«**Чистое помещение** – помещение, в котором контролируется концентрация взвешенных в воздухе частиц и которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, выделение и удержание частиц внутри помещения, и в котором, по мере необходимости, контролируются другие параметры, например; температура, влажность и давление».

По пределам максимальной концентрации (число частиц/м^3 воздуха) в диапазоне размеров частиц от 5 до 0,1 мкм чистые помещения подразделяются на **классы ИСО (ISO)**, сведения о которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Максимальное содержание частиц в 1 м^3 воздуха для помещений различных классов чистоты по ГОСТ ИСО 14644-1

Класс чистоты	Размер частиц, мкм					
	≥ 0,1	≥ 0,2	≥ 0,3	≥ 0,5	≥ 1,0	≥ 5,0
1 ИСО	10	2				
2 ИСО	100	24	10	4		
3 ИСО	1 000	237	102	35	8	
4 ИСО	10 000	2 370	1 020	352	83	
5 ИСО	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
6 ИСО	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7 ИСО				352 000	83 200	2 930
8 ИСО				3 520 000	832 000	29 300
9 ИСО				35 200 000	8 320 000	293 000

Итак, в качестве основных загрязнений выступают взвешенные в воздухе частицы, которые могут попадать в чистое помещение как из окружающего воздуха, так и выделяться внутри помещения. Вот далеко не полный перечень того, что может содержать окружающий нас воздух: пыль, цветочная пыльца, табачный дым, смог, бактерии, вирусы, грибки и т. д. Внутри помещения основным источником частиц является человек, например, при интенсивном движении человек выделяет до 10 млн частиц размером от 0,5 мкм и более в минуту. Также источником загрязнений является технологическое оборудование – частицы покрытия и материалов.

В среднем в чистом помещении поступления микрозагрязнений на 70–80 % – от человека, 15–20 % – от оборудования и только 5–10 % – с окружающим воздухом через неплотности ограждающих конструкций. В зависимости от области использования чистого помещения доля источников микрозагрязнений может изменяться, например, в микроэлектронике доля человека составляет 35 %. Более подробную информацию можно найти в [4].

Для того чтобы снизить поступление микрозагрязнений из пространства, окружающего чистое помещение, применяются определенные архитектурно-планировочные решения:

- специальные ограждающие конструкции: стеновые самонесущие сэндвич-панели, потолки (легкие, кассетные, панельные), обладающие повышенной герметичностью, окна;

- специальные конструкции входных групп: двери (распашные, раздвижные, застекленные, с автоматическим открыванием и т. д), тамбур-шлюзы, передаточные материальные шлюзы-боксы.

Снижению поступления вредностей из соседних помещений также способствует поддержание избыточного давления в чистом помещении.

Для компенсации вредностей, выделяемых персоналом, применяется метод разбавления вредностей путем подачи чистого воздуха. Для очистки приточного воздуха применяются многоступенчатые системы фильтрации, в состав которых входят высокоэффективные HEPA (High Efficiency Particulate Air) и даже ULPA-фильтры (Ultra Low Penetration Air). Классы фильтрации [5], соответствующие этим фильтрам, приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Классификация фильтров

Группа фильтров	Класс фильтра	Значение эффективности, %	Примечание
Фильтры общего назначения			
Фильтры грубой очистки (предварительные фильтры)	G1	менее 65	Эффективность определяется по синтетической пыли с крупными частицами (более 2 мкм).
	G2	от 65 до 80	
	G3	от 80 до 90	
	G4	свыше 90	
Фильтры тонкой очистки	F5	от 40 до 60	Эффективность определяется по атмосферной пыли, содержащей, в том числе, мелкие частицы (менее 1 мкм).
	F6	от 60 до 80	
	F7	от 80 до 90	
	F8	от 90 до 95	
	F9	свыше 95	
Фильтры специального назначения			
Фильтры высокой эффективности (HEPA)	H10	85	Эффективность определяется по пыли с особо мелким частицам (ориентировочно от 0,1 до 0,5 мкм).
	H11	95	
	H12	99,5	
	H13	99,95	
	H14	99,995	
Фильтры сверхвысокой эффективности (ULPA)	U15	99,9995	
	U16	99,99995	
	U17	99,999995	

