



В конце 2005 г. был утвержден международный стандарт ISO 14644-3 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы измерений». Важность этого стандарта чрезвычайно велика. По сути, впервые специалисты, работающие в области технологии чистых производственных помещений, получили официально утвержденный и согласованный ведущими

мировыми экспертами документ, в котором приведены методики измерения каждого из контролируемых в чистом производственном помещении параметров (причем в большинстве случаев у пользователя есть выбор из нескольких вариантов реализации метода) и основные требования к используемым при этом приборам. Отныне аттестация и эксплуатация чистых помещений невозможна без тщательного следования этому стандарту. Можно смело предсказывать, что стандарт ISO 14644-3 станет настольной книгой всех без исключения специалистов по технологии чистых помещений.

Начиная с этого номера, редакция будет знакомить читателей с различными разделами стандарта ISO 14644-3. В этом выпус-

ке журнала мы помещаем две статьи зарубежных специалистов, посвященных поиску и измерению дефектов установленных в чистом помещении высокоэффективных воздушных фильтров.

В первой статье Аксель Делленбах анализирует основные принципы измерения эффективности фильтров путем сканирования и на конкретных примерах стремится добиться у читателя понимания смысла каждого этапа измерений и связанных с этим довольно многочисленных вычислений. О глубине анализа автором сути всей процедуры свидетельствует тот факт, что А. Делленбах обнаружил (и указал в статье) ошибку в формуле, приведенной в опубликованном ISO проекте стандарта.

Вторая статья немецкого специалиста Юргена Блаттнера представляет собой практически готовую методику проверки установленных воздушных фильтров на наличие утечки. Хочется обратить внимание читателей на приведенные в ней замечания, основанные на личном опыте автора и относящиеся к особенностям процедуры проверки фильтров (визуальному контролю, размещению пробоотборников, их размерам и пр.).

Статьи были отредактированы В. И. Калечицем, одним из представителей России в составе рабочей группы WG 3 технического комитета ISO/TC 209, разработавшей и подготовившей к выпуску стандарт ISO 14644-3 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы измерений».

СИСТЕМА ФИЛЬТРАЦИИ: ПРОВЕРКА ЦЕЛОСТНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ISO 14644-3

Аксель Делленбах

Статья публикуется с разрешения редакции журнала *ReinRaumTechnik*, 1/2005
Перевод Курочкиной Г.И., научное редактирование Калечица В.И.

Новый стандарт ISO 14644-3 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы измерений» опубликован как проект (DIS)¹. В стандарте среди прочего описывается и метод проверки целостности фильтров. Теоретические объяснения взаимосвязей при этих измерениях точны, но в то же время достаточно сложны. В статье делается попытка превратить в практику теоретические положения и сделать более понятным для читателя данный раздел норм. Надеемся, мы достигли своей цели, и теоретические положения, подкрепленные примерами, станут для вас действительно более понятными.

EN 1822-1 и ISO 14644-3

Нормы EN 1822-1 «HEPA и ULPA-фильтры. Часть 1. Классификация, характеристики, маркировка» введены в начале 1999 года. Фильтры для улавливания аэрозольных частиц подразделяются на классы H10 – H14 и U15 – U17; для каждого класса определен свой коэффициент интегральной и локальной проницаемости (максимально возможные значения проскока²). Поэтому теперь изготовители фильтров точно знают требования, предъявляемые к их изделиям.

В соответствии с нормами HEPA-фильтр класса H14 должен пропускать интегрально максимум 0,005% и локально максимум 0,025% частиц, содержащихся в воздухе. Эти значения определяются в точке MPPS (Most Penetrating Particle Size) – наиболее проникающего размера частиц, который зависит от класса фильтра и определяется изготовителем фильтров. Таким образом, существуют четкие требования к характеристикам фильтра, который должен поставляться с завода. Каковы же характеристики уже установленного в чи-

стом помещении фильтра? Характеристики уже установленного фильтра – или системы его крепления – вряд ли будут лучше. Скорее наоборот!

