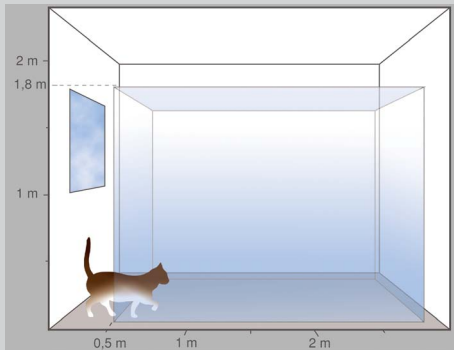


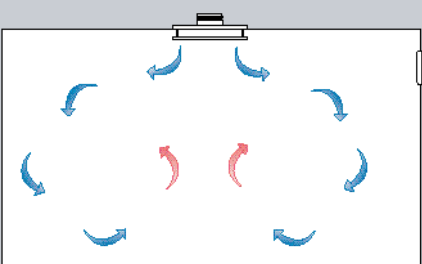
Вентиляция вытеснением

Воздух, который несколько холоднее, чем воздух в помещении, подается на малой скорости в рабочую зону.



Рабочая зона

Это часть помещения, занимаемая или используемая людьми. Рабочей зоной принято считать пространство, отстоящее на 50 см от стены с оконными проемами, в 20 см от других стен и до 180 см от пола.



Вентиляция перемешиванием

Воздух подается одним или несколькими воздушными струями вне рабочей зоны.

ВЕНТИЛЯЦИЯ

Различают два основных способа вентиляции зданий: вентиляция вытеснением и вентиляция перемешиванием.

Вентиляция вытеснением преимущественно используется для вентилирования больших промышленных помещений, поскольку она может эффективно удалять излишки тепловыделений, если правильно рассчитана. Воздух подается на нижний уровень помещения и течет в рабочую зону с малой скоростью. Этот воздух должен быть несколько холоднее, чем воздух помещения, чтобы работал принцип вытеснения. Этот метод обеспечивает прекрасное качество воздуха, но он менее пригоден для использования в офисах и других небольших помещениях, поскольку терминал направленной подачи воздуха занимает довольно много места, и часто непросто избежать сквозняков в рабочей зоне.

Вентиляция перемешиванием является предпочтительным способом раздачи воздуха в ситуациях, когда необходима, так называемая, комфортная вентиляция. Основой этого метода является то, что подаваемый воздух поступает в рабочую зону уже смешанным с воздухом помещения. Расчет системы вентиляции должен быть сделан таким образом, чтобы воздух, циркулирующий в рабочей зоне, был достаточно комфортным. Другими словами, скорость воздуха не должна быть слишком большой, и температура внутри помещения должна быть более или менее однородной.

Вентиляция перемешиванием

Воздушная струя, входящая в помещение, вовлекает в поток и перемешивает большие объемы окружающего воздуха. В результате объем воздушной струи увеличивается, тогда как ее скорость снижается тем больше, чем дальше он проникнет в помещение. Подмешивание окружающего воздуха в воздушный поток называется эжекцией.

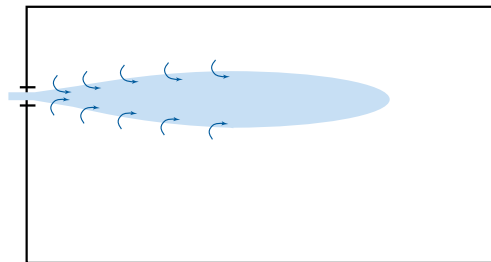


Рис. 8. Эжекция.

Движения воздуха, вызванные воздушной струей, вскоре тщательно перемешивают весь воздух в помещении. Загрязняющие примеси, находящиеся в воздухе, не только распыляются, но и равномерно распределяются. Температура в различных частях помещения также выравнивается.

При расчетах вентиляции перемешиванием самым важным моментом является обеспечение того, чтобы скорость воздуха в рабочей зоне не была слишком высокой, иначе возникает ощущение сквозняка.

Теория воздушных струй

На рис. 9, показана воздушная струя, которая формируется в случае, когда воздух принудительно подается в помещение через отверстие в стене. В результате появляется свободная воздушная струя. Если температура воздуха в струе такая же, как и в помещении, она называется свободной изотермической струей.

Распределение и форма

Воздушная струя состоит из нескольких зон с различными режимами потоков и скоростями перемещения воздуха. Зона, представляющая наибольший практический интерес, - это основной участок. Скорость в центре (скорость вокруг центральной оси) является обратно пропорциональной расстоянию от диффузора или клапана, т. е. чем дальше от диффузора, тем меньше скорость воздуха. Воздушная струя полностью развивается на основном участке, и преобладающие здесь условия будут оказывать решающее воздействие на режим потоков в помещении в целом.

