

УДК 62-784.432

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ****<sup>1</sup>Маркелова Н.П., <sup>2</sup>Кадомцев Г.М., <sup>1</sup>Черняев С.И.**<sup>1</sup>*Калужский филиал, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Калуга, e-mail: fn2kf@bk.ru;*<sup>2</sup>*ЗАО «Фильтр», пос. Товарково, e-mail: filtr@ftov.ru*

Настоящее исследование посвящено анализу особенностей осуществления контроля качества фильтров высокоэффективной очистки воздуха, предназначенных для обеспечения условий, предъявляемых к чистым помещениям. Проанализированы различные подходы к сканированию высокоэффективных фильтров на предприятиях-изготовителях, а также на предприятиях заказчиков. Охарактеризованы современные подходы к решению проблем производственного контроля, а также контроля при вводе в эксплуатацию высокоэффективных фильтров, в соответствии с требованиями, предъявляемыми зарубежными стандартами, а также рекомендации, используемые методы и процедуры, осуществляемые при тестировании ULPA- и HEPA-фильтров. Отмечено, что для каждого фильтра существуют размеры частиц, которые проходят через него с наименьшими потерями, причем этот размер определяется такими переменными параметрами, как дисперсный состав волокон фильтрующей среды, плотность их упаковки и скорость движения воздуха. Обращено внимание на то, что выбор тех или иных подходов к осуществлению контроля высокоэффективных воздушных фильтров в большей мере зависит от специфики используемых технологических процессов и требований, предъявляемых к качественным показателям обеспечения защиты внутренней рабочей среды и внешней среды от загрязнений.

**Ключевые слова:** воздухоочистительные фильтры, контроль высокоэффективных фильтров, HEPA-фильтры, ULPA-фильтры, чистые помещения

**SOME FEATURES OF HIGH-EFFICIENCY AIR FILTERS CONTROL****<sup>1</sup>Markelova N.P., <sup>2</sup>Kadomtsev G.M., <sup>1</sup>Chernyaev S.I.**<sup>1</sup>*Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: fn2kf@bk.ru;*<sup>2</sup>*CJSC «Filtr», Tovarkovo, e-mail: filtr@ftov.ru*

This research deals with the analyses of the peculiarities of carrying out the quality control of high-efficiency air purification filters, which are to provide the conditions demanded in clean premises. Different approaches to the scanning of high-efficiency purification filters on both manufacturing and customer enterprises have been analyzed. There are characterized the up-to-date approaches to solving the problems of manufacturing control, as well as of the control during the commissioning of the high-efficiency filters in accordance with the foreign standards requirements; moreover, the recommendations, the used methods and procedures, carried out while testing the ULPA- and HEPA filters. It is marked that each filter has definite size of particles that flow through it with the least loss, the size being defined by three parameters such as the filter medium fibers powder, the fibers packing density and the air-flow speed. It is paid attention to the fact that the choice of an approach to carrying out the quality control of high-efficiency air purification filters mostly depends on the specificity of technological processes used and the requirements given to the quality indicators of providing the protection of inner working and external environments from contamination.

**Keywords:** air purification filters, high-efficiency filters control, HEPA-filters, ULPA-filters, clean premises

Атмосферный воздух содержит загрязнения (молекулярные (газообразные), мелкодисперсные аэрозоли, пыль), обусловленные различными природными и техногенными факторами. Следовательно, возникает необходимость его очистки перед подачей в производственные помещения различного функционального назначения, согласно предъявляемым специальным требованиям, регламентируемым согласно потребностям тех или иных отраслей промышленности. Например, высокотехнологичные отрасли: микроэлектронная, радиоэлектронная и приборостроительная, фармацевтическая, химическая и биохимическая, энергетическая

и космическая, медицинская, микробиологическая, пищевая и др. – нуждаются в получении чистого технологического воздуха и, следовательно, в обеспечении высокоэффективной очистки воздуха и технологических газов от содержащихся в них во взвешенном состоянии микрочастиц и газообразных веществ различной природы, наличие которых отрицательно влияет на качество рабочих процессов и, как следствие, на качество изделий [1, 8, 9, 12].