Коэффициент проскока в точке утечки (точке реального или предполагаемого дефекта) может превышать интегральное значение коэффициента проскока для всего фильтра. В ISO 14644-3 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы измерений» приводится коэффициент К (табл. 1). Этот коэффициент показывает, насколько допускается изменение зна-

¹ Статья написана в 2005 году. С 2006 года стандарт принят ISO и официально введен в действие (Прим. ред.).

² Коэффициент проскока или проницаемость – характеристика фильтра, равная процентному отношению концентрации частиц после фильтра к концентрации частиц до фильтра (Прим. ред.).

Таблица 1
Значения коэффициента K в соответствии с ISO 14644-3

Интегральное значение коэффициента проскока для размера MPPS (P_s)	Коэффициент	Рассчитанное максимальное значение коэффициента проскока в точке утечки P_L
$\leq 0,05\%$	10	$\square 0,5\%$
$\square 0,005\%$	10	$\leq 0,05\%$
$\leq 0,0005\%$	30	$\square 0,015\%$
$\square 0,00005\%$	100	$\leq 0,005\%$
$\leq 0,000005\%$	300	$\square 0,0015\%$

чения максимального проскока у уже установленного фильтра. Значения коэффициента K можно взять из стандарта ISO 14644-3 или установить требуемое значение по соглашению между изготовителем и заказчиком.

Локальное измерение

В стандарте ISO 14644-3 четко говорится о том, в каком случае измеренное значение локальной проницаемости должно считаться утечкой, а в каком нет. В стандарте приведен ряд довольно абстрактных формул, применение которых не совсем тривиально. Для практика важнее понять взаимосвязи и создать свое собственное понимание их влияния друг на друга. Для этого рассмотрим вначале локальное измерение.

Рассчитанный с помощью коэффициента K коэффициент проскока при утечке P_L однозначно говорит о том, что, например, в месте возможной утечки у фильтра класса H14 при коэффициенте $K = 10$ может пройти не более 0,05% частиц, содержащихся в неочищенном воздухе.

Пример 1:

Если рассматривать конкретные цифры, это означает, что при концентрации частиц в неочищенном воздухе, равной 3 000 000 частиц/фут³ (для размеров частиц $\geq 0,3$ мкм), в очищенном воздухе после фильтра должно быть обнаружено не более 1500 частиц размером $\geq 0,3$ мкм в 1 куб. футе. В противном случае речь уже будет идти об утечке. Математическая формула данного соотношения:

$$P_L = C_{rein} / C_{roh} (\%),$$

где:

P_L = рассчитанный коэффициент проскока при утечке,

C_{rein} = концентрация частиц в чистом воздухе (после фильтра),

C_{roh} = концентрация частиц в неочищенном воздухе (до фильтра).

Рассчитанный коэффициент проскока при утечке – безразмерная величина, следовательно, параметры концентрации должны иметь возможность сокращаться,

т.е. иметь одинаковую размерность (например, концентрация в чистом и неочищенном воздухе в частицах размером $\geq 0,3$ мкм в 1 куб. футе).

Условие для проведения локального измерения: должно быть известно место возможной утечки. Нельзя ставить себе цель с помощью локальных измерений «замерить» характеристики всего фильтра, включая его корпус, уплотнение и систему крепления фильтра.

Концентрация части и подсчет частиц

Концентрация частиц всегда связана с объемом. Таким образом, абсолютный подсчет частиц зависит от скорости отбора пробы в счетчике частиц и от времени измерения. Так, например, один и тот же объем воздуха будет всасываться счетчиком частиц производительностью 1 куб.фут/мин гораздо быстрее (в 10 раз), чем счетчиком на 0,1 куб.фут/мин.

То же самое касается времени измерения. За 60 секунд один и тот же счетчик частиц отберет гораздо больше воздуха, чем за 12 сек (именно, в 5 раз больше). Формула выражает эту взаимосвязь следующим образом:

$$C_{rein} = \frac{Z_{rein}}{F_{rein} \times T_{rein}}$$

где:

Z_{rein} = измеренное количество частиц после фильтра,

F_{rein} = скорость пробоотбора чистого воздуха (после фильтра),

T_{rein} = время отбора пробы после фильтра.

