

# ПРИБОРНОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ КОНТРОЛЯ ЧИСТЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

М.И. Весёлая,  
В.И. Калечиц,  
О.Ю. Маслаков,  
Е.С. Хозяшева

Группа компаний «Клинрум Инструментс», г. Москва

Внимательные читатели журнала знают, что статья с таким названием уже публиковалась в № 3 за 2007 год. Однако за прошедшие с тех пор неполные десять лет практически все упомянутые в ней приборы прошли модернизацию (некоторые даже несколько раз), обновили свой внешний вид, улучшили свои потребительские качества, получили новые возможности, которых десять лет назад не было, наконец, появились новые разработки [1]. Благодаря этому выбор у потребителей значительно расширился, и обзор возможностей по приборному оснащению метрологической службы предприятий и подразделений контроля чистых производственных помещений вновь стал актуальным.

Итак, немного напомним о себе. Наша, теперь уже группа компаний «Клинрум Инструментс» специализируется на поставке приборов и оборудования для контроля различных характеристик чистых производственных помещений. Это достаточно сложное и весьма специфическое оборудование, поэтому, как правило, с каждым заказчиком приходится подробно обсуждать, какие именно измерения в чистом помещении он собирается проводить, какие у него требования к приборам и пр. В результате такого общения (порой достаточно длительного) складывается довольно четкое представление о требованиях рынка, о предпочтениях заказчиков, о круге решаемых ими задач.

Работая в данном направлении с 2003 года, наши специалисты накопили уже довольно солидный опыт, поставляя приборы для контроля в чистых помещениях, проводя аттестационные и прочие измерения, проектируя и устанавливая целые системы мониторинга параметров чистых помещений. Поэтому мы можем с уверенностью констатировать, что в последние несколько лет постоянно растет число заказов на комплексное оснащение подразделений контроля чистых производственных помещений. На каждом предприятии эти подразделения могут носить различные названия – лаборатория, метрологическая служба, отдел контроля качества и пр., но важна именно тенденция – предприятия, работающие с чистыми производственными помещениями, осознают необходимость выхода

на современный уровень обеспечения контроля качества, постоянного отслеживания состояния как самого чистого помещения, так и используемых в производстве чистых технологических сред [2].

Действительно, с развитием рыночных отношений фармацевтическая промышленность уже не может не соблюдать правила GMP – они не только переведены на русский язык, но и закреплены законодательно приказом Минпромторга РФ от 14.06.2013 г. № 916 (в редакции, введенной в действие с 11.01.2016 г. приказом Минпромторга РФ от 18.12.2015 г. № 4148 «Об утверждении Правил надлежащей производственной практики. Приложение № 1. Производство стерильных лекарственных средств»). Аэрокосмическое производство должно соответствовать требованиям отраслевых стандартов (ОСТ 1 41519-2001 и др.). Развитие микроэлектроники невозможно без постоянно уменьшающегося топологического размера элементов микросхем, а значит, и все более строгих требований к чистоте. А в последнее время к этим основным направлениям применения чистых производственных помещений присоединилась и автомобильная промышленность, которая все в больших масштабах внедряет контроль чистоты воздуха на всех стадиях производства. Так, например, сборку приборных панелей рекомендуется проводить в помещениях класса ИСО 8, окраску кузова и сборку инжекторов – в классе ИСО 7, а работу с оптикой – в помещениях класса ИСО 6. Контролируются и другие технологические среды; например, контроль технологических жидкостей должен проводиться в соответствии со специальным международным стандартом для автомобильной промышленности ISO 16232.

Другими словами, если предприятие хочет работать по-современному, активно действовать на рынке – без постоянного контроля чистоты воздуха при производстве не обойтись. Основная информация о проведении контроля в чистых помещениях представлена в стандарте ГОСТ Р ИСО 14644-3:2007 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы испытаний». Этот доку-

мент создал твердую нормативную базу для контроля параметров чистых помещений. В нем дан перечень всех величин, которые рекомендуется контролировать в чистом производственном помещении, методов их измерений, приведены краткие описания рекомендуемых к использованию типов приборов, принципов их действия, указываются требования к их техническим характеристикам.

Фактически, внимательное чтение стандарта 14644-3:2007 позволяет потребителю самостоятельно сформировать перечень приборов, необходимых для комплексного оснащения подразделения, занимающегося контролем параметров чистых помещений и используемых в них технологических сред. Тем не менее, мы хотим облегчить заказчикам эту задачу, поэтому цель настоящего сообщения – дать потенциальному потребителю рекомендации по выбору конкретных моделей приборов для решения типичных задач, возникающих при измерениях в чистых помещениях.

Перечисленные в стандарте 14644-3:2007 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы испытаний» параметры чистых производственных помещений, требующие периодического или постоянного контроля, приведены в табл. 1. Их можно условно разбить на четыре группы – измерения, связанные с определением размеров и счетной концентрации аэрозольных частиц (пп. 1–3, 6, 11–13), связанные с характеристиками воздушных потоков (пп. 4, 5, 7), температурой и влажностью (п. 8, 9) и электростатическими свойствами (п. 10).

Важнейшей из них является, без сомнения, первая группа – ведь само понятие «чистое производственное помещение» неразрывно связано с наличием в его воздушной среде заданного числа частиц определенных размеров. Именно поэтому первым прибором, которым оснащается подразделение контроля чистых помещений, всегда является **счетчик частиц (аэрозолей)**. Однако тип такого счетчика зависит от тех задач, которые решает производство, размещенное в чистом производственном помещении, т.е. от тех нормативных документов, которыми должно руководствоваться подразделение контроля.

Первым прибором, который мы всегда рекомендуем нашим заказчикам, является **ручной счетчик частиц Handheld 3016** производства компании Lighthouse Worldwide Solutions (США). Это легкий (вес 1 кг), эргономически продуманный и удобный прибор с чувствительностью 0,3 мкм и скоростью пробоотбора 2,8 л/мин, чего с запасом хватает для проведения оперативных и периодических измерений в чистых помещениях вплоть до класса ИСО 5 (класс 100) включительно (есть ограничения только по использованию прибора в фармацевтической промышленности, где при аттестации требуется отбор проб в 1 м<sup>3</sup> – об этом чуть ниже). Данный прибор компания Lighthouse выпускает с 2000 года, и за это время его внешний вид и основные метрологические характеристики практически не изменились (что говорит о изначальной продуманной производителем концепции прибора).