Испытания высокоэффективных фильтров очистки воздуха выполняются в двух случаях: на предприятии-изготовителе или на месте эксплуатации [4, 5]. Тем не менее на практике, несмотря на то, что каждый

элемент и готовые фильтры проверяются на герметичность при выпуске с завода, аналогичная проверка проводится и после их монтажа, перед пуском в эксплуатацию. Например, требования, выдвинутые атомной промышленностью к индустрии чистых помещений, привели к обязательному тестированию высокоэффективных фильтров на заводах-изготовителях методами интегрального отбора проб или сканирования. Для выявления возможных повреждений в процессе транспортировки и последующего монтажа, установленные в чистом помещении высокоэффективные фильтры повторно тестируют тем же методом. В результате тестирования регистрируются точечные дефекты фильтрующего материала, требующие устранения или протечки в системе уплотнения, влекущие замену фильтра [2, 12, 14]. Рассмотрим различные варианты потребности, условий и подходов к осуществлению контроля высокоэффективных воздушных фильтров.

Воздух, подаваемый в турбулентно вентилируемое чистое помещение через потолочные диффузоры, очень эффективно смешивается с воздухом чистого помещения. В этом случае допускается наличие в фильтрах нескольких точечных дефектов – разумеется, если их общая площадь не настолько велика, чтобы снизить общую эффективность системы фильтрации и повлиять на требуемый класс чистоты воздуха. Такой подход возможен, поскольку небольшое количество частиц, прошедших через фильтр, достаточно равномерно распределится в воздухе чистого помещения [2]. Однако для систем с однонаправленным воздушным потоком такой подход неправилен, так как в этом случае поток воздуха может перенести все частицы, прошедшие через точечный дефект в фильтре, непосредственно к продукции или месту проведения рабочих операций. Для того, чтобы перемешать поступающие через дефект загрязнения с чистым воздухом, прошедшим фильтр, нужно либо значительное расстояние, либо какой-нибудь метод возмущения потока, например применение дефлекторов. Установка дефлектора в однонаправленном потоке бессмысленна. То есть вполне возможно, что продукт или процесс, требующий отсутствия частиц, может оказаться прямо в потоке воздуха из точечного дефекта и подвергнуться загрязнению [2, 11].

Еще в период зарождения технологии чистых помещений разработчики осознали проблему точечных дефектов и предложили

метод сканирования лицевой поверхности блока установленных фильтров, который позволяет обнаружить не только дефекты в фильтрующем материале, но и неплотности, и протечки в прокладках, а также в системе крепления фильтров. Производители высокоэффективных фильтров, столкнувшись с перспективой обнаружения в ходе таких проверок дефектов, которые не были выявлены при измерении общей эффективности, были вынуждены разработать специальные установки для сканирования фильтров, предназначенных для чистых помещений. Со временем этот метод испытания фильтров из необязательной, дополнительной процедуры превратился в промышленный стандарт, реализованный в США – IEST-RP-CC-001 «HEPA и ULPA-фильтры». Хотя в рекомендациях IEST приводятся методики проверки фильтров для различных значений общей эффективности, заказчики обычно требуют провести проверку фильтров тем же способом (возможны лишь незначительные послабления), который будет использоваться при контроле уже смонтированных фильтров. В рекомендациях IEST описываются способы проверки с помощью фотометров и счетчиков частиц. Существенным свойством любой подобной установки является качественное перемешивание DOP-аэрозоля в воздушной камере стенда для получения на входе фильтра однородного тестового потока. Важную роль играет кожух или дефлектор, устанавливаемый со стороны выхода воздушного потока из фильтра. Он препятствует проникновению в пробоотборник частиц из окружающего фильтр пространства, что могло бы исказить результаты проверки. Перед испытаниями фильтр закрепляется между воздушной камерой стенда и кожухом (дефлектором). Для некоторых испытаний фильтр может устанавливаться внутри воздушной камеры (выходной плоскостью наружу). Такое крепление позволяет проверить не только фильтрующую среду и ее герметичность по отношению к корпусу фильтра, но и герметичность самого корпуса [10].