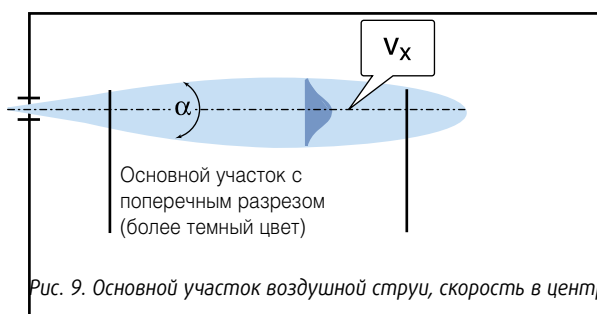


Рис. 9. Основной участок воздушной струи, скорость в центре v_x и угол наклона.

От формы диффузора или проходного отверстия воздухораспределителя зависит форма воздушной струи. Круглые или прямоугольные проходные отверстия создают компактную воздушную струю конической формы. Для того чтобы воздушная струя была абсолютно плоской, проходное отверстие должно быть более чем в двадцать раз шире своей высоты или таким же широким, как помещение. Воздушные веерные струи получаются при прохождении через совершенно круглые проходные отверстия, где воздух может распространяться в любых направлениях, как в приточных диффузорах.

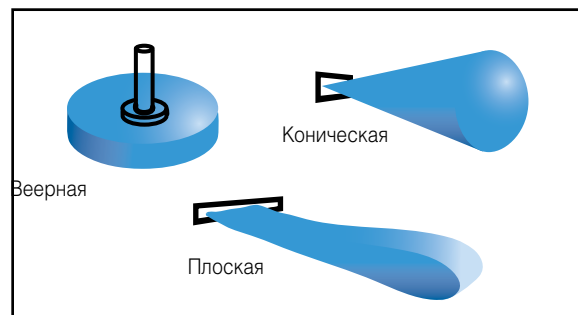


Рис. 10. Различные типы воздушных струй

α = угол раскрытия

Угол раскрытия

В соответствии со справочником ASHRAE 1996 года (Американского общества инженеров в области отопления, холодильной техники и кондиционирования), раскрытие воздушной струи имеет постоянный угол 20-24° (в среднем 22°).

Форма выходного отверстия, конфигурация помещения и количество выходных отверстий - все эти факторы оказывают влияние на угол раскрытия. Диффузоры и клапаны с пластинами или другими деталями, которые распределяют воздух, могут давать более широкий угол, но уже на сравнительно небольшом расстоянии от выходного отверстия клапана эти воздушные струи имеют раскрытие от 20 до 24°.

Расчет скорости воздуха

Для конических и веерных струй:

$$\frac{v_x}{v_0} = K * \frac{\sqrt{A_{\text{eff}}}}{x} \quad A_{\text{eff}} = \frac{q}{v_0}$$

x = расстояние от диффузора или клапана (м)

v_x = скорость в центре на расстоянии x (м/с)

v_0 = скорость на выходе из диффузора/ клапана (м/с)

K = коэффициент диффузора

A_{eff} = эффективная площадь выхода диффузора/ клапана (м²)

q = объем воздуха, проходящий через выходное отверстие (м³/с)

Для плоской воздушной струи:

$$\frac{v_x}{v_0} = \sqrt{\left(K * \frac{b}{x} \right)}$$

x = расстояние от диффузора или клапана (м)

v_x = скорость на расстоянии x (м/с)

v_0 = скорость на выходе из диффузора/ клапана (м/с)

K = коэффициент диффузора

h = высота отверстия (м)

Скорость в сечении воздушной струи, перпендикулярной оси, будет

$$\frac{v}{v_x} = \left[1 - \left(\frac{y}{0,3 * x} \right)^2 \right]$$

y = расстояние по вертикали от центральной оси (м)

x = расстояние от диффузора/клапана (м)

v = скорость на расстоянии y (м)

v_x = скорость в центре на расстоянии x (м/с)

Теоретический расчет коэффициента диффузора:

$$K = \sqrt{\left(\frac{i}{\epsilon}\right)^{1,5}} \cdot \frac{1}{C_b}$$

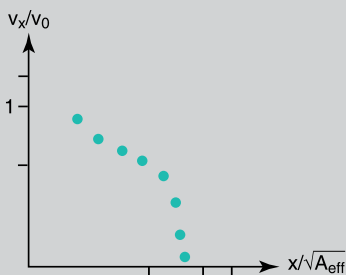
i = фактор импульса, показывающий распространение импульсов в точке подачи воздуха ($i < 1$)