Рис. 1. Ручные счетчики частиц Handheld 3016 и Handheld 3013

Handheld 3016 обеспечивает измерение числа частиц в 6-ти размерных диапазонах (каналах) одновременно, при этом дополнительно определяются значения температуры и относительной влажности. Большой (диагональ 3,8") сенсорный дисплей с подсветкой стал цветным. На нем отображаются как результаты текущих измерений, так и содержимое памяти (3000 измерений). Максимальная счетная концентрация, при которой прибор может проводить измерения без использования разбавителя, составляет  $4 \times 10^6$  част./фут<sup>3</sup> (при 5% совпадений) – вдвое больше, чем у всех конкурентов. Это значит, что приборы типа Handheld можно использовать и при измерениях относительно грязного воздуха – вплоть до атмосферного. Для управления прибором используются отображаемые на дисплее интуитивно понятные кнопки-иконки (как в хорошо знакомой всем операционной системе Windows). Программа защищена двумя паролями, обеспечивающими допуск к работе с прибором (1-ый уровень) и к изменению настроек (2-ой уровень защищенности). Очень полезной для потребителя является функция «подсказки». Оператор может ввести в прибор площадь контролируемого чистого помещения, его состояние (построенное, оснащенное или работающее), тип воздушного потока (однаправленный или неоднаправленный) и предполагаемый класс чистоты по любому из четырех стандартов (федеральному стандарту США 209, стандарту ИСО 14644-1, GMP ЕС или английскому стандарту BS 5295). Прибор сразу же подскажет необходимое число точек пробоотбора, количество измерений в каждой точке пробоотбора и минимальный объем воздуха, который необходимо прокачать через прибор. Причем подскажет на русском языке, так как с 2012 года интерфейс прибора русифицирован (т.е. в списке доступных языков появился русский).

Результаты измерений записываются в память прибора. Фактически, весь день можно проводить измерения, не выходя из чистого помещения, и лишь

в конце работы подключить прибор к компьютеру и распечатать все результаты с помощью принтера компьютера. Возможно и подключение внешнего принтера к счетчику Handheld. Кстати, результаты можно представить и в виде отчета – Handheld 3016 имеет встроенную обработку результатов измерений по широко распространенному стандарту США 209E, GMP EC и международному стандарту ISO 14644-1.

Счетчик аэрозолей Handheld 3016 – наиболее популярная у специалистов, но не единственная модель в линейке ручных приборов компании Lighthouse. Также выпускаются Handheld 5016 и Handheld 2016 – с чувствительностью 0,5 и 0,2 мкм соответственно; Handheld 3016 IAQ – в нем наряду со счетной концентрацией частиц измеряется их массовая концентрация; Handheld 3013 – эконом-версия ручных счетчиков, которые имеют совершенно другой внешний вид, чем вышеупомянутые приборы, обладают меньшим набором функций (например, отсутствует измерение температуры и относительной влажности, только 3 канала счета частиц, батарея не сменная), и удобными в обращении их назвать нельзя (не эргономичное исполнение корпуса). Но метрологические характеристики у Handheld 3013 ни в чем не уступают «старшим братьям» – три размерных диапазона: 0,3 мкм/0,5 мкм/5 мкм. Для многих применений этого вполне достаточно, а цена модели 3013 вдвое меньше, что для многих потребителей существенно.

Но все же самый распространенный ручной счетчик аэрозолей – Handheld 3016. Он по праву пользуется заслуженной популярностью у заказчиков. Уже сотни предприятий России и стран СНГ оснащены этим удобным, функциональным и практичным прибором. Однако здесь следует сделать серьезную оговорку – данный прибор не подходит для целей классификации (или аттестации) на предприятиях фармацевтической промышленности, особенно для зон класса чистоты А и В. Здесь необходимо использовать приборы другого типа, а именно, с расходом воздуха не менее 28 л/мин. В этом случае мы рекомендуем приобрести один из портативных приборов производства компании Lighthouse Worldwide Solutions: «старый добрый» прибор Solair или представителя нового семейства – серийно выпускающегося с 2015 года прибора ApexP.

**Портативные счетчики аэрозолей серии Solair** обеспечивают чрезвычайно хорошие метрологические характеристики – высокую чувствительность (0,3 мкм или 0,5 мкм) и большую скорость пробоотбора – 28,3 л/мин, 50 или 56,6 л/мин, и даже 100 л/мин, что позволяет проводить измерения (в том числе и классификацию (аттестацию) по GMP EC) в чистых помещениях любого класса чистоты. Приборы Solair проводят измерения одновременно в 6-ти (или опционально даже в 8-ми) размерных диапазонах (от нижнего предела до 10 или 25 мкм), могут работать как от сети, так и от внутренней сменной и перезаряжаемой аккумуляторной батареи, снабжены встроенным принтером, имеют память на 3000 результатов измерений и цветной сенсорный дисплей. Корпус при-

бора выполнен из нержавеющей стали, легко обрабатывается дезинфицирующими растворами. Интерфейс прибора русифицирован.

После проведения измерений все результаты могут быть сохранены на USB флеш-память или переданы в компьютер для их дальнейшей обработки, распечатки и хранения. Впрочем, обработка результатов по стандартам 209E, GMP EC и ISO 14644-1 проводится и самими приборами Solair. Также счетчики аэрозолей Solair могут работать в составе системы мониторинга и передавать данные с помощью протокола Modbus.

Дополнительно к стандартной комплектации для приборов типа Solair (и Handheld) можно приобрести адаптер повышенного давления. Он предназначен для подключения прибора к магистралям повышенного давления и позволяет проводить измерения частиц в воздухе и газах, находящихся под давлением. Устройство существует в двух вариантах: с выбросом избыточного воздуха в атмосферу и с возвращением избыточного воздуха обратно в магистраль.

Отличительной особенностью счетчиков частиц Solair является возможность подключения к ним различных дополнительных зондов и устройств. Прежде всего, это датчики параметров окружающей среды – температуры, относительной влажности, перепада давления и скорости потока воздуха. Эти датчики не входят в базовую комплектацию приборов и их надо приобретать дополнительно. Рекомендуются к применению датчики, выпускаемые самой компанией Lighthouse, но можно использовать и продукцию любых других производителей. Единственное требование к ним – аналоговый выходной сигнал 4–20 mA. Результаты измерений, выполненных с помощью подключенных датчиков окружающей среды, записываются в память прибора, отображаются на дисплее и распечатываются в протоколе.

