



УДК 697.941

Я. П. Борисова

*Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Красноярский край, Россия*

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЧИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Работа посвящена вопросам промышленной чистоты в современном производстве. Приведены история и классификация чистых помещений. Рассмотрены стандартизация и методы контроля чистой среды.

Ключевые слова: чистое помещение, чистая зона, частица, класс чистоты, стандарты чистоты, методы контроля промышленной чистоты, воздухообмен.

Y. P. Borisova

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

CLEAR ENVIRONMENTAL CONTROL METHOD WITHIN SPACECRAFT BUILDING PROCESS

The article is introducing environmental control within moder industry. Clear environment classification, standardization, method of control and history of this process are shown.

Key words: Clear environment, clear zone, particle, clearness classification, clearness standardization, clear environmental control method, air exchange.

Чистые технологии относятся к наиболее современным и прогрессивным отраслям науки и техники, пользующимся серьезной государственной поддержкой.

Согласно стандарту ISO I4644-1, разработанному Международной организацией стандартизации, *чистое помещение* – 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.

Под *частицей* понимается твердый, жидкий или многофазный объект или микроорганизм с размерами от 0,005 до 100 мкм. При классификации чистых помещений рассматриваются частицы с нижними пороговыми размерами от 0,1 до 5,0 мкм.

На рис. 1 представлена микрофотография полупроводникового прибора с находящейся на его поверхности загрязняющей частицей.

Ключевым фактором является то, что чистые помещения характеризуются именно *счетной концентрацией* частиц, то есть числом частиц в единице объема воздуха, размеры которых равны или превышают определенную величину. Этим они отличаются от обычных помещений, в которых чистота воздуха оценивается по массовой концентрации загрязнений в воздухе. Отсюда вытекают особенности поддержания и определения показателей чистоты, специфические требования к контрольным приборам, счетчикам частиц в воздухе и пр.

Как известно, первые чистые помещения создавались в больницах. Историческим вкладом лорда Листера (Lord Lister) явилась его теория, согласно которой бактерии становятся источником инфекции в процессе хирургического вмешательства. Он считал, что удаление

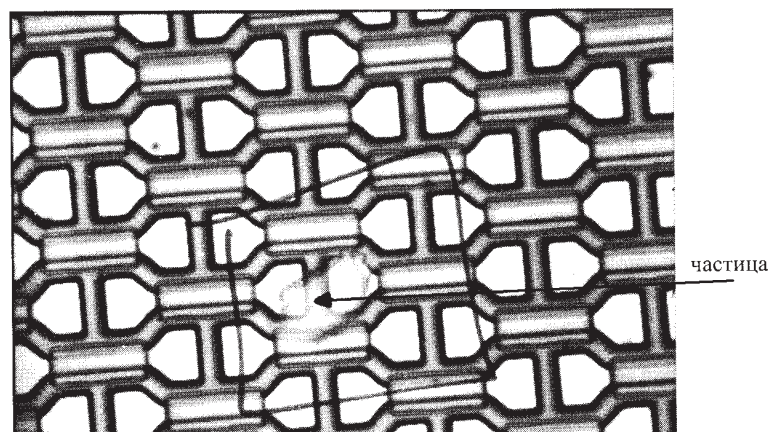


Рис. 1. Частица загрязнения на полупроводниковом приборе

бактерий из операционной палаты должно предотвратить возникновение инфекционных осложнений. Этот постулат явился научным обоснованием для разработки первых чистых помещений.

Разработка первых чистых помещений для промышленного производства началась во время Второй мировой войны, и это в основном было обусловлено попытками повышения качества и надежности узлов и деталей различных видов вооружения, танков и самолетов. Появилось понимание того, что если не добиться чистоты в производственной зоне, то такие узлы, как, например, бомбардировочные прицелы, могут отказывать или работать неправильно. Однако предполагалось, что в чистом помещении чистота должна поддерживаться такими же методами и средствами, как и в жилых помещениях.

Открытие процессов ядерного расщепления, а также исследования в области разработки биологического и химического оружия, проводимые в период Второй мировой войны с 1939 по 1945 г., стимулировали производство высокоэффективных воздушных фильтров HEPA (High Efficiency Particulate Air), необходимых для очистки воздуха от опасных микробиологических или радиоактивных аэрозольных загрязнений. Появление таких фильтров позволило обеспечить чистые помещения очень чистым воздухом и достичь низких уровней аэрозольного загрязнения.