В соответствии с назначением чистого помещения (микроэлектроника, космическая промышленность, здравоохранение, фармацевтика и т. д.) и в зависимости от его класса существуют типовые решения, регламентирующие количество ступеней очистки воздуха и класс фильтров. Например, для производства стерильных лекарственных средств в чистых помещениях 5 класса ИСО рекомендуется применять три ступени очистки с фильтрами классов F5, F9, H14. Причем если фильтры грубой и тонкой очистки могут быть размещены непосредственно в приточной установке, то HEPA-фильтры, как

правило, размещаются в потолке чистого помещения в так называемых фильтрах прямой раздачи воздуха.

Основные особенности чистых помещений, на которые следует обращать внимание при проектировании систем вентиляции

1. Наличие ограждающих конструкций с повышенной герметичностью.

Превышение расхода приточного воздуха над вытяжным может привести к неконтролируемому превышению величины избыточного давления в чистом помещении и, как следствие, к короблению ограждающих конструкций и нарушению герметичности помещения.

Решение. Необходимость поддержания и контроля величины избыточного давления в чистом помещении.

2. Наличие тамбур-шлюза.

При наличии избыточного давления в чистом помещении открытие тамбур-шлюза сопровождается значительным уменьшением величины избыточного давления (вплоть до выравнивания давлений в чистом и «грязном» помещениях). Например, избыточное давление в 5 Па не может гарантировать отсутствие попадания вредностей из соседнего «грязного» помещения через дверной проем.

Решение. Необходимость поддержания и контроля величины избыточного давления в чистом помещении.

3. Наличие высокоэффективных HEPA-фильтров в составе системы вентиляции чистого помещения.

Применение в чистых помещениях фильтров классов H11–H14 – это основная причина, значительно отличающая процедуру проектирования системы вентиляции чистого помещения от проектирования вентиляции обычного помещения. Почему?

Системы вентиляции обычных помещений относятся к системам с постоянным расходом воздуха – CAV (const air volume) системам. Сопротивление сети в CAV-системах, как правило, незначительно изменяется в процессе эксплуатации. Таким образом, будучи один раз отбалансированными они не изменяют своих характеристик во времени.

Несколько иначе обстоят дела с системами вентиляции чистых помещений. Характерной особенностью HEPA-фильтров является значительное начальное сопротивление (сопротивление чистого фильтра) и, что особенно важно, значительный диапазон изменения сопротивления фильтра. Например, сопротивление чистого фильтра класса H14 достигает 350 Па, а конечное (при достижении этого перепада давления фильтр заменяется) – 650 Па. Если не применять специальных способов, то из-за значительного изменения гидравлического сопротивления HEPA-фильтров в процессе эксплуатации сопротивление всей вентиляционной сети также изменяется. А это значит, что изменяются расходы воздуха, поступающие в чистые помещения, то есть без принятия специальных мер для компенсации сопротивления фильтров системы вентиляции чистых помещений будут относиться к системам с переменным расходом воздуха – VAV-системам (variable air volume).

Налицо противоречие – по технологии расходы воздуха, подаваемые в чистые помещения, не должны меняться в процессе эксплуатации, то есть по назначению система вентиляции чистых помещений относится к CAV-системе. Необходимо здесь также отметить следующую особенность применения HEPA-фильтров. Если чистое помещение не одно, а их несколько и в каждом помещении используются фильтры различного класса либо необходимы разные расходы приточного воздуха, то сопротивление веток с этими фильтрами меняется не одинаково. Это значит, что в процессе эксплуатации чистых помещений, даже в первоначально отбалансированных ветках сети, расходы воздуха будут все больше и больше отличаться от требуемых. Для компенсации этого эффекта необходимо применять специальные меры. В отечественной практике часто используют частотное регулирование. Однако приточная установка с частотным регулированием в сети с переменным сопротивлением способна поддерживать только суммарный расход и поэтому может быть эффективна только для единичного помещения.