ϵ = коэффициент стеснения струи

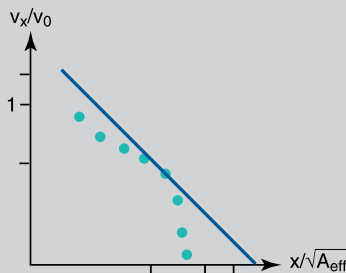
C_b = постоянная турбулентности (0,2-0,3 в зависимости от типа диффузора или клапана)

Практический расчет коэффициента диффузора

Значения замеров (v_x/v_0) и ($x/\sqrt{A_{eff}}$) составляют:



Используя значения, полученные для основного участка воздушной струи, тангенс (коэффициент угла) выводится на угол -1 (45°).

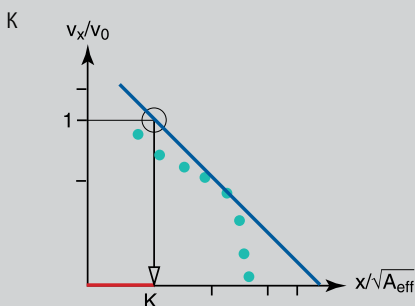


Формула для скоростного профиля показывает, что $\frac{v_x}{v_0} = K \cdot \frac{\sqrt{A_{eff}}}{x}$

когда

$$K = \frac{x}{\sqrt{A_{eff}}} \quad \frac{v_x}{v_0} = 1$$

Теперь линия должна быть нарисована от пересечения углового коэффициента 1 на шкале y, чтобы получить значение для коэффициента диффузора K



Скоростной профиль

Скорость воздуха в каждой части струи можно рассчитать математически. Для расчета скорости на определенном расстоянии от выходного отверстия диффузора/клапана, необходимо знать скорость воздуха на выходе из диффузора/клапана, его форму и тип воздушной струи, который им формируется. Таким же образом возможно рассмотреть, как варьируют скорости в каждом профиле струи.

Используя эти расчеты, можно нарисовать кривые скорости для всей струи. Это дает возможность определить области, которые имеют одну и ту же скорость. Эти области называются изовелами (линии постоянной скорости). Убедившись, что изовела, соответствующая 0,2 м/сек, находится за пределами рабочей зоны, можно быть уверенным, что скорость воздуха не превысит этот уровень непосредственно в рабочей зоне.

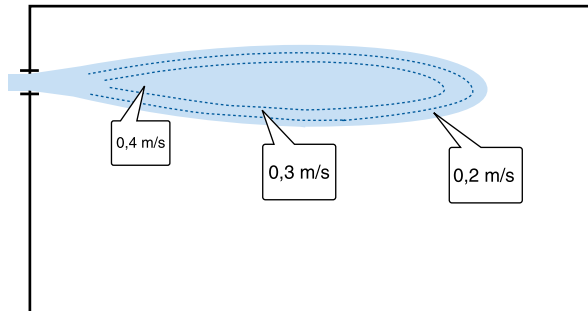


Рис. 11. Различные изовелы воздушной струи

Коэффициент диффузора

Коэффициент диффузора - постоянная величина, которая зависит от формы диффузора или клапана. Коэффициент можно рассчитать теоретически с использованием следующих факторов: импульсное рассеивание и сужение воздушной струи в точке, где она подается в помещение, и степень турбулентности, созданная диффузором или клапаном.

На практике коэффициент определяют для каждого типа диффузора или клапана, измеряя скорость воздуха как минимум в восьми точках, находящихся на разном расстоянии от диффузора/клапана и не менее чем в 30 см друг от друга. Эти значения затем наносят на график с логарифмическим масштабом, который показывает замеренные величины для основного участка воздушной струи, а это, в свою очередь, дает значение для константы.

Коэффициент диффузора дает возможность рассчитать скорости воздушной струи и спрогнозировать распределение и путь воздушной струи. Этот коэффициент отличен от коэффициента K, который используется для введения верного значения объема воздуха, выходящего из приточного воздухораспределителя или ирисового клапана. Коэффициент K описан на странице 390.

Эффект настиления

Если воздухоораспределитель установлен в достаточной близости от плоской поверхности (обычно это потолок), выходящая воздушная струя отклоняется в ее сторону и стремится течь непосредственно по поверхности. Этот эффект возникает вследствие образования разряжения между струей и поверхностью, а так как нет возможности подмеса воздуха со стороны поверхности, то струя отклоняется в ее сторону. Это явление называется настиляющим эффектом.