Запуск в СССР в 1957 г. первого искусственного спутника положил начало освоению космоса. Потребности космической промышленности дали мощный импульс развитию чистых помещений, повышению надежности аппаратуры. Освоение принципов технологии

чистоты в машиностроении позволило вывести на качественно новый уровень показатели надежности и долговечности. В конце 50-х гг. появились чистые помещения с рециркуляцией воздуха, была начата аттестация чистых помещений. Появились первые компании, изготавливающие чистые помещения, была заложена научно-техническая основа и создана промышленность чистых помещений, налажено серийное производство основных элементов чистых помещений: фильтров, ограждающих конструкций, счетчиков аэрозольных частиц и многих других элементов, связанных с созданием и эксплуатацией чистых помещений.

Класс чистого помещения характеризуется классификационным числом, определяющим максимально допустимую счетную концентрацию аэрозольных частиц определенных размеров в 1 м³ воздуха.

Чистое помещение может содержать одну или несколько чистых зон. Чистые зоны могут быть и вне чистого помещения. Чистые зоны могут создаваться в локальных объемах: ламинарных шкафах, укрытиях, изоляторах и пр.

Международная организация стандартизации (ISO) разрабатывает серию стандартов для чистых помещений. Они охватывают широкий спектр важных вопросов, таких как проектирование, испытания, эксплуатация и биозагрязненность чистых помещений. Первым документом этой серии стал стандарт ISO 14644-1 «Классификация чистоты воздуха», опубликованный в 1999 г. и содержащий правила классификации чистых помещений.

Классификация ISO основана на следующем уравнении:

Таблица 1

Классификация чистых помещений и чистых зон по ISO 14644-1

Класс ИСО	Пределы максимальных концентраций (частицы/м³ воздуха) частиц размером, равным и большим приведенного ниже, мкм					
	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5,0
Класс 1 ИСО	10	2	0	0	0	0
Класс 2 ИСО	100	24	10	4	0	0
Класс 3 ИСО	1 000	237	102	35	8	0
Класс 4 ИСО	10 000	2 370	1 020	352	83	0
Класс 5 ИСО	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
Класс 6 ИСО	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
Класс 7 ИСО	—	—	—	352 000	832 000	29 300
Класс 8 ИСО	—	—	—	3 520 000	832 000	29 300
Класс 9 ИСО	—	—	—	35 200 000	8 320 000	293 000

$$C_n = 10^N \left(\frac{0,1}{D} \right)^{2,08}, \quad (1)$$

где C_n – максимальная допустимая концентрация частиц (в 1 м³ воздуха), размер которых равен или больше указанного в классификации. Значение C_n округляют до ближайшего целого числа, используя не более трех значимых цифр; N – класс по ISO, не превышающий 9. Допускаются промежуточные классы с минимальным интервалом $0,1 N$; D – рассматриваемый размер частиц, мкм; $0,1$ – постоянная величина, с размерностью мкм.

При помощи уравнения (1) можно рассчитать максимально допустимую концентрацию аэрозольных частиц, то есть предельные значения концентраций частиц любого задан-

ного размера для каждого класса. В табл. 1 приводятся установленные ISO 14644-1 классы и значения предельных концентраций частиц аэрозолей в чистом помещении.

Существуют два основных типа чистых помещений, которые отличаются друг от друга способами обеспечения вентиляции:

- с однонаправленным потоком воздуха;
- с неоднаправленным потоком воздуха.

На рис. 2 и 3 схематически представлены два типа чистых помещений. На рис. 2 показано чистое помещение с неоднаправленным потоком воздуха, в которое очищенный фильтрами воздух подается через установленные на потолке воздухораспределители. Поступающий воздух смешивается с воздухом, находящимся внутри помещения, а удаление загрязнений в виде аэрозольных частиц