Еще одно подключаемое к Solair устройство – зонд для подсчета частиц на поверхности. Портативные счетчики аэрозолей Solair имеют HEPA-фильтр на выходе пробы из прибора, чтобы не загрязнять чистое помещение. Этой особенностью конструкции воспользовались создатели зонда для подсчета частиц на поверхности. Такой зонд прижимается (не вплотную, а только по периметру) к контролируемой поверхности; одной пробоотборной трубкой подключается к выходу из Solair чистого воздуха, а другой – ко входу Solair. Поток чистого воздуха срывает с контролируемой поверхности частицы и направляет их на вход прибора, подсчитывающего их количество.

Примерно так же действует и зонд, контролирующий пылеотделение от одежды для чистых помещений. Чистый воздух, выходящий из HEPA-фильтра на выходе счетчика Solair, продувает контролируемый участок ткани, а прибор подсчитывает количество отделившихся частиц.

Следующее не входящее в базовую комплектацию счетчиков Solair, но чрезвычайно полезное устройство – зонд для сканирования HEPA/ULPA-фильтров. Как уже упоминалось выше, счетчики частиц необхо-

димы при проведении тестов по стандарту ГОСТ Р ИСО 14544-3:2007 для определения дефектов установленных в чистых помещениях HEPA и ULPA-фильтров. Иными словами, для проверки целостности установленной системы фильтрации. Эти измерения проводятся путем подачи создаваемого генератором тестового аэрозоля высокой концентрации в воздуховод перед фильтром и измерении утечек через дефекты в фильтре и неплотности в его креплении. Пробоотбор осуществляется путем сканирования всей поверхности фильтра (и системы его крепления) прямоугольным зондом. Теперь следует подробнее описать эти зонды.

Если несколько лет назад компания Lighthouse, также как и другие производители счетчиков частиц, имела в своем ассортименте только один вид зонда для сканирования фильтров (из-за формы его еще называют щелевым пробоотборником) – обычный механический, который нужно было перемещать вдоль поверхности фильтра и одновременно отслеживать показания счетчика частиц (в этом случае нужно задействовать двух специалистов), то в настоящее время появились новые модели зондов, позволяющие упростить работу специалистов при проверке целостности фильтров. Это зонд ScanAir с собственным дисплеем и автоматизированный зонд ScanAir Pro.

Дисплей, установленный на ручке зонда ScanAir, – это весьма удобная функция для пользователей, т.к. в этом случае нет необходимости одновременно смотреть на экран для отслеживания результатов сканирования. Поскольку фильтры обычно устанавливаются на потолке, и специалист, проводящий сканирование, находится там же, то есть далеко от счетчика частиц, который обычно на соответствующую высоту не поднимают, то он одновременно может и проводить



Рис. 2. Сканирование установленных на потолке воздушных фильтров с помощью зонда ScanAir Pro. Внизу на столе – счетчик частиц Solair 3100 и разбавитель (используется при измерении концентрации частиц до фильтра)

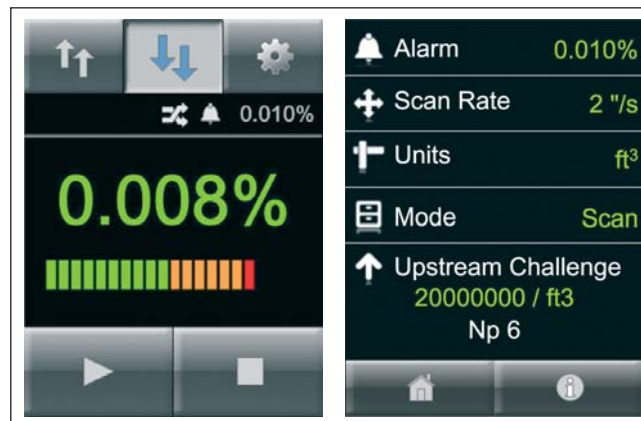


Рис. 3. Слева – дисплей ScanAir Pro показывает эффективность фильтрации в данной точке; справа – экран настройки: можно задавать предельное значение эффективности, скорость сканирования, единицы измерения, режим и концентрацию частиц до фильтра

сканирование поверхности фильтра зондом, и видеть результаты измерений. Таким образом, нет необходимости задействовать второго специалиста для слежения за дисплеем счетчика частиц.

Но компания Lighthouse не ограничилась установкой дисплея на зонде и пошла дальше. В 2014 году для поиска утечек в системе фильтрации был выпущен автоматизированный зонд ScanAir Pro. Он не только имеет собственный дисплей на своем корпусе, но и производит обработку измеряемых значений при сканировании с отображением результатов в режиме реального времени. Перед началом измерений можно задать предельное значение эффективности, скорость сканирования, единицы измерения, режим. Концентрацию частиц до фильтра можно измерить и также записать в память. Кроме того, зонд имеет кнопку удаленного управления счетчиком частиц (старт/стоп). Зонд ScanAir Pro работает вместе со счетчиками частиц Solair 5100 и 3100 (но только с приборами, выпущенными не ранее второй половины 2014 года).



Рис. 4. Счетчики частиц ApexP3 и ApexP5



Новые портативные счетчики аэрозолей ApexP – это приборы, с одной стороны, очень похожие на счетчики серии Solair, с другой стороны, у них довольно много различий. Основное сходство – превосходные метрологические характеристики, которые обеспечиваются многолетним опытом компании Lighthouse в производстве счетчиков частиц. Эти приборы имеют чувствительность 0,3 и 0,5 мкм, скорость пробоотбора 28,3 л/мин, что также позволяет их использование для аттестации или классификации чистых помещений, в том числе с зонами А и В. В стандартном исполнении они имеют 2 канала счета (размерных диапазона), но можно установить и 4. Работают счетчики Apex от сети, к ним может подключаться внешний принтер. Также как счетчики Solair, они имеют память на 3000 результатов измерений и цветной дисплей с русифицированным интерфейсом, также имеют корпус из нержавеющей стали, позволяющий легко их дезинфицировать.

Теперь о различиях. В отличие от счетчиков аэрозолей Solair, счетчики Apex не имеют встроенного принтера (при необходимости можно заказать подключаемый внешний принтер) и возможности подключения дополнительных датчиков окружающей среды. Но у этих приборов есть функции, соответствующие «духу времени». Во-первых, счетчики Apex проводят самодиагностику по 8-ми параметрам: в течении работы идет непрерывный внутренний контроль состояния лазера, фотоприемника, скорости пробоотбора и электронного блока детектирования частиц. Такой подход позволяет гарантировать надежность данных, получаемых при строгом соблюдении рабочих параметров прибора. Во-вторых, изменился также подход к передаче данных измерений: полученные данные можно просматривать не только на экране прибора, но и на ноутбуке, планшете, смартфоне через Web-сервер, или копировать на USB Flash через USB порт. Также доступна передача данных в компьютер по протоколу Modbus. И еще одна приятная для заказчиков особенность – счетчики Apex имеют более доступную цену, чем традиционные Solair.