Решение. Использование CAV-регуляторов расхода.

Используя CAV-регулятор можно VAV-систему перевести в CAV-систему. Идея заключается в том, чтобы сопротивление системы CAV-регулятор + HEPA-фильтр было постоянным в процессе эксплуатации. А для этого необходимо, чтобы при росте сопротивления HEPA-фильтра сопротивление CAV-регулятора пропорционально уменьшалось. Реализация этого алгоритма позволит сохранить постоянным расход воздуха, подаваемого в чистое помещение, и обеспечить автоматическую балансировку нескольких чистых помещений в процессе эксплуатации даже при отсутствии частотного регулирования.

CAV-регулятор представляет собой однолепестковый клапан с центральной осью вращения (рис. 1). Лепесток клапана соединен с пружиной, стремящейся открыть клапан. Под лепестком расположен небольшой пластиковый мешок с отверстием. Увеличение натяжения пружины увеличивает усилие открытия лепестка и, как следствие, изменяет настройку клапана на больший расход. При поступлении потока воздуха в регулятор мешок надувается и стремится закрыть клапан, а предварительно натянутая пружина стремится его открыть. Окончательно две силы уравновешиваются, и лепесток занимает положение, соответствующее заданному расходу воздуха, то есть поддержание постоянного расхода воздуха реализуется без использования электрических или пневматических приводов.

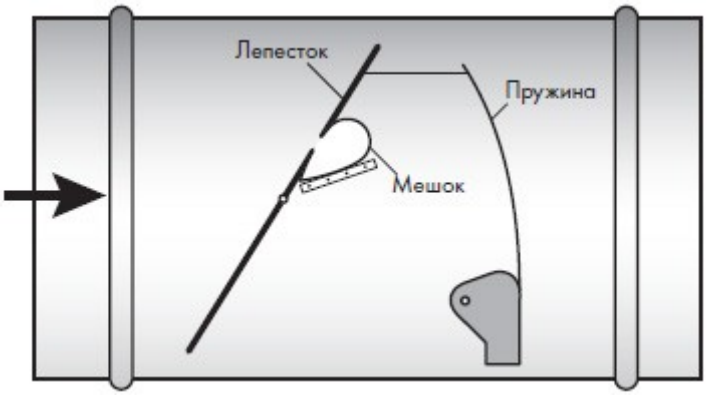


Рисунок 1.

Схема функционирования CAV-регулятора

CAV-регуляторы могут быть круглыми диаметром от 100 до 400 мм, с расходом воздуха от 80 до 5 000 м^3/ч и прямоугольными с сечением от 200 х 100 мм до 600 х 600 мм с расходом от 144 до 12 100 м^3/ч.

CAV-регуляторы обладают рядом характерных особенностей, на которые следует обращать внимание при их использовании:

- требуемый минимальный напор для функционирования регулятора 50 Па;

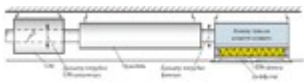
- для каждого размера CAV-регулятора существует свой рабочий диапазон расходов – Vmin, Vmax. Например, для диаметра 160 – 216–884 м^3/ч, соответственно, для диаметра 200 – 324–1 294 м^3/ч;

- уровень мощности шума, генерируемого CAV-регулятором, зависит не только от расхода воздуха, но и от падения давления на регуляторе.

Пример выбора типоразмера CAV-регулятора

На притоке в чистых помещениях применяется следующая комбинация (рис. 2): CAV-регулятор + шумоглушитель (при необходимости) + отсечной клапан (при необходимости) + фильтр прямой раздачи воздуха со сменным фильтром 11 или 13 классов чистоты (H13, H14).

Рисунок 2



CAV + фильтр прямой раздачи воздуха

Фильтр прямой раздачи воздуха устанавливается непосредственно в чистом помещении и представляет собой герметичный корпус с контуром герметизации HEPA-фильтра и воздухораздающего устройства (ВРУ). ВРУ могут быть различного исполнения – перфорированные, вихревые или струйные. Фильтры прямой раздачи воздуха могут иметь круглые или прямоугольные патрубки, расположенные сбору или сверху.