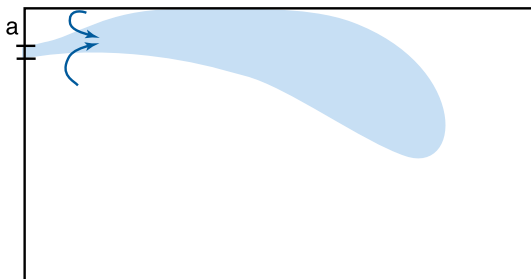


Рис. 12. Настиляющий эффект

Практические эксперименты показали, что расстояние между верхней кромкой диффузора или клапаном и потолком ("а" на рис. 12) не должно превышать 30 см, чтобы возник настиляющий эффект. Эффект настиления можно использовать для того, чтобы увеличить путь холодной воздушной струи вдоль потолка до внедрения ее в рабочую зону. Коэффициент диффузора будет несколько выше при возникновении настиляющего эффекта, чем при свободном воздушном потоке. Также важно знать, как крепится диффузор или клапан при использовании коэффициента диффузора для проведения различных расчетов.

Неизотермическая воздушная струя

Картина распределения становится более сложной, когда подаваемый воздух теплее или холоднее, чем внутри помещения. Тепловая энергия, возникающая в результате разницы в плотности воздуха при различных температурах, заставляет более холодный воздушный поток двигаться вниз (струя тонет), а более теплый воздух устремляется вверх (струя всплывает). Это означает, что две различные силы оказывают воздействие на холодную струю, находящуюся у потолка: эффект настиления, который старается прижать ее к потолку, и тепловая энергия, которая стремится опустить ее к полу. На определенном расстоянии от выхода диффузора или клапана тепловая энергия будет преобладать, и воздушная струя в конечном итоге отклонится от потолка.

Отклонение струи и точка отрыва могут быть рассчитаны с помощью формул, основанных на температурных дифференциалах, на типе выходного отверстия диффузора или клапана, а также на скорости воздушного потока и т. д.

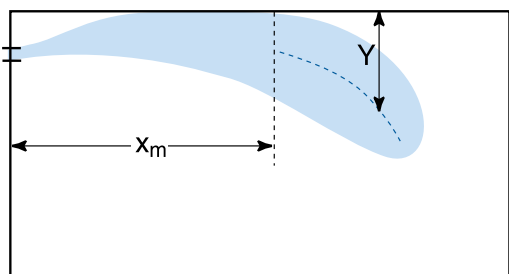


Рис. 13. Точка отрыва воздушной струи (X_m) и отклонение (Y)

Коэффициент диффузора, когда эффект настиления оказывает влияние на воздушную струю.

$$K_{\text{корректир}} = \sqrt{2} * K_{\text{Freistrah}}$$

Горизонтальный угол раскрытия также увеличивается до 30°, когда струя отклоняется в направлении потолка, в то время как вертикальный угол остается неизменным (20-24°).

Отклонение

Отклонение от потолка к центральной оси воздушного потока (Y) может быть рассчитано следующим образом:

$$Y = \sqrt{A_{\text{эфф}}} * 0,0014 * \frac{\Delta t_0 * \sqrt{A_{\text{эфф}}}}{K * v_0^2} * \left[\frac{x}{\sqrt{A_{\text{эфф}}}} \right]^3$$

где:

Δt_0 = разница температур воздушной струи и помещения

x = расстояние от диффузора/клапана (м)

v_x = скорость в центре на расстоянии x (м/с)

v_0 = скорость у выпускного отверстия диффузора/клапана (м/с)

K = коэффициент диффузор

$A_{\text{эфф}}$ = эффективная площадь выхода с диффузора/клапана (м²)

Точка отрыва

Точка, где коническая воздушная струя оторвется от потолка (x_m) составит:

$$x_m = \frac{1,6 * K * v_0 * A_{\text{эфф}}}{(A_{\text{эфф}})^{0,75} * \sqrt{\Delta t_0}}$$

и для веерной струи:

$$x_m = \frac{3,5 * K^{1,5} * v_0 * A_{\text{эфф}}}{(A_{\text{эфф}})^{0,75} * \sqrt{\Delta t_0}}$$

где:

Δt_0 = разница температур воздушной струи и помещения

v_0 = скорость у выпускного отверстия диффузора/клапана (м/с)

K = коэффициент диффузора

$A_{\text{эфф}}$ = эффективная площадь выхода воздушной струи диффузора/клапана (м²)

После того, как струя оторвется от потолка, новое направление струи может быть рассчитано при помощи формулы для отклонения (см. выше). Под расстоянием (x) в этом случае понимается расстояние от точки отрыва.