Естественно, эта же формула действительна и для неочищенного воздуха до фильтра.

Пример 2:

Измеренное количество частиц до фильтра составляет 800 000 частиц размером $\geq 0,3$ мкм, скорость отбора пробы счетчиком составляет 1,0 фут³/мин, измерение длится 12 секунд. Соответственно, концентрация частиц размером $\geq 0,3$ мкм до фильтра составит 4 000 000 частиц/фут³.

Метод сканирования

Используя эти формулы для подсчета, можно проводить сканирование. Под определением «метод сканирования» подразумеваются «непрерывно следующие друг за другом локальные измерения в течение короткого времени». При этом сканируется вся система фильтра (фильтрующая среда, уплотнения между фильтрующей средой и корпусом, корпус и уплотнение корпуса фильтра, а также система крепления фильтра) с перекрытием предыдущей части, т.е. измерительный зонд с определенной скоростью сканирования обходит всю поверхность фильтра и его системы крепления на небольшом расстоянии от нее. Во время всего процесса сканирования отверстие измерительного зонда лишь короткое время находится над местом возможной утечки. Частицы, прошедшие через фильтр в точке возможной утечки, только в течение этого короткого времени поступают через отверстие зонда в прибор и регистрируются (см. рис. 1).

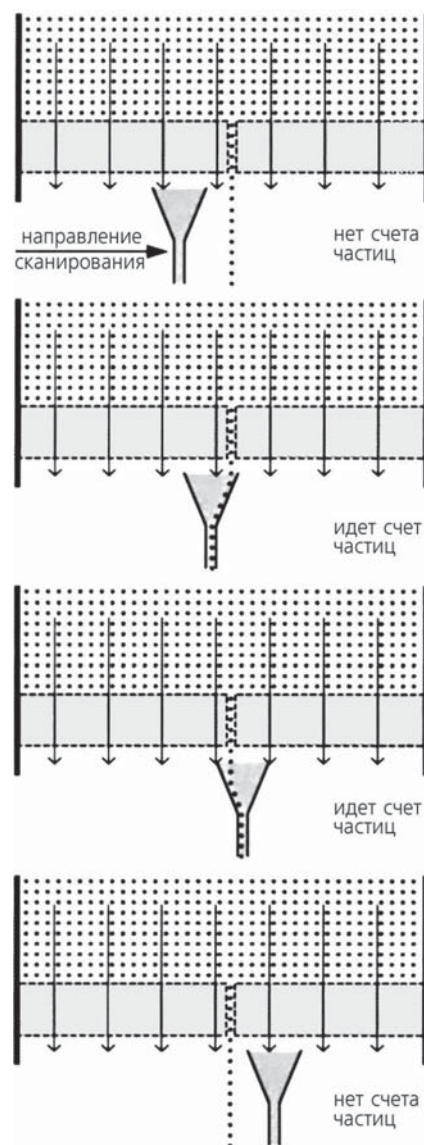


Рис.1. Отверстие зонда только в течение короткого времени находится над местом утечки и только в это короткое время идет подсчет частиц

Время интеграции

Этот короткий период времени называется в нормах ISO 14644-3 временем интеграции (эффективным временем пробоотбора). Время интеграции T_s зависит от скорости движения измерительного зонда S_r и от размера зонда в направлении, параллельном направлению сканирования D_p (см):

$$T_s = D_p / S_r$$

Чем выше скорость сканирования и чем меньше размер зонда, тем меньше время интеграции.

Пример 3:

Если размер зонда в направлении сканирования составляет 2,0 см, а скорость сканирования 5,0 см/сек, время интеграции будет 0,4 секунды, т.е. отверстие зонда задерживается над местом возможной утечки именно на 0,4 секунды.

