц, приемлемы HEPA-фильтры в сочетании с турбулентной вентиляцией, что достигается установкой их на входе воздушного потока в помещение или в воздуховоде приточной вентиляции. В чистых помещениях класса ИСО 5 (класс 100) HEPA-фильтры устанавливаются по всей площади потолка для создания однонаправленного вертикального воздушного потока [12, 17].

В высокоэффективных кассетных фильтрах применяется укладка фильтрующего материала в виде V-образных блоков, представляющих собой гофрированную штору «гармошка». Известны два типа конструкций высокоэффективных фильтров – с глубокими или с мелкими гофрами. При использовании обоих типов обеспечивается большая площадь поверхности фильтрующего материала и его безопасное крепление в корпусе, не допускающее протечек неочищенного воздуха [6, 12].

HEPA-фильтры характеризуются эффективностью фильтрации и величиной перепада давления при номинальном расходе воздуха. По определению, HEPA-фильтр должен обладать эффективностью фильтрации мелких частиц (с размером около 0,3 мкм), в том числе некоторые виды бактерий, не ниже 99,97% (допускается вероятность проникновения не более 3 из 10 000 частиц) [11].

Обычно HEPA-фильтры с глубокими гофрами имеют размеры 0,6×0,6×0,3 м, номинальный расход воздуха 0,47 м³/с, максимальное давление 250 Па и площадь фильтрующего материала от 15,9 до 25,5 м². Соотнеся объем расхода воздуха с площадью фильтрующего материала, получим значение скорости воздуха (при номинальном расходе) в диапазоне от 1,8 до 3,0 см/с. Эти величины являются определяющими, т.к. их изменение приводит к изменению показателя эффективности фильтрации. Следовательно, увеличение площади фильтрующего материала приводит к снижению перепада давлений на фильтре и повышению его эффективности [4, 7].

В фильтрах с глубокими гофрами, используемых в стандартных системах вентиляции со скоростью воздуха до 2,5 м/с, длинный лист фильтровальной бумаги складывается зигзагом, в котором каждый

последующий сгиб направлен в противоположную сторону. Расстояние между сгибами (глубина гофра) составляет обычно 15 или 30 см. Для обеспечения свободного течения воздуха через бумагу и стабильного рабочего режима, между складками размещают гофрированную алюминиевую фольгу (сепаратор), а получившийся пакет прикрепляют к пластмассовому, деревянному или металлическому корпусу – рамке [6, 13]. Альтернативным методом является гофрирование фильтрующего материала непосредственно в процессе его производства. Последующая укладка в блок обеспечивает жесткость конструкции и свободное течение воздуха. Дальнейшая установка фильтра в системе должна обеспечивать надежное уплотнение, исключаящее проход неочищенного воздуха через места примыкания фильтра.

В настоящее время высокоэффективные фильтры выпускаются с мелкими складками – минигофром, без алюминиевых сепараторов – гофрированная фильтровальная бумага разделяется нитью, крепится полосками термоклей или посредством рельефа на поверхности бумаги, что позволяет создать 6–8 гофров (против 2–3 глубоких) на 2,5 см длины. Такие фильтры – компактны и содержат больше фильтрующего материала на единице площади, обеспечивая меньший перепад давления, и применимы в чистых помещениях с однонаправленным воздушным потоком при скорости движения воздуха 0,35–0,5 м/с [2, 12].

Обозначение ULPA применяют для фильтров, имеющих эффективность фильтрации выше, чем у HEPA-фильтров. Эффективность ULPA-фильтров может достигать 99,9995% для частиц диаметром 0,1–0,2 мкм. Конструкция и принцип работы этих фильтров аналогичны фильтрам HEPA. ULPA-фильтры отличаются тем, что их фильтрующая среда содержит большую долю тонких волокон, а перепад давления на фильтре несколько выше. По сравнению с HEPA-фильтром, имеющим такую же площадь фильтрующего материала, ULPA-фильтр будет иметь большее сопротивление. Так как ULPA-фильтры имеют более высокую эффективность, к ним не применимы методы испытаний, разработанные для HEPA-фильтров, они требуют использования лазерных счетчиков частиц или счетчиков ядер конденсации [6].