В старых моделях фотометров оператор устанавливал «нулевую точку», относительно которой в дальнейшем велся отсчет, размещая пробоотборник в потоке воздуха за испытуемым фильтром. Современные фотометры имеют для этих целей собственный встроенный фильтр. Следующим шагом является измерение концентрации аэрозоля до фильтра. Для этого в воздушной камере стенда имеется специальное

отверстие. Если измеренная величина окажется недостаточной, проводят коррекцию режима работы генератора, увеличивая давление воздуха на его входе до тех пор, пока концентрация аэрозоля до фильтра не достигнет требуемой величины. После этого фильтр сканируется пробоотборником сначала по периметру, а затем по всей поверхности фильтрующего элемента таким образом, чтобы области, проверяемые пробоотборником, перекрывались. Фотометр должен фиксировать все протечки, концентрация частиц в которых более 0,01% от значения концентрации аэрозоля до фильтра [4, 10].

Иногда фильтры, успешно прошедшие сканирование, неправильно называют «нулевыми» или «фильтрами 99,99», ошибочно полагая, что их интегральная эффективность должна быть выше 99,97%. При сканировании за «нулевую точку» принимают концентрацию частиц в потоке воздуха за испытуемым фильтром. Таким образом, процедура сканирования может дать аналогичный результат и при тестировании фильтра с более низкой эффективностью – относительные отсчеты не имеют никакого отношения к интегральной эффективности.

Сейчас в некоторые фотометры для получения «нулевой» точки встраивают HEPA-фильтры, но методика измерения с их помощью не вошла ни в один из распространенных нормативных документов. В целом можно сказать, что сканирование является дополнением к измерению интегральной эффективности, а не заменяет его [10].

Метод сканирования посредством использования оптических счетчиков частиц практически идентичен описанному выше, кроме того, что в качестве основного измерительного прибора вместо фотометра используется оптический счетчик частиц. Чаще всего такой метод используется для тестирования ULPA-фильтров, но с не меньшим успехом его можно применять и для HEPA-фильтров. На вход фильтра подается тестовый аэрозоль, а на выходе вся поверхность фильтра сканируется пробоотборником – как и в предыдущем случае – таким образом, чтобы проверяемые области перекрывались. В ходе испытаний требуется измерить концентрацию частиц до фильтра. Эта операция часто вызывает трудности, так как значение концентрации аэрозолей до фильтра может лежать вне рабочего диапазона счетчика, измеряющего концентрацию частиц после фильтра [5, 10].

Существует три способа решения этой проблемы. Первый заключается в разработке и использовании разбавителя при отборе проб до фильтра. Перед проведением измерений необходимо проверить кратность разбавления и стабильность работы разбавителя. Процедура такой проверки описана в рекомендациях IEST-RP-CC-007. Второй способ предполагает использование для измерений до фильтра второго счетчика аэрозолей с небольшим расходом воздуха и, соответственно, возможностью измерения высоких концентраций частиц. В третьем способе для этой цели применяется фотометр, однако предварительно необходимо исследовать соответствие между показаниями счетчика частиц и фотометра. Этот способ используется для специальных испытаний [10].

Метод сканирования фильтров с помощью оптического счетчика аэрозолей чрезвычайно чувствителен, поэтому он лучше всего подходит для измерений внутри чистых помещений. В обычных же условиях любое попадание частиц в поток за фильтром будет рассматриваться как обнаружение дефекта, что может увеличить продолжительность измерений из-за необходимости повторной проверки мнимых дефектов. Очень важен правильный выбор величины, превышение которой считается протечкой (дефектом). Так, выбор в качестве предела одной частицы приведет к высокой вероятности регистрации мнимых протечек и возможности пропустить реальные дефекты. В таких случаях лучше повысить на порядок концентрацию аэрозолей до фильтра и выбрать в качестве предельной величины 10 частиц [3, 10].