Портативные счетчики аэрозолей Apex, как и Solair, в стандартной комплектации имеют HEPA-фильтр на выходе пробы из прибора, поэтому их можно использовать для измерений в помещениях высокого класса чистоты.

Надо заметить, что многие наши клиенты, приобретая ручной счетчик аэрозолей, в дальнейшем заказывают и портативный прибор (и наоборот!). Действительно, эти счетчики прекрасно дополняют друг друга. Легкий и удобный Handheld незаменим при оперативной работе и в командировках. Солидный Solair или «продвинутый» Apex обеспечивают несомненную метрологическую достоверность в чистых помещениях любого класса чистоты, а счетчики Solair позволяют сканировать поверхность HEPA-фильтров и проводить поиск неплотностей и дефектов фильтрующего материала. Часто важную роль играет наличие в Solair встроенного принтера. Именно по этим причинам мы добавили Solair и Apex в список базового оснащения подразде-

лений контроля чистых производственных помещений (табл. 2), правда, только в качестве рекомендации. Но если это подразделение фармацевтического предприятия – наличие счетчика со скоростью пробоотбора 28 л/мин уже обязательно.

Необходимо также остановиться на некоторых специальных случаях комплектации подразделений контроля, отмеченных в приложении. Так, если это подразделение планирует проведение классификации или аттестации чистых производственных помещений по правилам GMP, то в качестве основной «измерительной единицы» рекомендуем выбрать прибор Solair 3100 или 5100 – если на предприятии заказчика имеется относительно небольшое количество чистых помещений или зон (класса ИСО 5-6 или выше, класса А и В – если речь идет о фармацевтике). Если же подразделению контроля на предприятии требуется проводить аттестацию или классификацию чистых помещений со значительным количеством точек контроля (особенно в помещениях и зонах высокого класса чистоты), и, тем более, для оснащения аналитической лаборатории, занимающейся аттестацией и классификацией чистых помещений и зон на договорной основе, то следует выбрать счетчики частиц Solair 3200, 5200, 3350, 5350. Их технические характеристики практически не отличаются от аналогичных параметров приборов Solair 3100 и 5100, кроме скорости пробоотбора, равной 56 л/мин (или 50 л/мин в приборах для европейского рынка) или даже 100 л/мин. Это позволяет значительно (с 35 до 17 мин или до 10 мин) сократить время, необходимое для отбора и последующего подсчета числа частиц в 1 куб. метре воздуха – операции, необходимой при классификации чистых помещений в соответствии с правилами GMP. И это только в одной точке пробоотбора – а во время аттестации чистого помещения обычно приходится выполнять измерения в десятках точек. Правда, при измерениях обязательно следует учитывать одну особенность таких счетчиков: чем выше скорость пробоотбора, тем меньше предельно допустимая входная концентрация частиц (например, при скорости пробоотбора 28,3 л/мин это значение составляет  $17,5 \times 10^6$  частиц/м<sup>3</sup>, при скорости 56,6 или 50 л/мин – около  $12 \times 10^6$  частиц/м<sup>3</sup>, при скорости 100 л/мин –  $7 \times 10^6$  частиц/м<sup>3</sup>). Т.е. такого типа приборы не подходят для измерения счетной концентрации частиц в помещениях низких классов чистоты или атмосферного воздуха без предварительного разбавления.

В аэрокосмической промышленности ряд нормативных документов устанавливает требования к содержанию в воздухе частиц размером вплоть до 80–100 мкм. Специально для решения таких задач фирма Lighthouse Worldwide Solutions разработала счетчик частиц Boulder Counter. Он имеет диапазон измерений от 5 до 100 мкм, в остальном полностью соответствуя другим счетчикам семейства Solair. По схожей причине – необходимости контролировать частицы размером от нескольких микрометров, счетчики Boulder Counter и Solair 5100 (обычно с расширением диапа-

зона до 25 мкм) подходят для использования в автомобилестроении. Кстати, компания Lighthouse была одним из пионеров внедрения целых систем мониторинга на автомобильном производстве, преимущественно на линиях окраски кузовов. Специально для этой цели были разработаны датчики частиц Remote 50104. Системы мониторинга с такими датчиками работают на предприятиях Toyota, Mitsubishi и др.

Еще один специальный случай – контроль фильтрующих материалов и определение точки MPPS (*most penetrating particle size* – размер наиболее проникающих частиц) при производстве HEPA- и ULPA-фильтров. В этом случае необходимо проводить измерения частиц в диапазоне размеров от 0,1 мкм. Эту задачу решают приборы Solair 1100LD с диапазоном измерений от 0,1 мкм до 5 мкм при скорости пробоотбора 28,3 л/мин. Прочие технические характеристики этих приборов аналогичны упомянутым ранее в статье приборам серии Solair.

Немаловажно, что все лазерные счетчики частиц типов Handheld и Solair постоянно вносятся в госреестр измерительных приборов РФ. Этот факт имеет большое значение для многих наших заказчиков.

Наконец, Lighthouse Worldwide Solutions – единственный производитель приборов для чистых помещений, предоставляющий на свою продукцию гарантию в 2 года и имеющий собственный авторизованный производителем сервис-центр в Москве.

Поскольку эффективность HEPA- и тем более ULPA-фильтров чрезвычайно высока, для измерения их эффективности на вход испытываемого фильтра необходимо подавать тестовый аэрозоль высокой концентрации. Эту задачу решает **аэрозольный генератор ATM 226** производства компании Toras GmbH (Германия). Особенностью работы генератора ATM 226 является то, что максимум функции распределения размеров генерируемых им аэрозолей DEHS соответствует точке наименьшей эффективности фильтрации (точка MPPS). При этом концентрация частиц с наиболее высокой проникающей способностью (размером 0,1–0,3 мкм) свыше  $10^7$  частиц/см<sup>3</sup>. Для распыления в генераторах аэрозолей могут быть использованы такие жидкости, как DEHS, DOP, Emery 3004, парафины, PSL, растворы солей, суспензии.