Высокоэффективный фильтр предназначен для улавливания частиц с размерами приблизительно 2 мкм и менее. Для удаления более крупных частиц используют более дешевые предварительные фильтры [9, 10].

Фильтрующая среда высокоэффективного фильтра выполняется из стеклянных волокон с диаметрами в диапазоне 0,1–10 мкм, причем расстояние между волокнами больше размеров улавливаемых частиц. Волокна по всей глубине фильтрующей среды ориентированы в пространстве случайным образом и не образуют пор какого-либо определенного размера [7, 10].

В процессе движения через фильтрующую среду взвешенные частицы сталкиваются с волокнами или с уже осевшими на них другими частицами. На частицу, столкнувшуюся с волокном или с ранее осевшей частицей, действуют силы Ван-дер-Ваальса, величина которых достаточна для «захвата» и удержания частицы [10, 18].

Существуют три основных эффекта, ответственных за улавливание субмикронных частиц фильтрующей средой, – инерция, диффузия и зацепление. Действующие одновременно с ними электростатический эффект и эффект сита менее значимы и могут не учитываться.

Улавливание за счет инерции существенно для более крупных частиц, обладающих массой и импульсом, достаточными для отклонения от линии тока и столкновения с волокном при обтекании его потоком воздуха.

В процессе улавливания за счет диффузионного механизма частицы с малой массой (недостаточной для того, чтобы отклониться от линии тока) движутся почти произвольно, так как они подвергаются постоянной бомбардировке другими частицами и молекулами газа, в котором они находятся во взвешенном состоянии. В процессе такого произвольного движения в разных направлениях частицы могут касаться волокон фильтра или ранее захваченных частиц.

Если частица, проходя мимо волокна по линии тока, сталкивается с ним за счет своего конечного размера, т.е. тангенциально, то такой механизм улавливания называется эффектом зацепления. Наконец, эффект сита возникает, когда расстояние между волокнами меньше диаметра улавливаемых частиц [3, 10]. Таким образом, частицы самого большого размера улавливаются за счет инерции, частицы среднего размера – благодаря эффекту зацепления, а самые маленькие частицы – вследствие диффузии. Известно, что размер частиц с минимальной эффективностью улавливания (размер частиц с максимальной проникающей способностью – most penetrating particle size, MPPS) изменяется в зависимости от таких параметров, как: плотность частиц; скорость и длина сво-

бодного пробега частицы; толщина фильтрующего материала; скорость, давление и температура газа – носителя частиц; размер волокон и их распределение в объеме фильтрующей среды.

Учитывая зависимость эффективности фильтрации от такого набора переменных, следует полагать, что размер частиц с максимальной проникающей способностью жестко не фиксирован. К тому же аэрозоли весьма неоднородны и имеют различную природу (клетки кожи, частицы кремния и др.), что требует варьирования скоростью воздуха в фильтрующем материале, диаметром волокон и плотностью их упаковки [10].

В большинстве конструкций высокоэффективных воздушных фильтров фильтрующий материал уложен в виде большого числа параллельных гофров – очень узких и глубоких. Типичный высокоэффективный воздушный фильтр с размерами 0,6×1,2×0,15 м содержит 140–190 таких гофров. При прохождении через гофры поток воздуха выравнивается и движется в одном направлении. Кроме того, сопротивление фильтровальной бумаги практически однородно, поэтому через каждый гофр движется примерно одинаковое количество воздуха. Эти два фактора – равномерность сопротивления фильтрующей среды и большое число гофров – приводят к однородности потока воздуха, выходящего из фильтра, что позволяет сформировать однонаправленный поток воздуха, в котором малые частицы движутся вдоль линий тока [5, 16].