При использовании оптических счетчиков частиц выбор материала аэрозоля чаще всего определяется требованиями заказчика. Например, в полупроводниковой промышленности эмиссия газов из фильтров является критическим фактором, поэтому там недопустимо использование жидких тестовых аэрозолей. Наиболее распространенным решением является применение глобулированного полистиролового латекса, выпускаемого в виде суспензии твердых сферических частиц в воде. В качестве генератора аэрозолей в этом случае используется ультразвуковой распылитель (увлажнитель воздуха). Он создает туман из мельчайших капелек воды, содержащих частицы латекса [10, 13]. Остающиеся после испарения воды твердые сферические

частицы используются в качестве тестового аэрозоля. Распределение этих частиц по размерам соответствует размеру исходных частиц в использованной суспензии. Обычно диаметр частиц латекса находится в диапазоне от десятых долей микрона до нескольких микрон. Полупроводниковая промышленность отличается и более жесткими требованиями к величине локальных протечек в ULPA-фильтрах, приближая их значение к величине интегральной проницаемости ULPA-фильтров. При современном технологическом уровне экономически оправдано значение допустимой протечки в 0,001%, но европейский стандарт уже установил для наиболее эффективных фильтров величину 0,0001%. Для регистрации таких значений необходимо использовать оборудование для автоматического сканирования (с отслеживанием координат пробоотборного устройства и поддержанием постоянной скорости сканирования), лазерные счетчики аэрозолей с выходом на компьютер и возможностью измерения очень малых скоростей отсчета частиц, а сама процедура сканирования фильтра должна проводиться в чистом помещении. Только подобное оборудование дает возможность обеспечить чувствительность к протечкам в 0,001% (по сравнению с предельной чувствительностью фотометров в 0,01%), что соответствует интегральной эффективности ULPA-фильтров 99,9999% [2]. Если в ходе сканирования HEPA-фильтра его измеренная эффективность оказалась равна, например, 99,99%, то это означает, что в нем нет точечных дефектов (проколов), трещин или неоднородностей, которые создают протечки более 0,01%. Измеренную этим методом эффективность HEPA-фильтра невозможно сравнивать с результатами измерений по стандарту Mil-Std 282, поскольку они отличаются буквально всем, включая распределение по размерам и концентрацию частиц тестового аэрозоля [7, 16].

При рассмотрении процессов осуществления контроля уже установленных высокоэффективных фильтров также обращают на себя внимание имеющиеся особенности, применяемых методов тестирования, что обусловлено спецификой использования чистых помещений. Так, при поиске дефектов фильтров и систем их крепления используют аэрозоли, полученные из синтетических и натуральных масел, поскольку они дешевы и легко распыляются с помощью сжатого воздуха, небольшого генератора и соп-

ла Ласкина (если же требуется большой расход аэрозоля, используют масляный туман, генерируемый конденсационным методом). Генерируемые при распылении капли маслянистой жидкости являются хорошим тестовым аэрозолем для любого высокоэффективного фильтра, при этом жидкие капли практически не вызывают забивания фильтра. В настоящее время используются диоктилсебацинат (DOS), минеральное масло Shell Ondina, полиальфаолефин (PAO) и диэтилгексилсебацинат (DEHS) [2, 12]. Для получения тестового аэрозоля воздух под высоким давлением пропускают через сопло Ласкина. Фотометр калибруется с помощью аэрозолей того же вещества, которое используется при тестировании фильтров. В особенности это важно в случаях, когда измеряются абсолютные концентрации аэрозолей, а не сравниваются результаты измерений до и после фильтра [6, 10].

Альтернативой фотометру (обеспечивает измерения при концентрации аэрозолей около 10 мг/л) является оптический счетчик аэрозолей, обладающий лучшей чувствительностью (позволяет осуществлять измерения при концентрации аэрозолей менее 0,008 мг/л) и требующий меньшего количества тестового аэрозоля, для получения которого приемлемы как жидкие, так и твердые вещества [5, 10, 14].