ATM 226 – прочный, компактный и лёгкий генератор аэрозолей, что обеспечивает его мобильное использование. Требуемый для работы прибора поток воздуха создаётся встроенным компрессором и потом очищается HEPA-фильтром. Обычно скорость потока в этих приборах устанавливается около 250 л/час. Генератор ATM 226 позволяет установить скорость от 50 до 300 л/ч. Образующийся аэрозоль имеет высокую концентрацию частиц, средний диаметр которых составляет 225 нм, и поэтому хорошо подходит для измерений в чистых помещениях. Регулировка скорости генерации частиц может осуществляться при помощи игольчатого клапана на входе расходомера. Поверхность прибора из нержавеющей стали гладкая и, соответственно, легко моется.



Рис. 5. Генератор тестового аэрозоля ATM 226 и разбавитель потока DIL 554 производства Toras GmbH (Германия)

При измерении эффективности HEPA- и ULPA-фильтров измерения счетной концентрации проводятся счетчиком частиц до и после фильтра. При этом до фильтра измеряемый аэрозоль имеет слишком большую концентрацию, поэтому перед измерительным прибором устанавливается **разбавитель**. Применение разбавителя позволяет использовать один и тот же прибор при измерениях как высококонцентрированного аэрозоля, так и аэрозоля с низкой концентрацией частиц. Компания Toras GmbH производит и разбавители аэрозолей. Для высокоточного разбавления воздуха на входе в измерительные приборы, в частности, для измерения концентраций тестового аэрозоля на входе в испытываемый фильтр чаще всего используются разбавители типа **DIL 554**. Он обеспечивает кратность разбавления 1:100 при расходе воздуха 28,3 л/мин (т.е. согласованном с приборами семейства Solair и ApexP).

На рис. 6 приведена типичная схема измерения эффективности HEPA-фильтра, встроенного в ламинарный бокс, с использованием счетчика частиц, разбавителя и генератора тестового аэрозоля.

Отдельного рассмотрения требует такой вид измерений в чистом помещении, как визуализация воздушных потоков. С помощью таких измерений легко обнаружить застойные зоны внутри чистого помещения, изучить поведение воздушных потоков при открытии дверей или интенсивных движениях оператора, исследовать качество гибких занавесей и стенок, разделяющих зоны различного класса чистоты и т.п. (см., например, статью [3]). Полученная картина воздушных потоков легко фиксируется с помощью фото- или видеоаппаратуры.

Для визуализации воздушных потоков в чистых помещениях мы рекомендуем **генератор-визуализатор тумана FOG Generator 2010** производства компании Safex (Германия). Это прибор небольшого размера, который оборудован внешним резервуаром для жидкости. Мощность генератора позволяет генерировать туман как большой интенсивности, так и маленькой. Специальная жидкость «Extra Clean», используемая для создания тумана, позволяет использовать генера-

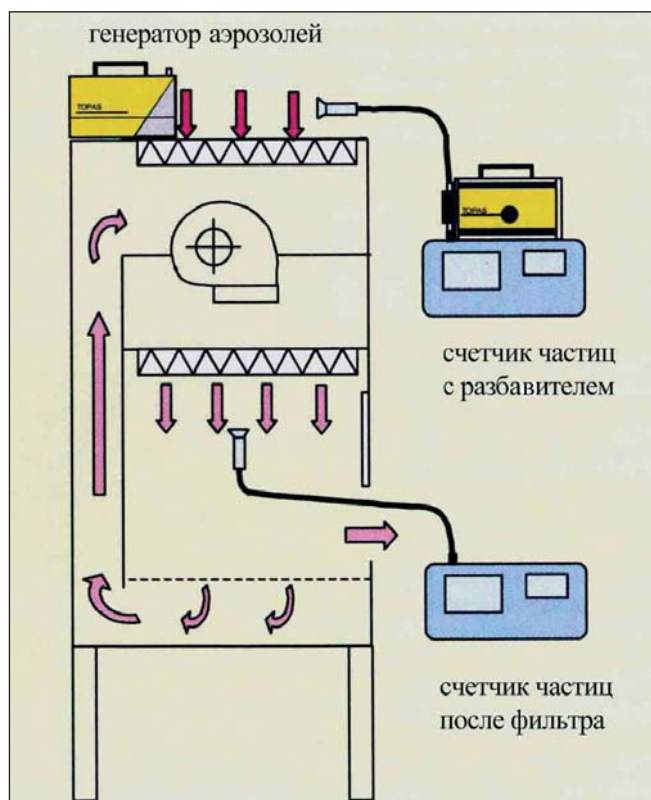


Рис. 6. Схема измерения эффективности НЕРА-фильтра, встроенного в ламинарный бокс, с использованием счетчика частиц, разбавителя и генератора тестового аэрозоля

тор для визуализации потоков воздуха на фармацевтических производствах. Эта жидкость разработана специально для использования в чистых помещениях, подвергнута тщательной очистке, не оставляет следов и обладает антисептическим действием (полностью исключено загрязнение микроорганизмами).

Довольно просто решается задача измерения в чистых производственных помещениях таких параметров, как линейная скорость воздуха, температура



Рис. 7. Генератор FOG 2010+ для визуализации воздушных потоков в чистых помещениях

и влажность, перепад давления. Дело в том, что все эти измерения можно провести с помощью одного многофункционального прибора со сменными насадками. Обычно мы рекомендуем давно известные на российском рынке и хорошо себя зарекомендовавшие приборы немецкой фирмы Testo AG.

Последнее время наиболее популярны среди пользователей чистых помещений многофункциональные измерительные приборы Testo 435-4 со встроенной функцией измерения дифференциального давления. К приборам можно подключать дополнительные зонды для измерения скорости воздуха, температуры и влажности. Выбор зондов достаточно широкий. Многое зависит от вопроса, поставленного в начале (планируется ли аккредитация на проведение работ по аттестации чистых помещений или же намечены текущие измерения для практических нужд «в рабочем порядке»): в первом случае обязательны зонды с повышенной точностью, во втором достаточно датчиков со стандартными параметрами.

Прибор Testo 435-4 имеет память на 10 000 результатов измерений, может подключаться к компьютеру через USB-порт; к нему возможно дополнительно приобрести специальный пакет программного обеспечения для обработки результатов измерений. Похожими характеристиками обладает и двухканальный многофункциональный портативный прибор для комплексного измерения параметров климата и настройки систем отопления, вентиляции и кондиционирования Testo 445, также часто используемый в чистых помещениях.