Однако само по себе использование высокоэффективных фильтров не гарантирует однонаправленности воздушного потока за ними. Для того чтобы обеспечить однонаправленный поток воздуха через все чистое помещение, возможно, потребуется применение и других устройств. Кстати будет отметить, что в некоторых высокоэффективных фильтрах применяется укладка фильтрующего материала в виде V-образных блоков, и они не предназначены для помещений с однонаправленным воздушным потоком [5, 17].

Проведенный анализ существующих технологических и конструктивных особенностей обеспечения высокоэффективной очистки, подаваемого в чистые помещения воздуха, а также воздуха, образующегося в ходе технологических процессов и характеризующегося различным аэрозольным составом, позволяет определиться с направлениями экспериментальных исследований по дальнейшей оптимизации параметров, влияющих на эффективность

очистки. В том числе показана необходимость варьирования скоростью воздуха в фильтрующем материале, диаметром волокон и плотностью их упаковки.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2000. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1. Классификация чистоты воздуха. Госстандарт России, 2000.
2. ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1. Классификация чистоты воздуха. Часть 1. ISO 14644-1-99. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003.
3. ГОСТ Р ЕН 13779-2007. Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования. Госстандарт России, 2007.
4. ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха ЕРА, НЕРА И ULPA. 2010.
5. Высокоэффективный фильтр [Электронный ресурс] // Сайт компании «ТД-Фореста». – Режим доступа: <http://td-foresta.ru/books/uait-v/vysokoeffektivnyi-filtr.html> (Дата обращения 01.12.2015).
6. Высокоэффективная фильтрация воздуха [Электронный ресурс] // Сайт производственной фирмы по вентиляции и изолирующим помещениям – ООО «ВентПроек-Монтаж» – Режим доступа : <http://protonos.ru/node/98> (дата обращения 25.11.2015).
7. Высокоэффективная фильтрация воздуха [Электронный ресурс] // Сайт компании «Camfill Farg» – Режим доступа: <http://www.regionproekt.com/camfillfarg/filtrvozduha.htm> (Дата обращения 01.12.2015).
8. Двухименный В.А., Столяров Б.М., Черный С.С. Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС. – М.: Энергоатомиздат, (1987). – С. 63–78.
9. Крупнов Б.А., Шарафудинов Н.С. Руководство по проектированию систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.-Вена, 2008. – 220 с.
10. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. – М.: Знание, 1968. – С. 26, 38, 51–54.
11. Проектирование чистых помещений [Электронный ресурс] // Сайт компании «Приоритет Инвест». – Режим доступа: <http://www.prioritetinvest.ru/proektirovanie-chistyykh-pomeshchenii-str103.html> (дата обращения 6.11.2015).
12. Проектирование чистых помещений для микроэлектронной промышленности [Электронный ресурс] // Сайт производственной фирмы по вентиляции и изолирующим помещениям – ООО «ВентПроекМонтаж» – Режим доступа: <http://protonos.ru/taxonomy/term/3> (Дата обращения 26.11.2015).
13. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха: учебник для вузов. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. – 399 с.
14. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. – М.: Изд-во «Клирум», 2008. – 304 с.
15. Фильтры: какие бывают [Электронный ресурс] // Вентпортал : сайт. – Режим доступа: <http://ventportal.com/node/257> (дата обращения 25.11.2015).
16. Фукс Н.А. Тонкая фильтрация газов и жидкостей волокнистыми материалами (обзор) // Химическая промышленность. – 1979. – № 11. – С. 48–51.
17. Чистые помещения / под ред. И. Хакаява. – М.: Мир, 1990. – С. 157–160.
18. Kirsh A.A., Stechkina I.B. The theory of aerosol filtration with fibrous filters. Fundamental of Aerosol Science. – N.Y.: Wiley, 1978. – P. 165.