Проникающая способность

Наиболее распространенный метод для выбора приточного диффузора - учет длины струи $L_{0,2}$. Но, поскольку желаемая конечная скорость воздушной струи зависит как от конфигурации помещения, так и от необходимой скорости воздуха в рабочей зоне, это, иногда, может ввести в заблуждение. Поэтому вместо выбора по длине струи предлагается концепция проникающей способности.

Проникающая способность - это расстояние до точки, для которой должна быть рассчитана конечная скорость. Это может быть расстояние вдоль оси воздушного потока, идущего от диффузора до самой дальней точки помещения, где требуется подача воздуха. Для установленных на стене диффузоров это означает, что проникающая способность такая же, как и глубина помещения, тогда как для потолочных диффузоров проникающая способность составляет половину глубины помещения.

Скорость обратного воздушного потока примерно на 30 % меньше, чем скорость основного воздушного потока. Если максимальная скорость возвратного воздушного потока в рабочей зоне составляет 0,18 м/с, значит, основной воздушный поток должен иметь максимальную скорость 0,26 м/с.

Скорость на глубине проникающей способности диффузора может быть рассчитана теоретически с использованием формулы для расчета скорости воздушной струи:

где:

v_x = скорость при проникающей способности (м/с)

$$v_x = v_0 * K * \frac{\sqrt{A_{\text{eff}}}}{x_v}$$

v_0 = скорость у выходного отверстия диффузора (м/с)

K = коэффициент диффузора

A_{eff} = эффективная площадь выходного отверстия (м²)

x_v = проникающая способность (м)

Данный метод дает возможность более точно определиться с расчетом вентиляционной системы, чем при использовании только данных по длине струи, а потому его часто применяют в различных программах по выбору диффузоров.

Длина струи для изотермического воздуха

Диффузор, располагающийся на задней стенке помещения, и настенного размещения: от 0,7 до 1,0 x глубину помещения.

Потолочный диффузор (воздух подается горизонтально): 0,5 x глубину помещения (в прямоугольных помещениях, расстояние рассчитывается до ближайшей стенки).

Важные критерии при расчете вентиляции

Важно правильно выбрать и разместить воздухораспределитель. Важно также, чтобы в рабочей зоне температура и скорость воздуха были приемлемыми.

Правильная скорость воздуха в рабочей зоне

Для большинства воздухораспределительных устройств в каталоге приведена характеристика, называемая длиной струи. Под длиной струи понимается расстояние от приточного отверстия диффузора или клапана до сечения воздушной струи, в котором скорость ядра потока снижается до определенного значения, обычно до 0,2 м/сек.

Длина струи обозначается $l_{0,2}$ и измеряется в метрах.

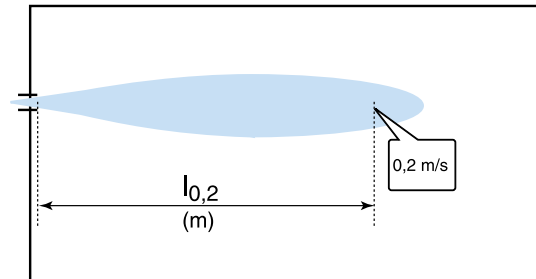


Рис. 14. Понятие "Длина струи"

Первое, что принимается во внимание при расчетах систем воздухораспределения, - это то, как избежать слишком высоких скоростей воздушного потока в рабочей зоне. Но, как правило, в рабочую зону попадает отраженный или обратный ток этой струи: см. рис.15.

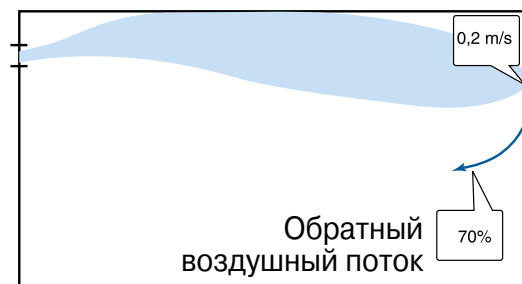


Рис. 15. Обратный воздушный поток при установленном на стене диффузоре

Скорость обратного воздушного потока составляет примерно 70 % от скорости, основной воздушной струи у стены. Это означает, что диффузор или клапан, установленный на задней стене, подающий струю воздуха с конечной скоростью 0,2 м/сек, вызовет скорость воздуха в обратном потоке 0,14 м/сек. Что соответствует комфортной вентиляции в рабочей зоне, скорость воздуха в которой не должна превышать 0,15 м/с.