Поскольку в помещениях с неоднаправленным потоком воздуха возможно формирование областей струй и локальных турбулентностей, влияние которых трудно учесть при измерениях с помощью анемометра, для измерений в них скорости потока используются балометры (объемные расходомеры). Компания Testo AG с недавнего времени поставляет в Россию электронные балометры Testo 420. Этот прибор используется для измерения объемного расхода, температуры и относительной влажности на воздухораспределительных решетках. В процессе измерения кожух прибора накладывается на фильтр или диффузор, полностью закрывая его. Таким образом, весь поступающий воздух направляется к выходному сечению кожуха, где установлен расходомер. Это полностью исключает влияние турбулентностей и струйного течения. Единственно, на что надо обращать особое внимание, это плотное прилегание рамки, образующей входное сечение кожуха балометра, к потолку (или к иной плоскости, на которой закреплен фильтр или диффузор, например, к боковой стене или полу). Проведение точных измерений объемного расхода воздуха в помещениях с неоднаправленным потоком воздуха – одна из важных задач при проведении аттестации чистых помещений.

Поскольку в данной статье речь идет об оснащении подразделений, занимающихся измерениями в чистых помещениях, в заключение нельзя не упомянуть еще об одной особенности их деятельности. На предприятиях,



Таблица 1

Виды измерений в чистом помещении по ГОСТ Р ИСО 14644-3:2007

Контролируемый параметр	Ссылки на стандарт ИСО 14644-3:2007			Ссылки на другие стандарты ИСО
	Область применения	Методика	Оборудование	
Счетная концентрация частиц (обязательный метод)	4.2.1.	В.1	С.1	14644-1 и 14644-2
Концентрация ультрамелких аэрозольных частиц	4.2.1.	В.2	С.2	14644-1
Концентрация аэрозольных макрочастиц	4.2.1.	В.3	С.3	14644-1
Поток воздуха	4.2.2.	В.4	С.4	14644-1 и 14644-2
Перепад давления	4.2.3	В.5	С.5	14644-1 и 14644-2
Целостность установленной системы фильтрации	4.2.4	В.6	С.6	14644-2
Направление потока воздуха, визуализация потока	4.2.5	В.7	С.7	14644-2
Температура	4.2.6	В.8	С.8	7726
Влажность	4.2.6	В.9	С.9	7726
Статическое электричество и генерация ионов	4.2.7	В.10	С.10	
Осаждение частиц	4.2.8	В.11	С.11	
Время восстановления	4.2.9	В.12	С.12	14644-2
герметичность ограждающих конструкций	4.2.10	В.13	С.13	14644-1 и 14644-2

где имеется компьютерная система непрерывного или периодического мониторинга параметров чистых помещений и технологических сред, эксплуатацией подобных систем также занимаются подразделения контроля (метрологические службы). Однако проектирование,

монтаж и эксплуатация систем мониторинга – большая и сложная тема, подробно рассмотренная в публикациях [4-7]. Тем не менее, мы включили в таблицы рекомендаций и соответствующие требования к датчикам частиц для систем непрерывного мониторинга.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### РЕКОМЕНДУЕМОЕ БАЗОВОЕ ПРИБОРНОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ КОНТРОЛЯ ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЧИСТЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

Приборы для измерения размеров и счетной концентрации следует различать по их назначению – для оперативного контроля (повседневных измерений) и для аттестации чистых помещений. При этом некоторые отрасли промышленности и области применения отличаются специфическими требованиями, и потому подбор приборов для них может отличаться некоторыми особенностями.

#### ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ/ БИОТЕХНОЛОГИИ/МЕДИЦИНА

Подбор приборов для контроля параметров чистых помещений в фармацевтической промышленности (а также в биотехнологии, медицине и всех других отраслях, связанных с живой природой и объединенных понятием life science), определяется не только (и не столько) стандартом ГОСТ Р ИСО 14644-3, но в основном правилами GMP (Good Manufacturing Practice), которым соответствуют ГОСТ Р 52249-2009 и Приложение № 1 «Производство стерильных лекарственных средств» к Приказу № 916 Минпромторга РФ от 14.06.2013 г. (в редакции, введенной в действие с 11.01.2016 г. приказом Минпромторга РФ от 18.12.2015 г. № 4148) «Об утверждении Правил надлежащей производственной практики».

Основные отличия требований правил GMP от ИСО 14644:

- проводятся измерения для частиц с размерами 0,5 мкм и выше и 5,0 мкм и выше;
- при аттестации (квалификации) чистых производственных помещений в life science требуется провести измерения количества частиц указанных размеров в 1 кубическом метре воздуха;
- в чистых помещениях, соответствующих классу чистоты А, должен быть организован постоянный мониторинг чистоты воздуха.

Поэтому для фармацевтических предприятий, медицинских учреждений, биотехнологических производств и др. рекомендуется использовать счетчик частиц со скоростью отбора пробы 28 л/мин.

Все счетчики частиц Solair, Apex выпускаются в двух вариантах: с минимальным регистрируемым размером частиц 0,3 мкм и с минимальным регистрируемым размером частиц 0,5 мкм. Остальные метрологические и эргономические характеристики этих приборов совпадают. В таких случаях мы советуем приобретать счетчики с чувствительностью 0,3 мкм – всегда лучше иметь запас по чувствительности; кроме того, такие счетчики более универсальны, в частности, их можно применять для сканирования HEPA-фильтров.



**Таблица 2**

Контроль счетной концентрации частиц различных размеров

Вид измерений	Рекомендуемые приборы
Измерения размеров и концентрации частиц (оперативные измерения)	Solair 3100 (Solair 5100) или Apex P3 (Apex P5) или Handheld 3016 (Handheld 5016)
Измерения размеров и концентрации частиц (аттестация чистых помещений)	Solair 3100 (Solair 5100) или Apex P3 (Apex P5) или Solair 3200 (5200) или Solair 3350 (5350)
Измерения размеров и концентрации частиц в сжатом воздухе	Solair 3100 (5100) или Apex P3 (P5) + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 1 CFM (куб.фут./мин)
Мониторинг частиц	предпочтительнее датчики Remote со скоростью пробоотбора 28 л/мин (Remote 5104, 5104V, 5104P, 5104PN, ApexR 5)
Измерение дефектов и сканирование установленных HEPA-фильтров	Solair 3100 + генератор аэрозолей ATM 226 + разбавитель DIL 554 + ScanAir или ScanAir Pro или пассивный сканирующий щелевой пробоотборник

**Таблица 3**

Контроль других параметров чистых помещений

Параметры среды	Приборы
Визуализация воздушных потоков	Генератор тумана FOG 2010+
Скорость однонаправленных воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)
Скорость неоднаправленных (турбулентных) воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 9335 (крыльчатка d=60 мм) или зонд 0635 9535 (крыльчатка d=16 мм)
Перепад давления (стационарный прибор, монтируемый на стене или оборудовании)	Dwyer Magnehelic 2000
Перепад давления (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4
Температура, относительная влажность (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)