В тех производствах, где остаточная эмиссия вещества из протестированного фильтра представляет опасность для технологического процесса, используют аэрозоли сферических частиц полистиролового латекса субмикронных размеров. Однако в большинстве случаев генераторы таких аэрозолей не могут обеспечить концентрацию, достаточную для использования фотометра. Хотя метод измерений с помощью оптического счетчика является более чувствительным, исчерпывающих исследований на эту тему пока не опубликовано [10, 17]. К недостаткам этого метода следует отнести необходимость для оператора в ходе сканирования фильтра сравнивать значения концентрации (или скорости счета), выраженные в дискретных величинах – числе частиц в единице объема или за единицу времени [10].

Тестирование фильтров, как на заводе-изготовителе, так и после монтажа, должно проводиться с использованием счетчиков частиц и атмосферного аэрозоля в качестве тестового. При необходимости к атмосферному аэрозолю можно добавлять аэрозоль,

приемлемый для данного производства [10, 12]. Если для проверки фильтра методом сканирования используются только атмосферные аэрозоли, то их входная концентрация может изменяться в зависимости от условий окружающей среды и от времени, что, в свою очередь, приведет к изменениям концентрации после фильтра. Таким образом, требования постоянства входной концентрации и безопасности материала тестового аэрозоля для полупроводникового производства приводят к выводу об использовании в этой отрасли сферических частиц полистиролового латекса. Несколько производителей выпускают водные суспензии таких частиц. Их легко перевести в аэрозольную форму с помощью ультразвуковых увлажнителей воздуха. Это оборудование легко настраивается, обеспечивает воспроизводимость результатов и весьма экономично по сравнению с генераторами масляного тумана. Выпускаются суспензии частиц латекса с размерами в диапазоне от 0,1 до 1 мкм, поэтому всегда можно выбрать желательный для измерений размер [2, 5].

Если заказчик и/или проектировщик не включают в спецификацию процедуру тестирования фильтров после их монтажа, это может привести к тому, что для установки фильтров будут использованы системы крепления посредственного качества, не рассчитанные на сканирование. Если же позже будет принято решение об улучшении системы фильтрации и ее тестировании, это вызовет необходимость модернизации системы крепления или ее замены. Основной причиной неудовлетворительных результатов тестирования смонтированных в чистом помещении фильтров (при условии, что установленные фильтры не имеют дефектов) являются протечки в уплотнении фильтра – посадочное место. Они возникают вследствие дефектов сварки или герметизации, небрежной или низкокачественной работы персонала, монтировавшего систему крепления фильтров. Если же предназначенные для установки в чистом помещении HEPA-фильтры не подвергались сканированию на заводе-изготовителе, то заметный процент из них не сможет пройти тестирование после монтажа [2, 12]. При проектировании чистого помещения или установки с однонаправленным потоком воздуха стандартной величиной скорости считается  $0,46 \pm 0,10$  м/с. Таким образом, через фильтр должно пройти значительное количество воздуха. Для небольшого устройства или зоны с однонаправленным

воздушным потоком нетрудно генерировать необходимое для измерений количество тестового аэрозоля, что затруднительно в случае с обеспечением одновременного тестирования всей системы фильтров, при увеличении размеров помещения [2, 13].

Альтернативным методом является изоляция одной из секций системы фильтров и последующее тестирование всех секций поочередно. Если по каким-либо причинам это непрактично, то все фильтры перед монтажом следует проверить на установке, аналогичной тем, которые используются для испытания фильтров на производстве. Целью таких измерений является проверка того, что фильтр не получил повреждений при транспортировке, распаковке и перемещениях. По завершении проверки фильтр следует немедленно установить в посадочное место, соблюдая все меры предосторожности. После монтажа всех фильтров необходимо просканировать по периметру уплотнение между каждым фильтром и его посадочным местом, а также всю систему фильтров [2, 12]. Оценив время, которое требуется для того, чтобы вручную просканировать потолок или стенку, состоящую из высокоэффективных фильтров, легко сделать вывод о потребности в разработке методики, позволяющей сократить время тестирования. И действительно, была создана методика, основанная на одновременном использовании нескольких счетчиков частиц. Для ее реализации несколько пробоотборных устройств устанавливаются на тележке таким образом, что они находятся в непосредственной близости к поверхности фильтров. При движении тележки по чистому помещению отбор проб идет не из одной точки, а с линейного участка фильтра. Этот метод проверки занимает меньше времени, и, соответственно, тестируемые фильтры подвергаются меньшему загрязнению тестовым аэрозолем [1, 2].