Длина струи для описанного выше диффузора или клапана такая же, как длина помещения, и в данном примере является прекрасным выбором. Приемлемая длина струи для установленного на стене диффузора лежит между 70 % и 100 % длины помещения.

Проникающая способность воздушной струи

Форма помещения может оказать существенное влияние на конфигурацию потока. Когда поперечное сечение воздушного потока составляет более 40 % от поперечного сечения помещения, эжекция воздуха помещения в поток прекратится. В результате воздушная струя начнет подмешивать собственный воздух. При этом увеличение скорости подаваемого воздуха не решит проблему, поскольку проникающая способность останется прежней, увеличится только скорость воздушной струи и окружающего воздуха в помещении.

В той части помещения, куда не доходит основной воздушный поток, начнут появляться другие воздушные потоки, вторичные вихри. Однако, если длина помещения менее чем в три раза больше его высоты, можно предположить, что воздушная струя проникнет до конца помещения.

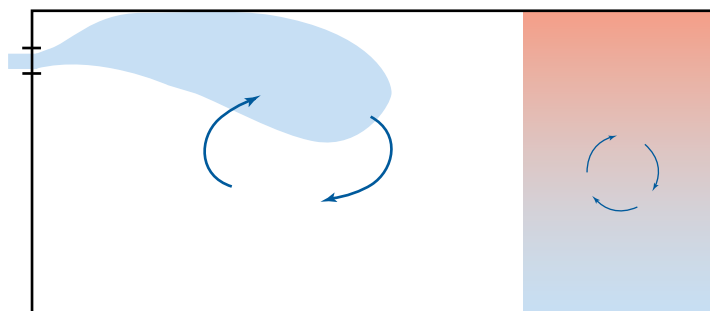


Рис. 16. Вторичные вихри образуются в самом дальнем конце помещения, куда не доходит воздушная струя

Обтекание препятствий

Воздушная струя при наличии препятствий на потолке в виде перекрытий, светильников и др., если они расположены слишком близко от диффузора, может отклониться и опуститься в рабочую зону. А потому необходимо знать, какое расстояние должно быть (A на графике) между устройством, подающим воздух, и препятствиями для свободного продвижения струи воздуха.

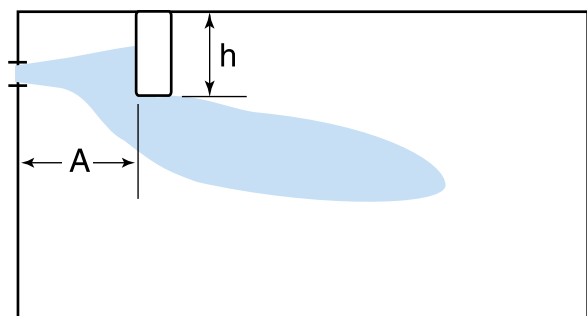
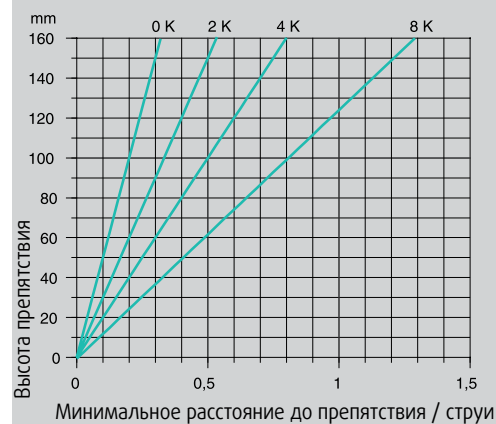


Рис. 17. Минимальное расстояние до препятствия

Расстояние до препятствия (эмпирическое)

График показывает минимальное расстояние до препятствия как функцию высоты препятствия (h на рис. 17) и температуры воздушной струи в самой низкой точке.



Определение размеров зон для нескольких потолочных диффузоров

Большое помещение должно быть разделено на несколько зон. Максимальные размеры каждой зоны составляют $1,5 \times$ длину помещения (А), если только это значение не превышает $3 \times H$ (см. рис. 18).

Соответствующая длина струи составляет $0,5 \times C$, где C = расстояние между диффузорами (см. рис. 19).