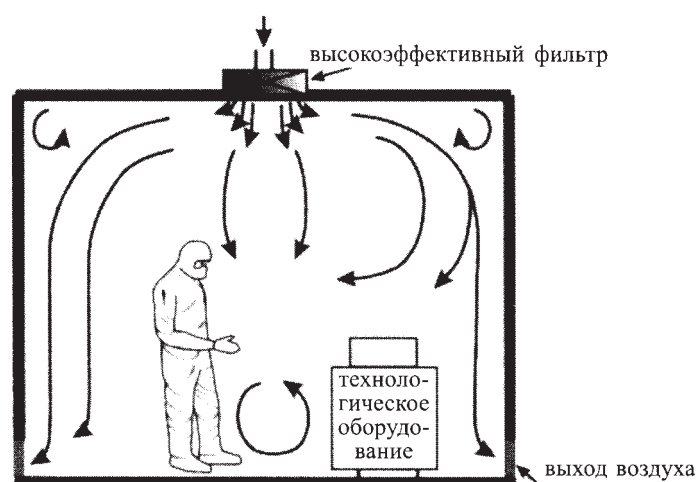


Рис. 2. Чистое помещение с неоднаправленным потоком воздуха

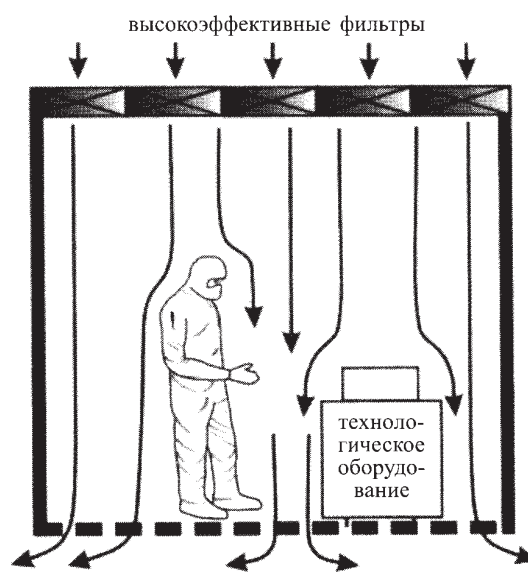


Рис. 3. Чистое помещение с однонаправленным потоком воздуха

происходит через систему воздухозаборных решеток, которые находятся в нижней части стен.

На рис. 3 представлены основные элементы чистого помещения с однонаправленным воздушным потоком. Воздух в такое помещение подается через высокоэффективные фильтры, которые устанавливаются по всей поверхности потолка (или в некоторых системах). Этот воздух движется через помещение в одном направлении со скоростью около 0,4 м/с и выходит через пол, удаляя таким образом из помещения взвешенные в воздухе загрязнения.

В чистых помещениях как с неоднаправленным, так и с однонаправленным воздушным потоком часто используются такие устройства подачи очищенного воздуха, как боксы с однонаправленным потоком или изоляторы.

Эти устройства обеспечивают локальный поток очищенного воздуха и высокие параметры чистоты воздуха там, где это необходимо, например, на участке, где изделие не защищено от воздействия загрязнений.

Для подтверждения того, что чистое помещение работает в нормальном режиме, необходимо продемонстрировать соблюдение следующих принципов.

- Воздух подается в чистое помещение в количестве, достаточном для разбавления или удаления образующихся в нём загрязнений.
- Воздух внутри комплекса чистых помещений движется от чистых участков к менее чистым, в результате чего перемещение загрязнённого воздуха сводится к минимуму. Воздух должен двигаться через дверные проёмы и другие элементы чистого помещения в правильном направлении.
- Воздух, подаваемый в чистое помещение, такого качества, что он не увеличивает уровень загрязнения в чистом помещении.
- Движение воздуха внутри чистого помещения должно гарантировать, что в чистом помещении не образуется зон с высокими концентрациями загрязнений.

Если эти принципы соблюдаются, то следует измерить концентрацию частиц и, если это необходимо, частиц-носителей микроорганизмов для определения соответствия чистого помещения требуемому классу чистоты.

Испытания чистого помещения

Объёмы подаваемого и удаляемого воздуха

В случае турбулентно вентилируемого чистого помещения следует измерить расход подаваемого в чистое помещение и удаляемого из него воздуха. В случае однонаправленного потока измеряется скорость воздушного потока.

Контроль движения воздуха между участками

Для подтверждения того, что воздушный поток между участками движется в правильном направлении, то есть от чистого участка к менее чистому, необходимо убедиться в том, что:

- перепады давления между участками имеют правильную величину;
- воздух через дверные проёмы, люки и др. движется от чистого участка к менее чистому.

Контроль течей установленных фильтров

В процессе проверки высокоэффективного воздушного фильтра и системы его крепления необходимо убедиться в том, что содержащиеся в воздухе загрязнения не просачиваются в чистое помещение:

- 1) через повреждённый фильтр.
- 2) через уплотнения между корпусом фильтра и системой его крепления или
- 3) через любой другой элемент фильтра и системы его крепления.

Контроль течей через ограждающие конструкции

Испытания необходимы для демонстрации того, что содержащиеся в воздухе загрязнения не поступают в чистое помещение через течи в ограждающих конструкциях.

Контроль движения воздуха внутри чистого помещения

Выбор методов контроля движения воздуха зависит от вида чистого помещения – является ли оно турбулентно вентилируемым или использует однонаправленный воздушный поток. В турбулентно вентилируемом чистом помещении необходимо убедиться в отсутствии зон с неудовлетворительным движением воздуха (застойных зон). В чистом помещении с однонаправленным воздушным потоком следует проверить соответствие скорости воздуха и направления его движения заданному в проекте параметрам.