В примере 1 локального измерения была рассчитана максимальная концентрация частиц для стороны чистого воздуха, составляющая 1500 частиц размером $\geq 0,3$ мкм на фут³ (концентрация в неочищенном воздухе составляет 3 000 000 частиц размером $\geq 0,3$ мкм/фут³; проскок при утечке $P_i \leq 0,05\%$).

Пример 4:

Так как основная часть счетчиков имеет постоянную скорость отбора пробы 1,0 фут³/мин, т.е. в течение 1 минуты всасывается проба воздуха в объеме 1,0 кубический фут, за 0,4 секунды объем пробы будет значительно ниже (0,00667 фут³). Соответственно меньше будет и количество частиц, измеренное в течение времени интеграции, а именно 10 частиц размером $\geq 0,3$ мкм.

Таким образом, если процесс сканирования проводится при описанных выше условиях, в течение одного «события счета» должно быть замерено максимум 10 частиц размером $\geq 0,3$ мкм. В противном случае можно говорить о возможной утечке.

Событие счета

Довольно сложно объяснить понятие «событие счета». Это понятие уже использовалось выше, но его объяснение еще не давалось. Событие счета происходит тогда, когда измерительный зонд проходит над поверхностью утечки (т.е. над дефектом) или возможной утечки. В описанном выше примере 4 это событие, как описано выше, длилось как раз 0,4 секунды. Таким образом, в данном случае для каждой утечки событие счета составляет только 0,4 секунды; при другом размере зонда и другой скорости сканирования это значение может быть чуть меньше или чуть больше, но в любом случае это очень короткий промежуток

времени. Оператор, проводящий измерение, практически не в состоянии отслеживать это время. Но и приборы, используемые для подсчета частиц, не могут в свою очередь проводить и регистрировать отдельные измерения каждые 0,4 секунды. Более реальными будут здесь, например, значения 6 секунд, 12 секунд или 60 секунд.

Что же конкретно происходит за эти, например, 12 секунд? Если в течение 0,4 секунды измеряется максимум 10 частиц размером $\geq 0,3$ мкм (см. пример 4), сколько частиц будет замерено за 12 секунд?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, приведем два простых примера (условия, как в примерах, описанных выше).

Пример 5:

В течение 12 секунд измеряется 16 частиц размером $\geq 0,3$ мкм и происходит 2 события счета. Поделив на 2 отдельных события счета, получаем 8 частиц $\geq 0,3$ мкм.

Пример 6:

В течение 12 секунд замеряется 16 частиц размером $\geq 0,3$ мкм, но происходит лишь одно событие счета с параметром 16 частиц размером $\geq 0,3$ мкм.

В примере 5 измерительный зонд проходит через два места возможной утечки, которые по уже проведенным оценкам не являются местами утечки (сосчитано менее 10 частиц). В примере 6 зонд проходит через одно место утечки, которое по нашей оценке является местом утечки.

Если предельно допустимую концентрацию частиц на стороне чистого воздуха со временем 0,4 секунды (10 частиц размером $\geq 0,3$ мкм) просто пересчитать на время 12 секунд (300 частиц размером $\geq 0,3$ мкм), можно сказать, что в этих примерах «хорошие измерения», т.е. возможные утечки обнаруживаются на большом фоне. Если же и для 12 секунд действует та же предельно допустимая концентрация на стороне чистого воздуха со временем 0,4 секунды (10 частиц размером $\geq 0,3$ мкм), получается, что оба примера «замерены плохо», так как утечки сравнимы с фоном. Действительно, в примере 5 для того, чтобы выяснить, что речь здесь не идет об утечке, потребовалось дополнительное измерение!

Таким образом, рассчитанное предельно допустимое количество измеренных частиц на стороне чистого воздуха сравнивается с соответствующим теоретически рассчитанным интервалом измерения, даже при отклоняющемся от этого значения более длительном реальном времени измерения. Таким образом, при расчетах время измерения на стороне чистого воздуха всегда является време-

нем интеграции T_s , рассчитанным по размеру зонда в направлении движения D_p и скорости сканирования S_r !