Европейский стандарт EN 1822, основой которого является национальный стандарт DIN 24183 Германии, описывает метод определения эффективности для HEPA и ULPA-фильтров. Важной отличительной особенностью стандарта является указание на необходимость предварительного определения размера частиц с максимальной проникающей способностью (MPPS) для образца фильтрующей среды испытуемого фильтра, и проведение измерений эффективности фильтра для частиц именно этого размера. Для каждого фильтра существуют размеры частиц, которые проходят через

него с наименьшими потерями, причем этот размер определяется такими переменными параметрами, как дисперсный состав волокон фильтрующей среды, плотность их упаковки и скорость движения воздуха. Поэтому измерение эффективности фильтра для наиболее проникающих частиц логически обосновано. Размер MPPS обычно находится в диапазоне от 0,1 до 0,3 мкм [15].

Подводя итог, следует отметить, что выбор тех или иных подходов к осуществлению контроля высокоэффективных воздушных фильтров, в большей мере зависит от специфики используемых технологических процессов и требований, предъявляемых к качественным показателям обеспечения защиты внутренней рабочей среды и внешней среды от загрязнений.

#### Список литературы

1. Басманов П.И., Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова. – М., 2002. – 193 с.
2. 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).
3. Высокоэффективная фильтрация воздуха [Электронный ресурс]. // Сайт компании «Camfil Farr». – Режим доступа: <http://www.regionproekt.com/camfilfarr/filtrvozdaha.htm> (Дата обращения 26.09.2016).
4. ГОСТ Р ИСО 14644-3-2007. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды Часть 3. Методы испытаний. – М.: Госстандарт России. 2007.
5. ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Часть 1. Классификация, методы испытаний, маркировка. – М.: Госстандарт России. 2010.
6. Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). – Новороссийск: Изд-во Новороссийского филиала Кубанского Государственного технологического университета, 1997. – С. 272–285.
7. Крупнов Б.А., Шарафудинов Н.С. Руководство по проектированию систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.-Вена, 2008. – 220 с.
8. Маркелова Н.П., Кадомцев Г.М., Черняев С.И. Анализ технологии высокоэффективной фильтрации воздуха и ключевых особенностей ее обеспечения // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3–2. – С. 263–267.
9. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. – М.: Знание, 1968. – С. 26, 38, 51–54.
10. Проектирование чистых помещений [Электронный ресурс] // Сайт компании «Приоритет Инвест» – Режим доступа: <http://www.prioritetinvest.ru/proektirovanie-chistykh-pomeshchenii-str103.html> (Дата обращения 26.09.2016).
11. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха: учебник для вузов. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. – 399 с.
12. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. – М.: Изд-во «Клирум», 2008. – 304 с.
13. Чистые помещения / под ред. И. Хакаява. – М.: Мир, 1990. – С.157–160.
14. Designing Cleanroom AMC Control Systems. Tutorial #ES04, ESTECH 2004 – 50 th Annual Technical Meeting of the Institute of Environmental Science and Technology, April 25–28, 2004, Las Vegas, NV.
15. EN 1822 [Электронный ресурс] // Группа компаний «Camfil»: сайт. – URL: <http://www.camfilfarr.ru/---/EN-1822/> (Дата обращения 26.09.2016).
16. Melgaard H. L. Filter Shedding and Automatic Pressure Balance in Batch Depyrogenation Ovens // Pharmaceutical Engineering, Nov/Dec 1988.
17. Moore Jr., Marshall J.G., Kennedy M.A. 1994. Comparative testing of challenge aerosols in HEPA filters with controlled defects, March/April.