Пример

Большое помещение (см. рис. 19) имеет следующие размеры

$H = 3$ м

$A = 4$ м

$B = 16$ м

- 1) На сколько зон должно быть разделено помещение?
- 2) Каково будет расстояние между диффузорами?

- 1) Максимальный размер каждой зоны $1,5 \times A = 6$ м. Значит, помещение должно быть разделено на три зоны длиной по $5,33$ м.
- 2) Если диффузор размещен в центре каждой зоны, расстояние (C) между диффузорами составит $5,33$.

Определение размеров зон для нескольких настенных диффузоров

Наименьшее расстояние между двумя настенными диффузорами (D на рис. 20) составляет $0,2 \times l_{0,2}$.

Требуемая длина струи от $0,7$ до $1,0 \times A$, где A = глубина помещения.

Пример

Помещение, глубина которого составляет 5 м, вентилируется от задней стены посредством диффузоров с длиной струи 4 м.

- 1) Какое расстояние должно быть между двумя диффузорами?

$$0,2 \times l_{0,2} = 0,2 \times 4 = 0,8 \text{ м}$$

- 1) Расстояние между двумя диффузорами должно составлять 80 см

Установка нескольких воздухораспределителей

Если один потолочный диффузор предназначен для обслуживания всего помещения, он должен быть размещен как можно ближе к центру потолка, и общая площадь не должна превышать размеров, указанных на рис. 18.

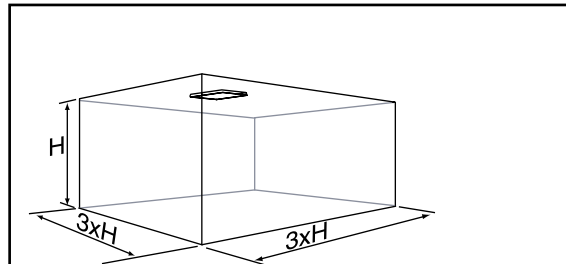


Рис. 18. Небольшое помещение, вентилируемое одним потолочным диффузором
Если помещение

большое, необходимо разделить его на несколько зон, и в каждой зоне поместить по диффузору.

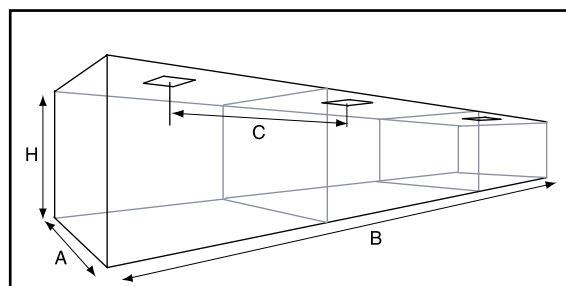


Рис. 19. Большое помещение, вентилируемое несколькими потолочными диффузорами

Помещение, вентилируемое несколькими настенными диффузорами, также делят на несколько зон. Количество зон зависит от расстояния между диффузорами, достаточного для предотвращения воздействия друг на друга. Если два воздушных потока смешиваются, получается один поток с большей длиной струи.

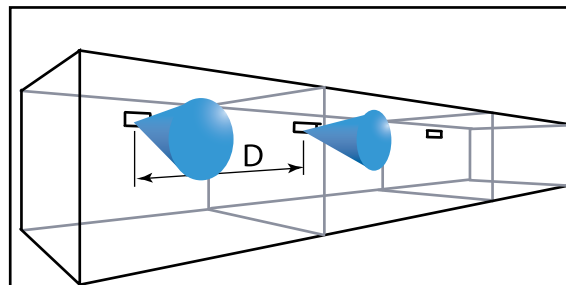


Рис. 20. Большое помещение, вентилируемое несколькими настенными диффузорами

Подача теплого воздуха

Горизонтально подаваемый потолочным диффузором теплый воздух хорошо обогревает помещения с высотой потолков до $3,5$ метров, повышая комнатную температуру на $10-15^\circ\text{C}$.

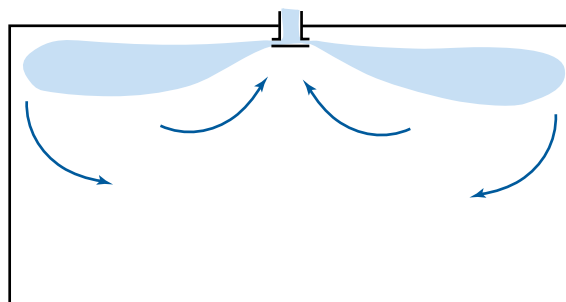


Рис. 21. Горизонтальная подача воздуха потолочным диффузором

Однако в очень высоких помещениях подаваемый воздух должен быть направлен вертикально вниз, если он используется и для обогрева помещения. Если разница температур не более 10°C, то воздушная струя должна опуститься примерно до 1 м от пола, чтобы температура в рабочей зоне стала комфортной.