Для определенности рассмотрим вариант: фильтр прямой раздачи воздуха с установленным в него HEPA-фильтром 575 х 575 х 78 мм и вихревым диффузором размером 600 х 600 мм. Патрубок – круглый боковой. Возможные диаметры патрубков – 198, 248, 298 мм. HEPA-фильтр при уровне мощности шума в помещении до 40 дБ(А) может пропускает 970 м^3/ч, а вихревой диффузор только 600 м^3/ч.

Вариант 1. Фильтр H11

Начальный/конечный перепад давления на HEPA-фильтре – 125/250 Па. Расход воздуха ограничен вихревым диффузором и составляет 600 м^3/ч. Минимальный перепад давления на CAV-регуляторе принят равным 50 Па. Допустимый уровень звукового давления в чистом помещении не более 35 дБ(А).

Максимальный перепад давления комплекса CAV-регулятор + HEPA-фильтр складывается из их сопротивлений в конечном состоянии и равен 50 + 250 = 300 Па. В процессе эксплуатации это сопротивление не должно меняться. Тогда в начальный момент времени, когда сопротивление чистого HEPA-фильтра равно 125 Па,

сопротивление CAV будет составлять 300 – 125 = 175 Па. Результаты подбора диаметра CAV-регулятора представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Результаты подбора диаметра CAV-регулятора

Диаметр патруб. фильтра, мм	Диаметр CAV, мм	Звук. давл. канал, дБ(А)	Звук. давл. корпус, дБ(А)	Звук. давл. канал, дБ(А)	Звук. давл. корпус, дБ(А)	Точ-ность, %	Диапазон расхода, $м^3$/ч
		без глушителя		с глушителем			
-	160	49	37	35	37	5–6	216–600
200	200	45	33	36	33	7–8	324–600
250	250	42	31	34	31	9–10	522–600
315	-						

Допустимому уровню звукового давления удовлетворяют комбинации диаметром 200 и 250 мм. Видно, что наличие канального глушителя шума обязательно.

В том случае, когда чистое помещения должно функционировать в двух режимах: рабочем (дневной) – 600 $м^3$/ч и режиме проветривания (ночной) – 300 $м^3$/ч, выбор диаметра CAV-регулятора будет однозначным – 200. Для обеспечения двухрежимного функционирования помещения CAV-регулятор необходимо оснастить электрическим приводом.

Если CAV-регулятор устанавливается непосредственно в чистом помещении, то уровень шума, генерируемый CAV через корпус, может превышать допустимый уровень звукового давления в помещении. В этом случае для снижения шума CAV-регулятор может поставляться с корпусом, покрытым шумоизолирующим материалом.

Вариант 2. Фильтр H13

Начальный/конечный перепад давления – 300/600 Па. Расход воздуха ограничен вихревым диффузором и составляет 600 $м^3$/ч. Минимальный перепад давления на CAV-регуляторе принят равным 50 Па. Допустимый уровень звукового давления в чистом помещении не более 35 дБ(А).

Максимальный перепад давления комплекса CAV + HEPA-фильтр складывается из сопротивления CAV и сопротивления фильтра в конечном состоянии и равен 50 + 600 = 650 Па. В начальный момент времени, когда HEPA-фильтр чистый и его сопротивление равно 300 Па, сопротивление CAV будет составлять 650 – – 300 = 350 Па. В табл. 4 представлены результаты подбора диаметра CAV-регулятора.

Таблица 4 - Результаты подбора CAV-регулятор

Диаметр патруб, мм	Диаметр CAV, мм	Звук. давл. канал,	Звук. давл. корпус,	Звук. давл. канал,	Звук. давл. корпус,	Точ-ность, %	Диапазон расхода, $м^3$/ч

		дБ(А)	дБ (А)	дБ (А)	дБ (А)		
		без глушителя		с глушителем			
-	160	56	44	40	19*	5–6	216–600
200	200	51	39	34	39 (16*)	7–8	324–600
250	250	50	38	34	38 (13*)	9–10	522–600
315	-						

* Корпус CAV-регулятора с шумопоглощающим покрытием.