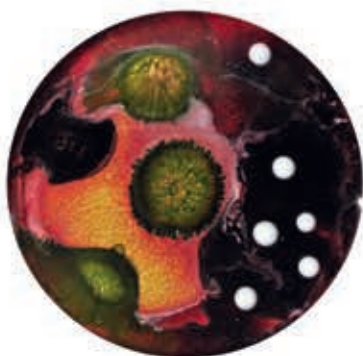
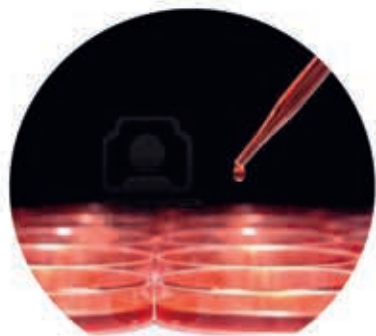
Сведения по выбору приборов для контроля счетной концентрации частиц различных размеров представлены в таблице 2, а для контроля других параметров чистых помещений в таблице 3.

**МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Подбор приборов для контроля параметров чистых помещений производится в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р ИСО 14644-3. Основным параметром, определяющим выбор счётчиков частиц –

чувствительность (минимальный размер детектируемых частиц – зависит от технологического процесса, который проводится в данном чистом помещении). Возможно применение счётчиков с чувствительностью 0,1 мкм, 0,2 мкм и 0,3 мкм.

С учетом этого, рекомендации по выбору приборов для контроля счётной концентрации частиц представлены в таблице 4, а для контроля других параметров – в таблице 5.



# Cleanroom Instruments

| авторизованный сервис-центр | калибровка и ремонт |  
| проектирование и валидация систем мониторинга |  
| обучение персонала |

- Счетчики аэрозолей
- Системы мониторинга чистых помещений по GMP
- Генераторы аэрозолей
- Визуализация воздушных потоков
- Контроль перепадов давления
- Счетчики частиц в жидкостях
- Контроль общего органического углерода
- Контроль молекулярных загрязнений
- ISO 14644-3

 **LIGHTHOUSE**  
WORLDWIDE SOLUTIONS



ООО НПЦ «Клинрум Инструментс»  
(499) 196-77-27, 196-75-94  
факс: (499) 196-77-27  
e-mail: [clri@clri.ru](mailto:clri@clri.ru)

<http://clri.ru>  
e-mail: [clri@clri.ru](mailto:clri@clri.ru)

**Таблица 4**

Контроль счетной концентрации частиц различных размеров

Вид измерений	Рекомендуемые приборы
Измерения размеров и концентрации частиц (как оперативные измерения, так и аттестация чистых помещений): с чувствительностью 0,1 мкм с чувствительностью 0,2 мкм с чувствительностью 0,3 мкм	Solair 1100 LD Handheld 2016 Handheld 3016
Измерения размеров и концентрации частиц в сжатом воздухе: с чувствительностью 0,1 мкм  с чувствительностью 0,2 мкм  с чувствительностью 0,3 мкм	Solair 1100 LD + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 1 CFM (куб.фут/мин) Handheld 2016 + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 0,1 CFM (куб.фут/мин) Handheld 3016 + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 0,1 CFM (куб.фут/мин)
Мониторинг частиц: с чувствительностью 0,1 мкм с чувствительностью 0,2 мкм с чувствительностью 0,3 мкм	Remote 1104 LD или Remote 1100 LD Apex R02 или Remote 2014 или Remote 2014P Apex R03 или Remote 3014 или Remote 3014P
Измерение дефектов и сканирование установленных HEPA-фильтров	Solair 3100 + генератор аэрозолей ATM 226 + разбавитель DIL 554 + ScanAir или ScanAir Pro или пассивный сканирующий щелевой пробоотборник

**Таблица 5**

Контроль других параметров чистых помещений

Параметры среды	Приборы
Визуализация воздушных потоков	Генератор тумана FOG 2010+
Скорость однонаправленных воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)
Скорость неоднаправленных (турбулентных) воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 9335 (крыльчатка d=60 мм) или зонд 0635 9535 (крыльчатка d=16 мм)
Перепад давления (стационарный прибор, монтируемый на стене или оборудовании)	Dwyer Magnehelic 2000
Перепад давления (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4
Температура, относительная влажность (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)



### Аэрокосмическая промышленность

Особенностью аэрокосмической промышленности является расширенный диапазон размеров измеряемых частиц в сторону больших значений диаметров частицы (5, 10, 25, иногда 40 мкм). Эти требования содержатся в отраслевых нормативных документах (ОСТ 1 41519-2001 и др.). В остальном подбор приборов для контроля параметров чистых помещений производится в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р ИСО 14644-3 и представлен в таблицах 6 и 7.

### Автомобильная промышленность

Последнее десятилетие автомобильная промышленность все в больших масштабах внедряет контроль за чистотой воздуха на всех стадиях производства. Так, сборку приборных панелей рекомендуется проводить в помещениях класса ИСО 8, окраску кузова и сборку инжекторов – в классе ИСО 7, а работу с оптикой – в помещениях класса ИСО 6.

Контролируются и другие технологические среды; например, контроль технологических жидкостей

**Таблица 6**

Контроль счетной концентрации частиц различных размеров

Вид измерений	Рекомендуемые приборы
Измерения размеров и концентрации частиц (как оперативные измерения, так и аттестация чистых помещений)	Boulder Counter или Solair 5100 со специальными границами поддиапазонов (например, 0,5 / 1 / 2 / 5 / 10 / >25 мкм) или Handheld 5016 со специальными границами поддиапазонов
Измерения размеров и концентрации частиц в сжатом воздухе	Boulder Counter или Solair 5100 со специальными границами поддиапазонов + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 1 CFM (куб.фут/мин) или Handheld 5016 со специальными границами поддиапазонов + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 0,1 CFM (куб.фут/мин)
Мониторинг частиц	Remote 5014P
Измерение дефектов и сканирование установленных НЕРА-фильтров	Solair 3100 + генератор аэрозолей ATM 226 + разбавитель DIL 554 + ScanAir или ScanAir Pro или пассивный сканирующий щелевой пробоотборник

**Таблица 7**

Контроль других параметров чистых помещений

Параметры среды	Приборы
Визуализация воздушных потоков	Генератор тумана FOG 2010+
Скорость однонаправленных воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)
Скорость неоднаправленных (турбулентных) воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 9335 (крыльчатка d=60 мм) или зонд 0635 9535 (крыльчатка d=16 мм)
Перепад давления (стационарный прибор, монтируемый на стене или оборудовании)	Dwyer Magnehelic 2000
Перепад давления (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4
Температура, относительная влажность (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)

должен проводиться в соответствии со специальным международным стандартом для автомобильной промышленности ISO 16232.