Предельно допустимая концентрация частиц на стороне чистого воздуха

С помощью вышеприведенных умозаключений можно вывести формулу для предельно допустимого числа частиц, регистрируемых после фильтра:

Концентрацию C можно выразить через измеренное число частиц Z , скорость пробоотбора используемого счетчика F и время измерения T . Так как время измерения на стороне чистого воздуха T_{rein} соответствует времени интеграции T_s , время измерения на стороне чистого воздуха T_{rein} можно заменить на скорость подачи зонда S_r и размер измерительного зонда в направлении сканирования D_p . В результате мы получаем следующую формулу:

$$Z_{rein} = \frac{K \cdot P_s \cdot F_{rein} \cdot Z_{roh} \cdot D_p}{F_{roh} \cdot T_{roh} \cdot S_r}$$

Затем следует ввести определенную «статистическую надежность», которая выражается следующим образом:

$$Z_{rein} = -3,96 + 1,03 \frac{K \cdot P_s \cdot F_{rein} \cdot Z_{roh} \cdot D_p}{F_{roh} \cdot T_{roh} \cdot S_r}$$

где:

Z_{rein} — максимально допустимое число зарегистрированных частиц на стороне чистого воздуха (с размером $\geq 0,3$ мкм),

K — коэффициент K ,

P_s — интегральное значение коэффициента проскока для размера MPPS в соответствии с EN 1822-1,

F_{rein} — скорость пробоотбора на стороне чистого воздуха [фут³/мин; см³/сек]

Z_{roh} — число зарегистрированных частиц до фильтра (со стороны неочищенного воздуха) (с размером $\geq 0,3$ мкм),

D_p — размер зонда в направлении сканирования [см],

T_{roh} — время отбора пробы до фильтра [сек],

S_r — скорость сканирования [см/сек].

Следует помнить, что сравнивать следует только одинаковые единицы измерения, например, фут³/мин с фут³/мин, но не с см³/сек. Это же касается и дру-



Рис. 2 Сканирование фильтра

гих параметров (частицы размером $\leq 0,3$ мкм нельзя сравнивать с частицами размером $0,3 - 0,5$ мкм).

Пример 7:

Для данных расчетов действуют те же условия, которые были выбраны для предыдущих примеров:

- Коэффициент К для фильтра класса H14 ($P_s = 0,005\%$) составляет 10,
- Счетчики частиц до и после фильтра имеют скорость пробоотбора $1,0$ фут³/мин,
- Измеренное количество частиц до фильтра 800 000 частиц размером $\geq 0,3$ мкм,
- Размер зонда в направлении сканирования 2,0 см,
- Время отбора пробы на стороне неочищенного воздуха 12 секунд (объемы по $0,2$ фута³),
- Скорость сканирования $\leq 5,0$ см/сек.

В результате предельно допустимое количество зарегистрированных частиц после фильтра Z_{rein} составляет 9,8 частиц размером $\geq 0,3$ мкм.

Практическое значение

На практике это означает следующее: в соответствии с EN1822-1 на фильтр класса H14 подаются частицы с концентрацией в неочищенном воздухе 4 000 000 частиц размером $\geq 0,3$ мкм/фут³. Со стороны чистого воздуха сканирование фильтра производится со скоростью максимум 5,0 см/сек; размер зонда в направлении сканирования составляет 2,0 см. Как до, так и после фильтра каждые 12 секунд производится распечатка результатов измерения; скорость потока через счетчик составляет 1,0 фут³/мин. Если подсчитанное в течение времени измерения 12 секунд максимальное количество зарегистрированных частиц составляет 9 частиц размером $\geq 0,3$ мкм, можно считать, что отсканированная поверхность не имеет утечки. Если результат измерения 10 или более частиц размером $\geq 0,3$ мкм, то можно предположить наличие возможной утечки. Поэтому необходимо провести дополнительное локальное измерение для проверки наличия утечки.