Для того чтобы удовлетворять требованиям акустики при использовании фильтра H14, не только необходимо использовать канальный глушитель шума, но и CAV-регулятор должен иметь заводское шумоглушащее покрытие. Воздуховоды до и после CAV-регулятора также должны иметь шумоглушащее покрытие.

Необходимо отметить, что применение канальных глушителей шума требует увеличения напора, развиваемого приточной установкой.

Характерной конструктивной особенностью CAV-регуляторов является невозможность его полного закрытия, то есть CAV-регулятор не может выполнять функции отсечного клапана. Для «грязных» помещений возможность отсечь ветку при замене фильтра является необходимым условием. Для этих помещений CAV-регулятор должен быть доукомплектован отсечным клапаном.

С целью уменьшения монтажного размера, необходимого для размещения CAV-клапана и отсечного клапана, можно воспользоваться VAV-регулятором с функцией поддержания постоянного расхода. VAV-регулятор – клапан с электрическим или пневматическим приводом и управляющим контроллером. В зависимости от назначения VAV-регулятор может выполнять функции CAV-регулятора с возможностью поддержания постоянного или нескольких расходов, а также может выполнять функции отсечного клапана.

Если VAV-регулятор укомплектовать датчиком перепада давления, он может быть использован для поддержания избыточного давления в чистых помещениях или разрежения в «грязных» помещениях.

Список возможных задач, для решения которых целесообразно использовать VAV-регулятор

1. Поддержание постоянного расхода с возможностью полного закрытия клапана. Использование привода с возвратной пружиной позволяет закрыть клапан при отключении электропитания.

2. Поддержание заданных параметров в помещении путем изменения расхода воздуха по сигналу с внешнего датчика. Возможно поддержание следующих параметров – температуры, концентрации CO_2, влажности.

3. Изменение расхода с помощью управляющего сигнала.

4. Поддержание избыточного давления в помещении или разрежения.

5. Ограничение избыточного давления в канале или перепада давления между каналами.

6. Для агрессивных сред используются специальные пластики или нержавеющая сталь в качестве материала корпуса.

Конструктивно VAV-регуляторы могут быть:

- круглые: D100–400 мм с диапазоном расходов 40–6 000 м^3/ч;

- прямоугольные: 200 х 100 – 1 000 х 1 000 с расходом 30–36 400 м^3/ч.

Минимально допустимый перепад на VAV-регуляторе – 50 Па. Диапазон регулирования расхода – стандартно 1:4, а в зависимости от типа контроллера – 1:10.

Для использования в чистых помещениях особый интерес представляют VAV-регуляторы с функциями поддержания давления. В качестве контроллера используется контроллер фирмы BELIMO – VRP STP. В качестве датчика давления – мембранный датчик фирмы BELIMO – VFP 100.

Возможные диапазоны поддержания избыточного давления комплексом VRP STP + VFP 100 представлены в табл. 5.

Таблица 5

Возможные диапазоны поддержания избыточного давления комплексом VRP STP + VFP 100

Номинальный перепад, Па	Максимальный поддерживаемый перепад, Па
100	до 30
50	до 15
25	до 7,5

Выбор требуемого значения избыточного перепада давления в помещении и определение, относительно какого помещения его необходимо поддерживать, являются задачами технолога.

На рис. 3 показано чистое помещение с функцией поддержания избыточного давления воздуха.