Компания Lighthouse была одним из пионеров внедрения систем мониторинга на автомобильном производстве, преимущественно на линиях окраски кузовов. Специально для этой цели были разработаны датчики частиц Remote 50104.

Рекомендуемый выбор приборов для контроля параметров воздушной среды в чистых помещениях этой отрасли представлен в таблице 8.

**ПРИБОРЫ ДЛЯ АТТЕСТАЦИОННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ**

Для аттестационных лабораторий предпочтительнее иметь счетчик частиц Solair 3100, так как с его помощью можно контролировать целостность HEPA- и ULPA-фильтров (это возможно и со счетчиком Solair 3200, но последний не работает со сканирующими пробоотборниками ScanAir и ScanAir Pro, но только с пассивным сканирующим пробоотборником).

Для аттестационных лабораторий, работающих с фармацевтическими предприятиями, следует рекомендовать Solair 3350, применение которого позволяет

**Таблица 8**

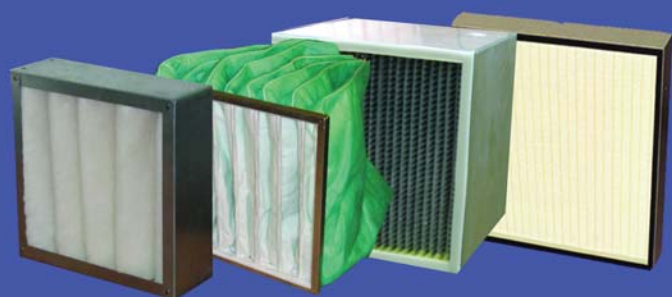
Контроль счетной концентрации частиц различных размеров

Вид измерений	Рекомендуемые приборы
Измерения размеров и концентрации частиц (как оперативные измерения, так и аттестация чистых помещений)	Boulder Counter или Solair 5100 со специальными границами поддиапазонов (например, 0,5 / 1 / 2 / 5 / 10 / >25 мкм) или Handheld 5016 со специальными границами поддиапазонов
Измерения размеров и концентрации частиц в сжатом воздухе	Boulder Counter или Solair 5100 со специальными границами поддиапазонов + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 1 CFM (куб.фут/мин) или Handheld 5016 со специальными границами поддиапазонов + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 0,1 CFM (куб.фут/мин)
Мониторинг частиц	Remote 50104



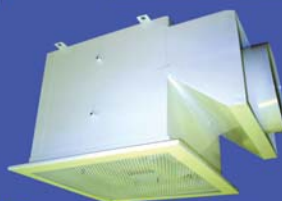
# ФИЛЬТРЫ ВОЗДУШНЫЕ

**ДЛЯ ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ЛЮБЫХ ТРЕБОВАНИЙ ЧИСТОТЫ**



**ФИЛЬТРЫ КЛАССОВ G3 - H17  
ГОСТ Р 51251-99 (EN 779 и EN 1822)**

**Фильтрующие камеры  
(СКФ и ССФ)  
для размещения карманных  
и складчатых фильтров**



**Модули (МВ) для  
установки HEPA фильтров**



**Таблица 9**

Контроль счетной концентрации частиц различных размеров

Вид измерений	Рекомендуемые приборы
Измерения размеров и концентрации частиц (оперативные измерения)	Handheld 3016
Измерения размеров и концентрации частиц (аттестация чистых помещений)	Solair 3100 или Solair 3200 (5200) или Solair 3350 (5350)
Измерения размеров и концентрации частиц в сжатом воздухе	Solair 3100 + адаптер для измерения при высоких давлениях с расходом 1 CFM (куб.фут/мин)
Мониторинг частиц	Remote 5014P с ПО LMS Express RT 7
Измерение дефектов и сканирование установленных HEPA-фильтров	Solair 3100 + генератор аэрозолей ATM 226 + разбавитель DIL 554 + ScanAir или ScanAir Pro или пассивный сканирующий щелевой пробоотборник

**Таблица 10**

Контроль других параметров чистых помещений

Параметры среды	Приборы
Визуализация воздушных потоков	Генератор тумана FOG 2010+
Скорость однонаправленных воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)
Скорость неоднаправленных (турбулентных) воздушных потоков	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 9335 (крыльчатка d=60 мм) или зонд 0635 9535 (крыльчатка d=16 мм)
Перепад давления (стационарный прибор, монтируемый на стене или оборудовании)	Dwyer Magnehelic 2000
Перепад давления (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4
Температура, относительная влажность (переносной прибор для оперативного контроля)	Прибор Testo 435-4 + зонд 0635 1535 (3-х функциональный зонд скорости воздуха со встроенным сенсором температуры и влажности)

значительно (в четыре раза) сократить время измерений при аттестации чистого помещения.

Список рекомендуемых приборов для аттестационных лабораторий представлен в таблицах 9 и 10.

### Литература

1. Калечиц В. И. Приборы контроля чистых помещений: новое поколение. «Чистые помещения и технологические среды», 2012, № 1 (41), стр. 61-67.
2. Гайдуков А. Д., Господинов А. В. Краткий обзор производств, которые требуют контроля загрязнений технологической среды. «Чистые помещения и технологические среды», 2012, № 2 (42), стр. 6-17.
3. фон Кальден Т. Визуализация воздушных потоков. «Чистые помещения и технологические среды», 2006, № 2, стр. 7-11.
4. Калечиц В. И. Рекомендации по созданию систем мониторинга чистоты воздуха на основе датчиков Lighthouse. «Чистые помещения и технологические среды», 2013, №2 (46), стр. 15-31.
5. Практические рекомендации для мониторинга частиц в воздухе чистых помещений, в барьерных системах ограниченного доступа (RABS) и в изоляторах. «Чистые помещения и технологические среды», 2014, № 2 (50), стр. 19-28.
6. Албер М. Системы мониторинга чистых помещений: краткое руководство по внедрению. «Чистые помещения и технологические среды», 2014, № 3 (51), стр. 24-26.
7. Хозяшева Е.С., Веселая М.В., Шахов М.Н., Маслаков О.Ю., Ковбасюк И.Е. Проектирование системы мониторинга: 10 главных ошибок и как их избежать. «Чистые помещения и технологические среды», 2016, №1 (57), стр. 24-34. ■