Выводы

Новый стандарт ISO 14644-3 дает четкий ответ на вопрос, что является утечкой (фактом наличия дефекта), и что еще не является утечкой. В дальнейшем везде будет проводиться измерение таким способом. Это должно быть целью каждого измерения.

Стандарт дает также четкие указания по перемещению зонда. Используется двухступенчатый способ измерений – вначале применяется сканирование для обнаружения возможного места утечки, затем проводится проверка наличия утечки (наличия дефекта фильтра)

с помощью дополнительного локального измерения. Это хороший инструмент для проведения измерений на практике, но все имеет свою цену. Необходимо повысить техническое оснащение измерений. Предъявляются дополнительные требования к уровню обучения операторов. Перемещение – как уже упоминалось выше – не совсем тривиально, и требует более высокого уровня специальных знаний от фирм, проводящих измерения, что видно уже по большому количеству математических формул, имеющих в стандарте. Формулы и их выводы с математической точки зрения абсолютно правильны. Исключение составляет только редакционная ошибка в формуле для N_{pa} (в знаменателе «+» вместо «*»), исправленная в настоящей публикации. Но применение на практике является не совсем тривиальным.

Попытка в данной статье подобрать более близкую к практике математическую запись привела к появлению еще нескольких (математически не совсем точных) формул. Но мы надеемся, что благодаря этому новые нормы ISO 14644-3 станут более понятными для читателей, особенно тест на проверку целостности системы фильтра.

Одновременное или последовательное измерение количества частиц

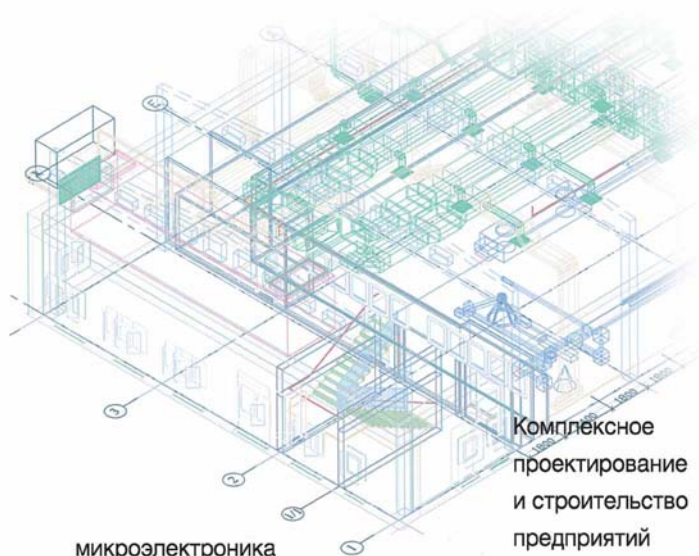
Еще несколько слов к вопросу об одновременном или последовательном измерении количества частиц.

В описанном выше методе измерения говорилось об одновременном измерении числа частиц до и после фильтра с помощью двух счетчиков. Но нормы ISO 14644-3 не исключают и последовательное измерение (смещенное по времени измерение неочищенного и чистого воздуха с помощью одного счетчика частиц).

Нормы ISO представляют собой компромиссное решение, с которым согласилась большая часть экспертов. И эта большая часть считает, что не следует требовать, чтобы фирма, проводящая замеры, обязательно имела два счетчика частиц.

Как следует из приведенных формул, предельно допустимая концентрация частиц после фильтра прямо зависит от концентрации частиц в неочищенном воздухе. По этой причине необходимо – всякий раз, когда это возможно – проводить одновременное измерение концентрации частиц в чистом и в неочищенном воздухе.

ЭКОПРОЕКТ



микроэлектроника
приборостроение
точная механика
аэрокосмическая
промышленность

Комплексное
проектирование
и строительство
предприятий
с чистыми
помещениями.

127411, г. Москва, Дмитровское ш., д. 110. Тел./факс: (095) 484 7295, 484 7451, 485 2533.
www.ecoproject.ru; info@ecoproject.ru.