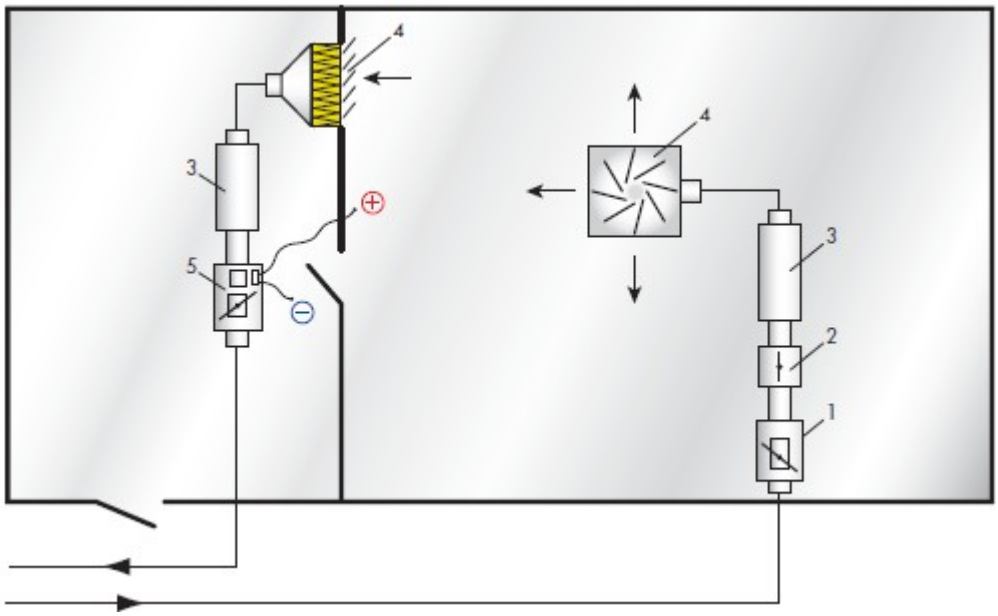


Рисунок 3.

Схема чистого помещения с функцией поддержания избыточного давления воздуха:

1 – CAV-регулятор с приводом для использования в двух режимах эксплуатации чистого помещения;

2 – отсечной клапан;

3 – глушитель;

4 – диффузор;

5 – VAV-регулятор с функцией поддержания давления

Подбор типоразмера VAV осуществляется по алгоритму, подобному выбору CAV-регулятора. Зная расход воздуха, допустимый уровень звукового давления в помещении и перепад давления на VAV-регуляторе, выбирается сечение регулятора, а также наличие шумоглушителя или/и шумоглушащего покрытия корпуса клапана.

Как правило, в VAV-регуляторах применяется электропривод. Время полного открытия клапана со стандартным приводом составляет 90 с. Что может случиться за это время?

Рассмотрим в качестве примера чистое помещение с тамбуром. Тамбур-шлюз открывается. Из-за утечек через тамбур-шлюз давление в чистом помещении начинает падать. Поддерживая избыточное давление в помещении, VAV-регулятор начинает закрываться. При полностью открытом шлюзе VAV-регулятор закроется полностью. Затем тамбур начинает закрываться, давление растет и VAV-регулятор открывается. До расчетного положения регулятора необходимо 90 с. За это время давление в помещении может существенно превысить допустимый предел. Выход из ситуации – использование или высокоскоростных (более дорогих) электрических приводов, или приводов пневматических, либо выбор VAV-регулятора большего размера, имеющего большую пропускную способность.

В качестве вывода можно отметить, что использование CAV- и VAV-регуляторов расхода для чистых помещений позволяет успешно решать проблему поддержания постоянного расхода приточного воздуха и избыточного давления воздуха в помещении. Эксплуатация чистого помещения в режиме рабочий/дежурный также может быть легко реализована с помощью CAV/VAV-регуляторов, использование которых способствует снижению эксплуатационных затрат за счет увеличения срока эксплуатации фильтров.

1. ГОСТ ИСО 14644–1–2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1. Классификация чистоты воздуха.

2. ГОСТ Р ИСО 14644–4–2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 4. Проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию.

3. ГОСТ Р ИСО 14644–5–2005. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 5. Эксплуатация.

4. Чистые помещения. Под ред. А. Е.Федотова. Второе изд. – М. : АСИНКОМ, 2003.

5. ГОСТ Р 51251–99. Фильтры очистки воздуха. Классификация. Маркировка.