Концентрация аэрозолей и микроорганизмов

Если указанные выше тесты дали удовлетворительные результаты, можно перейти к заключительной части испытаний – определению концентрации частиц (и микроорганизмов, если это требуется), с тем чтобы подтвердить соответствие этих параметров значениям, которые заложены в проекте чистого помещения.

Дополнительные тесты

Помимо проведения перечисленных выше испытаний может возникнуть необходимость в том, чтобы чистое помещение соответствовало требованиям, предъявляемым к одному или более из следующих параметров:

- температуре,
- относительной влажности,
- возможности нагрева и охлаждения чистого помещения,
- уровням шумов,
- уровням освещения,
- уровням вибрации.

Зависимость измерений от типа чистого помещения и его состояния

Выбор испытаний, проводимых в чистом помещении, зависит от вида примененного в нем воздушного потока: однонаправленного, турбулентного или смешанного (в последнем случае подразумевается турбулентно вентилируемое чистое помещение, в котором имеются ламинарные шкафы, рабочие места или изоляторы с однонаправленным воздушным потоком).

Периодичность измерений и демонстрация соответствия классу чистоты

На протяжении всего периода эксплуатации рабочие параметры чистого помещения

необходимо поддерживать на заданном уровне и контролировать соответствие помещения его классу чистоты. Из этого следует, что испытания чистого помещения надо проводить регулярно, причем в чистых помещениях более высокого класса измерения должны проводиться чаще (табл. 2).

Мониторинг чистых помещений

Периодичность и типы испытаний, проводимых с целью подтверждения соответствия чистого помещения требованиям стандарта ISO 14644-1, задаются стандартом ISO 14644-2. В чистых помещениях высокого класса, где уровень чистоты – основной показатель жизнеспособности технологического процесса, могут понадобиться дополнительные измерения или мониторинг. Их результаты должны подтверждать, что в процессе производства в чистом помещении поддерживаются требуемые параметры чистоты и что они находятся под контролем. Стандарт ISO 14644-2 предусматривает, что пользователь должен принимать решение о целесообразности мониторинга и периодичности измерений на базе оценки степени риска.

Наиболее часто для мониторинга выбираются следующие параметры:

- перепад давления,
- концентрация аэрозольных частиц,
- концентрация частиц-носителей микроорганизмов – в случае, если это необходимо.

Перепад давления воздуха можно непрерывно измерять и регистрировать измерительными приборами. Эта мера может понадобиться в чистых помещениях высокого класса

Таблица 2

Периодичность испытаний чистого помещения на соответствие его классу

Контролируемые параметры	Класс чистоты	Максимальный период времени
Соответствие по концентрации частиц	$\leq$ ISO 5	6 месяцев
	$>$ ISO 5	12 месяцев
<i>Дополнительные испытания</i>		
Скорость воздуха или объемный расход	Все классы	12 месяцев
Перепад давления воздуха	Все классы	12 месяцев
<i>Необязательные испытания</i>		
Контроль течей установленных фильтров	Все классы	24 месяцев
Контроль движения воздуха внутри чистого помещения	Все классы	24 месяцев
Восстановление характеристик после кратковременного загрязнения	Все классы	24 месяцев
Контроль течей через ограждающие конструкции	Все классы	24 месяцев

чистоты – класса 4 ISO и более чистых. Если мониторинг проводится в чистом помещении более низкого класса, то периодичность измерений может быть равна суткам, неделе, месяцу, трём или шести месяцам; с повышением класса чистоты эти интервалы могут уменьшаться.

Критерии для мониторинга концентрации частиц аналогичны описанным в предыдущем абзаце. Следует отметить, что при мониторинге концентрации частиц нет необходимости проводить измерения во всех точках пробоотбора, предусмотренных стандартом ISO I4644-1. Число точек пробоотбора может быть гораздо меньше, и они не обязательно должны равномерно распределяться по всему чистому помещению. При организации мониторинга точки пробоотбора следует размещать на участках, которые являются важными для производства, например, вблизи тех мест,

где изделие подвержено максимальному риску загрязнения.

Современное чистое помещение – это сложный комплекс технологического оборудования, точная и безошибочная работа которого невозможна без надежной системы контроля и мониторинга все возрастающего числа его параметров.

Библиографические ссылки

1. Гайдуков А. Д. Особенности проектирования чистых помещений для аэрокосмической отрасли // Чистые помещения и технологические среды. – 2002. – № 3. – С. 4–6.
2. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. – М. : Клирум, 2002. – 304 с.
3. Чистые помещения / под ред. А. Е. Федотова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : АСИНКОМ, 2003. – 576 с.