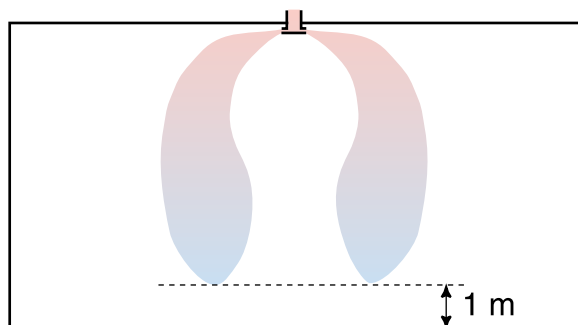


Рис. 22. Вертикальная подача воздуха потолочного диффузора

Подача холодного воздуха

Если подаваемый вдоль потолка воздух холоднее воздуха в помещении, важно, чтобы скорость воздушной струи была достаточно высока, чтобы обеспечить ее прилегание к потолку. Если ее скорость будет слишком мала, существует риск того, что тепловая энергия может направить воздушную струю вниз к полу слишком рано.

На определенном расстоянии от диффузора, подающего воздух, воздушная струя в любом случае отделится от потолка и отклонится вниз. Это отклонение случится быстрее для воздушной струи, которая имеет температуру ниже комнатной, а потому в этом случае длина струи будет короче.

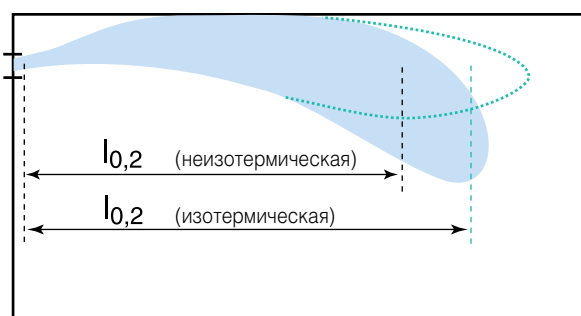


Рис. 23. Разница между длиной изотермической и неизотермической струй.

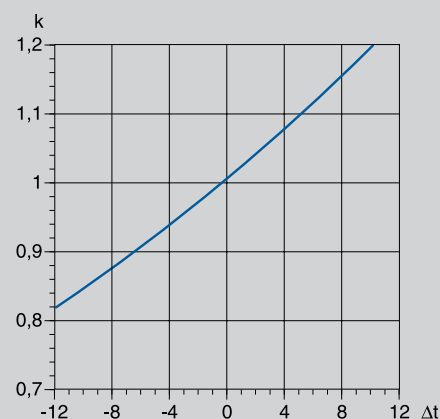
Воздушная струя должна пройти, по крайней мере, 60 % глубины помещения, прежде чем отделиться от потолка. Максимальная скорость воздуха в рабочей зоне будет, таким образом, почти такой же, как и при подаче изотермического воздуха. Как рассчитать точку отрыва воздушной струи от потолка указано на стр. 548.

Когда температура подаваемого воздуха ниже комнатной, воздух в помещении будет до некоторой степени охлаждаться. Приемлемый уровень охлаждения (известный как максимальный эффект охлаждения) зависит от требований к скорости воздуха в рабочей зоне, от расстояния до диффузора, на котором воздушная струя отделяется от потолка, и также от типа диффузора и его местоположения.

В общем, большая степень охлаждения достигается при использовании потолочного, а не настенного диффузора. Это происходит потому, что потолочный диффузор распространяет воздух во всех направлениях, а потому ему требуется меньше времени для смешивания с окружающим воздухом и для выравнивания температуры.

Поправки для длины струи (эмпирические)

График можно использовать для получения примерного значения для длины неизотермической струи.



$$l_{0,2} \text{ (неизотермическая)} = k \times l_{0,2} \text{ (изотермическая струя)}$$

Максимально приемлемый эффект охлаждения

Эмпирическое правило для максимально приемлемого охлаждения (Q_{\max}) гласит:

При подаче воздуха настенным диффузором

$$Q_{\max} = 20-40 \text{ Вт на м}^2 \text{ поверхности пола при } \Delta t=8\text{K}$$

При подаче воздуха потолочным диффузором

$$Q_{\max} = 60-100 \text{ Вт на м}^2 \text{ поверхности пола при } \Delta t=12\text{K}$$